

Jorge Dueñas Ramírez

**Mecanismos de Ruptura Bloco – Flexural em Maciços
Rochosos: Caso do Talude Norte da Mina de Tintaya (Peru)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil: Geotecnia

Orientador: Eurípides Vargas Jr
Co – orientador: Rodrigo Figueiredo

Rio de Janeiro, agosto de 2006.



Jorge Dueñas Ramírez

**Mecanismos de Ruptura Bloco – Flexural em Maciços
Rochosos: Caso do Talude Norte da Mina de Tintaya (Peru)**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada:

Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr

Orientador e Presidente
Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Rodrigo Peluci de Figueiredo

Co - orientador
Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP

Prof. Emílio Velloso Barroso

Universidade Federal do Rio de Janeiro - IG/UFRJ

João Luiz Elias Campos

Tecgraf – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 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.

Jorge Dueñas Ramírez

Graduou-se em Geologia de Engenharia em 1999 pela Universidad Nacional de San Agustín (UNSA-Peru). Trabalhou na área de Hidrocarbonetos e Geotecnia tais como: PERUPETRO S.A., Sociedad Minera Cerro Verde SAA., Volcan Cia minera SAA, BHPBilliton Tintaya S.A., e Xstrata Copper Tintaya S.A., Ingressou em 2004 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 Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

<p>Ramírez, Jorge Dueñas</p> <p>Mecanismo de Ruptura por Tombamento Bloco - Flexural; Caso Talude Nor- Oeste – Mina Tintaya (Peru) / Jorge Dueñas Ramírez; Orientadores: Eurípedes do Amaral Vargas Jr. e Rodrigo Peluci de Figueiredo - Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Civil, 2006.</p> <p>v., 150 f.: il. ; 29,7 cm</p> <p>Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil.</p> <p>Inclui referências bibliográficas.</p> <p>1. Engenharia civil – Teses. 2. Tombamento bloco-flexural. 3. Maciço rochoso. 4. Descontinuidade. 5. Teoria de Cosserat. I. Vargas Jr, Eurípedes do Amaral. II. Figueiredo, Rodrigo Peluci de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.</p>

A Deus, por ter me dado saúde.
A meus queridos pais: Juan de Dios e Encarnación, por terem me dado educação.
A María Amparo e Lucía Alejandra, por me darem felicidade.
A meus Irmãos pelo apoio durante meus estudos do mestrado.

Agradecimentos

A Deus e a Nossa Senhora pelo dom da vida e cuja fé neles, me deu a força necessária para vencer com lucidez todos obstáculos que tive.

Aos Professores Eurípides Vargas Jr., Rodrigo Figueiredo e João Luiz, pela orientação e guia durante esta pesquisa.

Aos meus queridos pais, Juan de Dios e Encarnación, pelo grande incentivo, mas torcendo muito pelo meu sucesso na minha Universidade.

A María Amparo, Lucía Alejandra e Valeria Gabriela que são a primeira e única razão da minha existência.

A meus Irmãos: Nieves, Freddy, Jesús, Chela, Arístides e Amelia pelo apoio durante meus estudos do mestrado.

Aos meus professores, Eurípides Vargas Jr, Celso Romanel, Alberto Sayão, Sergio Fontoura, Franklin Antunes, Paulo Batista, Djenane Pamplona e Luciano Medeiros, pelos conhecimentos transmitidos, pela paciência que tiveram comigo e principalmente pelos inúmeros conselhos que me serão úteis por toda a vida.

Aos amigos, Ana Carolina, Ana Lúcia, Ana Vanessa, Álvaro, Christiano, Elisângela, Jackeline, Luis Alonso, Maria Bernardete, Roberth Apolinar, Taíse, Tania e Ygor, pelos bons momentos juntos durante o mestrado, aos amigos: Nelly Rubio e Álvaro Vianna pela revisão do presente tese. Além disso, gostaria agradecer a um gran amigo, Jhoan Paredes pelo apoio no Rio, durante o desenvolvimento da tese.

A secretária de pós-graduação Ana Roxo e Rita de Cássia pela grande ajuda e amizade nestes anos de mestrado;

Aos funcionários do departamento de Engenharia Civil, Fátima, Lenilson, Cristiano, pela dedicação e amizade que sempre tiveram comigo;

A BHP Billiton Tintaya S.A. e Xstrata Copper Tintaya S.A. pelo apoio e autorização em fazer o presente trabalho de investigação. Aos funcionários de Servicio Técnicos pelo apoio técnico e boa convivência na área Edgardo Orderique e Jorge Vargas.

