



Carlos Hugo Soto Morote

**Estabilidade e Deformação de Taludes de Solo 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. Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Celso Romanel

Rio de Janeiro, 04 de agosto de 2006



Carlos Hugo Soto Morote

Estabilidade e Deformação de Taludes de Solo 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.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Celso Romanel

Orientador

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Francisco Cláudio Pereira de Barros

Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN

João Luís Pascal Roehl

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Paulo Batista Gonçalves

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 04 de agosto de 2006

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

Carlos Hugo Soto Morote

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia (UNI-PERU) em 1997, onde participou de programa de iniciação científica na área de ensaios geotécnicos de laboratório. Ingressou no curso de mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio no ano de 2003, atuando na linha de pesquisa Geomecânica Computacional. Desenvolveu estudos sobre a estabilidade e servicibilidade de taludes de solo sujeitos a carregamentos sísmicos, com publicação de artigos sobre o tema em congressos do Brasil e do Peru.

Ficha Catalográfica

Soto Morote, Carlos Hugo

Estabilidade e Deformação de Taludes de Solo sob Carregamento Sísmico/ Carlos Hugo Soto Morote; orientador: Celso Romanel – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.

v. , 136 f. :il ;29.7 cm.

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

Incluí referências bibliográficas.

Engenharia Civil – Teses. 2. Análise sísmica de taludes de solo. 3. Terremoto. 4. Deformação de taludes de solo. 5. Estabilidade de taludes de solo. 6. Elementos finitos. I. Romanel, Celso. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. III. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

A Deus, por que tudo é por sua graça e nada seria possível sem sua benção. D'Ele são todos os caminhos.

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro(PUC-Rio) e ao CNPq por terem me concedido a valiosa oportunidade de realizar este trabalho.

Ao professor Celso Romanel, por sua orientação, amizade e muita paciência , meus mais sinceros agradecimentos.

À Paola Regina Dalcanal por ter providenciado a geração dos sismos artificiais utilizados nesta dissertação

Ao Denys Parra por sua amizade, estímulo e apoio brindado durante toda a etapa de estudos e na minha vida profissional.

À minha mãe Sara por seu sacrifício e apoio incondicional durante todo este tempo.

A todos os amigos e companheiros de estudos do curso de Mestrado em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Aos funcionários da Secretaria do Departamento de Engenharia Civil, em especial à Ana Roxo e Rita de Cássia, pela atenção, dedicação e paciência..

Resumo

Soto Morote, Carlos Hugo. Romanel, Celso. **Estabilidade e Deformação de Taludes de Solo sob Carregamento Sísmico**. Rio de Janeiro, 2006. 136p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O comportamento sísmico de taludes tem sido um tópico de grande interesse da engenharia geotécnica nos últimos 40 anos. Durante este período, a prática da engenharia nesta área evoluiu do emprego de técnicas elementares para procedimentos numéricos bastante complexos. A abordagem mais simples é a análise pseudo-estática na qual o carregamento do terremoto é simulado por uma aceleração horizontal estática “equivalente” atuando na massa de solo deslizando, utilizando-se um procedimento de equilíbrio limite (método das fatias), geralmente conservativo. O parâmetro que descreve o comportamento dinâmico do solo é referido como coeficiente sísmico k , e sua seleção depende fortemente da experiência e normas técnicas locais, porque não há maneira simples e segura de se escolher um valor adequado. O segundo procedimento é conhecido como método de Newmark, que envolve o cálculo de uma aceleração de escoamento, definida como a força inercial necessária para o fator de segurança atingir 1 em uma análise pseudo-estática pelo método de equilíbrio limite. O procedimento então usa os registros de aceleração do terremoto de projeto e o integra duplamente no tempo para calcular os deslocamentos permanentes acumulados. O terceiro método é referido como análise de Makdisi-Seed, que procura definir a estabilidade sísmica do talude em termos de deslocamentos aceitáveis em vez de um fator de segurança tradicional através de uma versão modificada do método de Newmark. Esta técnica apresenta uma maneira racional de calcular uma aceleração de escoamento média, necessária para produzir um valor do coeficiente de segurança do talude igual a 1. Gráficos específicos foram também desenvolvidos para estimativa dos deslocamentos permanentes, tendo sido bastante aplicados em aterros rodoviários, barragens e aterros sanitários. Finalmente, o mais sofisticado método para análise de estabilidade sísmica de taludes é conhecido como análise dinâmica, que normalmente incorpora modelos de elementos finitos e relações tensão x deformação complexas numa tentativa de

obter melhores representações para o comportamento mecânico de taludes sob cargas cíclicas. Os resultados destas análises podem incluir a história no tempo dos deslocamentos e tensões, bem como das frequências naturais, efeitos de amortecimento, etc. Este trabalho apresenta uma comparação entre os métodos mencionados anteriormente, analisando o comportamento sísmico dos taludes da estrutura de contenção dos resíduos de lixiviação de minério de urânio, na Bahia, e dos taludes do bota-fora sul da mina de cobre Toquepala, situada no Peru.

Palavras-chave

Análise sísmica de taludes de solo; terremoto; deformação de taludes de solo; estabilidade de taludes de solo; elementos finitos.

Abstract

Soto Morote, Carlos Hugo. Romanel, Celso (advisor). **Stability and Deformation of Soil Slopes under Seismic Load**. Rio de Janeiro, 2006. 136p. M.Sc. Thesis – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The seismic stability of slopes has been a topic of considerable interest in geotechnical engineering for the past 40 years. During that period, the state of practice has moved from simple techniques to more complicated numerical procedures. The simplest approach is the pseudo-static analysis in which the earthquake load is simulated by an “equivalent” static horizontal acceleration acting on the mass of the landslide, according to a generally conservative limit equilibrium analysis. The ground motion parameter used in a pseudo-static analysis is referred to as the seismic coefficient k , and its selection has relied heavily on engineering judgment and local code requirements because there is no simple method for determining an appropriate value. The second main procedure is known as the Newmark displacement analysis which involves the calculation of the yield acceleration, defined as the inertial force required to cause the static factor of safety to reach 1 from the traditional limit equilibrium slope stability analysis. The procedure then uses a design earthquake strong-motion record which is numerically integrated twice for the amplitude of the acceleration above the yield acceleration to calculate the cumulative displacements. These displacements are then evaluated in light of the slope material properties and the requirements of the proposed development. The third method is referred to as the Makdisi-Seed analysis sought to define seismic embankment stability in terms of acceptable deformation instead of conventional factors of safety, using a modified Newmark analysis. Their method presents a rational means to determine yield acceleration, or the average acceleration required to produce a factor of safety of unity. Design curves were developed to estimate the permanent earthquake-induced deformations of embankments, which have since been applied to sanitary landfill

and highway embankments. Finally, the most sophisticated method for seismic slope stability calculations is known as the dynamic analysis, which normally incorporates a finite element model and a rather complex stress-strain behavior for geological materials in an attempt to obtain a better representation of the behavior of soils under cyclic loading. The results of the analysis can include a time history of displacements and stresses, as well as natural frequencies, effects of damping, etc. This work presents a comparison of the results obtained by the aforementioned approaches, considering the seismic behavior of the slopes of an uranium lixiviation pad situated in Bahia, Brazil, and the South embankment of the waste landfill of the Toquepala Mine, Peru.

Keywords

Soil slope seismic analysis; earthquake; soil slope deformation; soil slope stability; finite elements.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos da pesquisa e estrutura da dissertação	21
2 MÉTODOS PSEUDO-ESTÁTICOS	23
2.1. Método das fatias	23
2.1.1 Coeficiente sísmico	28
2.2 Método de Sarma (1973)	30
2.3. Análise pós-sismo	34
2.4. Comentários finais	35
3 Métodos de Newmark	38
3.1. Método de Newmark convencional (1965)	38
3.2. Consideração da flexibilidade do solo	45
3.2.1. Modelos desacoplados	45
3.2.2. Métodos acoplados	47
3.3. Comentários finais	53
4 MÉTODO DE MAKDISI E SEED (1978)	56
4.1 Método simplificado	56
4.2. Caso de taludes íngremes	59
4.3. Comentários finais	62
5 Método dos Elementos Finitos	64
5.1. Introdução	64
5.2. Aspectos da modelagem	67
5.3. Modelos constitutivos	68
5.3.1. Modelo linear equivalente	69
5.3.2. Modelo não-linear simplificado	73
5.3.3. Modelos cíclicos	74

5.3.4. Modelos elasto-plásticos	75
5.4. Programa computacional de elementos finitos	75
 6 TALUDES ANALISADOS	 79
6.1. Célula 2 do sistema de Contenção de Rejeitos de Urânio do IMB	79
6.2 Propriedades dos materiais	80
6.3 Sismo de projeto	81
6.4 Comportamento da seção 2-2	94
6.5 Comportamento da seção 7-7	103
6.6 Taludes do bota-fora da mina Toquepala, Peru	109
 7 Conclusões	 128
 8 Referências bibliográficas	 130

Lista de Símbolos

ψ'_i	Ângulo de atrito levando-se em conta a segurança
$\sigma = \frac{N}{\ell}$	Tensão média na base da fatia
σ'	Tensão normal efetiva
$\bar{c}'_i = \frac{c'_i}{FS}$	Coesão minorada pelo fator de segurança FS
$\bar{r}, \bar{\phi}_i, \bar{c}'_i$	Valores médios dos parâmetros para a seção i
K_0	Coefficiente en repouso
$\ddot{u}(y,t)$	Aceleração no modelo de viga de cisalhamento.
$\phi_n(y)$	Fator de participação modal.
$(\gamma_{ave})_{eq}$	Deformação cisalhante média equivalente
ΔM	Peso de uma fatia individual (Ashford e Sitar)
\bar{r}	vetor que define a superfície de ruptura
\bar{r}_0	vetor que define o ponto mais alto da superfície de ruptura
$\bar{\theta}$	ângulo desde o eixo das abscissas até a posição do vetor \bar{r}
$\bar{\theta}_0$	ângulo medido desde o eixo “x” até a posição do vetor \bar{r}_0
t_i	tempo na qual começará a ocorrer o movimento
\ddot{x}_i	primeiro movimento de aceleração positiva
\dot{x}	velocidade de movimento
$\tilde{u}_b(\omega)$	transformada de Fourier de $\ddot{u}_b(t)$
η	relação de amortecimento
ω	freqüência particular de vibração.
$\langle N \rangle^T$	Funções de Forma
σ'_c	tensão de confinamento efetivo antes do sismo.

Δy	maior tamanho vertical do elemento da malha do MEF.
$f_{m\acute{a}x}$	máxima frequência de interes (cutoff frequency)
β	Ângulo do talude.
λ	Fator de escala desconhecido
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	densidade de massa
λ	amortecimento
$(\gamma_{ave})_{max}$	Deformação cisalhante média máxima.
ϕ'	Resistência ao cisalhamento em termos de tensão efetiva
γ_{ave}	Deformação cisalhante média
α_i	Ângulo de BXC com a horizontal
β_n	valor zero da equação de frequência.
λ_n	fração de amortecimento crítico.
$\ddot{u}_b(t)$	tempo história da aceleração na base
α, β	coeficientes de Rayleigh
$[C]$	Matriz de amortecimento global.
$[C_{nodo}]$	Matriz diagonal para condições de amortecimento nodal
$[K^*]$	matriz de rigidez complexa
$[K]$	matriz de rigidez global.
$[M]$	Matriz de massa
$\{H(\omega)\}$	vetor de funções de transferência
$\{u\}$	vetor de deslocamentos nodais
a	Aceleração
A_1, A_2	forças hidrostáticas
A_a	Amplificação Aparente
AE	Análise dinâmica com modelo de resposta elástica.

a_{ffc}	máxima aceleração de campo livre detrás da cresta.
a_{fft}	máxima aceleração de campo livre no frente do pé do talude.
ALE	Análise dinâmica com modelo de resposta linear equivalente.
a_{max}	Aceleração máxima na base do talude (Hynes e Franklin)
a_{max}	aceleração pico
a_{max}	máxima aceleração na cresta.
a_p	aceleração pico (g)
A_s	Amplificação de Solo
A_t	Amplificação Topográfica
a_y	aceleração de escoamento
b_i	Largura de fatia
c	coesão
c, ϕ	Parâmetros de resistência
c', ϕ'	Parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas
c'	coesão efetiva
C_{face}	Amortecimento na face
C_o	Coesão no topo do talude
C_u	resistência ao cisalhamento não-drenada
D	força aplicada na superfície do talude
dFx, dFy	componentes de forças ortogonais de uma camada de solo
dh	espessura do solo.
E	Módulo de Young
E_1, E_2	Componente horizontal das forças entre as fatias
E_1, E_2	componente horizontal das forças entre as fatias
E_i, E_{i+1}	Forças normais entre fatias, atuando nas seções i e $i+1$
f	função adimensional

$F_{(t)amort.}$	Força Amortecida
f_n	frequência natural do perfil de solo detrás da cresta do talude.
FS	Fator de segurança
g	Aceleração da gravidade
G/G_{\max}	relação do Modulo Cisalhante
G_{\max}	módulo de cisalhamento máximo
H	Altura do talude
h_i	Altura de fatia
I_a	Aria intensity (m/s) (Medida de Intensidade Sísmica)
J_0, J_1	funções de Bessel de primeira classe de ordem zero e um.
K	Matriz de rigidez
k_{av}	Coefficiente Sísmico médio.
K_h	Coefficiente sísmico ou aceleração horizontal média
$K_h W$	Força de inércia
k_{\max}	máximo coeficiente sísmico médio
K_v	Aceleração vertical média
k_x, k_y	coeficientes sísmicos nas direções x,y respectivamente
K_y	coeficiente de escoamento
l	comprimento da base da fatia
l	comprimento da camada infinitesimal do solo
m	Número de estabilidade
M	função do ângulo de inclinação do talude (Majumdar)
M	massa total da cunha
$m(y)$	massa da fatia á uma profundidade y
MEF	Método dos elementos finitos.
N	Força normal à base da fatia

N'	Força normal efetiva
N_1, N_2	Números de estabilidade
N_{eq}	Nº de ciclos equivalente de um movimento uniforme na base
Q	Resultante das forças paralelas na fatia (Z_i)
R	Raio do arco circular
S	ângulo do talude
$S = T \ell$	Força tangencial à base da fatia
S_a	Resistência ao cisalhamento
S_m	Parcela mobilizada da resistência ao cisalhamento
S_{vn}	Velocidade espectral.
T	período (s)
T_1, T_2	componente vertical das forças entre as fatias
T_i	Força cisalhante atuando na base da fatia
u	Vetor deslocamento
u	Poropressão
\ddot{u}	Aceleração
\dot{u}	Velocidade
$U = u \cdot \ell$	Força decorrente da poropressão
$\ddot{u}_a(y)$	aceleração absoluta da fatia.
U_α	Força causada pela pressão da água nos poros
U_β	Força causada pela pressão da água na superfície
V_{max}	velocidade de onda de cisalhamento
$V_n(t)$	integral de Duhammel
V_s	Velocidade de onda secundária
W	Peso da massa do solo
W	Função de carga aplicada sobre uma superfície de deslizamento.

W_i	Peso da fatia de solo i
W_n	freqüência natural do n ésimo modo.
X_i	Forças verticais entre fatias
x_i	Distância horizontal do centro da fatia a ponto O
X_i, X_{i+1}	forças tangenciais entre fatias
Z	Profundidade
Z/H	relação profundidade do semi-espaco visco elástico.
α_R e β_R	Coefficientes de Rayleigh
β	ângulo de inclinação do talude
ϕ	ângulo de atrito
ϕ_d	ângulo de atrito mobilizado
ϕ_m	ângulo de atrito modificado (Majumdar)
γ	Peso específico do material do talude
γ	peso específico
ℓ	Comprimento da base da fatia
τ_f	Resistência ao cisalhamento
ζ	amortecimento