Ao professor Pablo Meza da Universidad Nacional de San Agustín (UNSA – Perú) pelo apoio e incentivo em estudar Geotecnia.

Meus sinceros agradecimentos a todas aquelas pessoas não citadas, mas que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Ao povo do Brasil por ter me dado a oportunidade de estudar o mestrado.

Resumo

Ramírez, Jorge Dueñas; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Figueiredo, Rodrigo Peluci de. **Mecanismo de Ruptura por Tombamento Bloco - Flexural; Caso Talude Nor-Oeste – Mina Tintaya (Peru)**. Rio de Janeiro, 2006. 150 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese apresenta o fenômeno de ruptura por tombamento bloco-flexural, que acontece na zona NW da mina Tintaya. O objetivo do presente estudo é contribuir o conhecimento de este tipo de fenômeno de ruptura, quantificando as características do maciço rochoso com as técnicas da mecânica das rochas. O trabalho inicia-se por uma caracterização geral da zona de estudo, com especial relevo das propriedades geomecânicas das descontinuidades presentes, pelo que foram desenvolvidos mapeamentos das caras de bancada e a amostragem da rocha intacta, esta data permitiu estabelecer correlações dos parâmetros geomecânicos e fazer a análise cinemática da zona de estudo. Após de fazer a caracterização e avaliação das características das descontinuidades, foi definido o tombamento bloco-flexural, pelo jeito das descontinuidades presentes no maciço, já que este tipo de ruptura é mais complexo do que os outros tipos de tombamento, porque é uma combinação de tombamento e deslizamento dos blocos. Em vez da ruptura flexural de colunas contínuas, neste caso o tombamento é resultado de deslocamentos acumulados das juntas transversais. Com o objetivo de fazer uma análise numérica, obteve-se por um modelo contínuo-equivalente que inclui os efeitos de orientação e espaçamento das juntas é o modelo de plasticidade de Cosserat. O contínuo de Cosserat, conhecido também como contínuo micropolar acrescenta os graus de liberdade de rotação ao contínuo convencional. Pelo que foi analisado este tipo de ruptura através de uma modelagem computacional com um programa de elementos finitos feito na PUC-Rio, assim, tornar possível a modelagem computacional com a teoria do contínuo de Cosserat.

Palavras-chave

Tombamento bloco-flexural, maciço rochoso, descontinuidade, Teoria de Cosserat

Abstract

Ramírez, Jorge Dueñas; Vargas Jr., Eurípedes do Amaral; Figueiredo, Rodrigo Peluci de (Advisors). **Block-Flexure Toppling Mechanism; Case NW Slope Tintaya's Mine**. Rio de Janeiro, 2006. 150 p . MSc. Dissertation – Department of Civil Engineering, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents the block – flexural toppling failure phenomenon, which happens at NW zone of the Tintaya's mine. The objective of the present study is to contribute the knowledge of this type of phenomenon of failure, quantifying the characteristics of rock mass with the techniques of the rock mechanics. The work begins for a general characterization of the zone, with special relief of the geomechanical properties of the discontinuities, which were developed the window sampling (bench face mapping) and sampling of the intact rock, this information allowed to establish correlations of the geomechanical parameters and make feasible kinematics analysis from the zone of study. After doing the rock mass characterization and evaluation of the characteristics of the discontinuities, the block – flexural toppling failure was defined, on those long column rocks crossed by numerous huge subhorizontal joints. The block-flexural type failure is a complex phenomenon compared with other types of toppling failure, because it is a combination of pure toppling and sliding. With the intention of numerical analysis, I have been proposed analyzing this rupture for a continuum – equivalent model of Cosserat, that includes the orientation and the discontinuity's spacing. This model is known also as continuum micropolar, which adds the degrees of freedom of rotation to a conventional continuum. It was analyzed this type of failure through a computational modeling with a program of finite elements made in the PUC-Rio, so, the computational modeling possible with the theory of continuum of Cosserat.

Keywords

Block-flexure toppling, Rock mass, Discontinuity, Cosserat Theory

Sumário

1.	Introdução	15
1.1	Objetivos e Estratégia do trabalho de pesquisa	16
1.2	Relevância do Trabalho de Pesquisa	17
1.3	Organização de Dissertação	18
2.	Propriedades Geomecânicas do Maciço Rochoso	19
2.1	Introdução	19
2.2	Efeito Escala e Resistência	20
2.3	Resistência das Descontinuidades	23
2.4	Rigidez das Descontinuidades	27
2.5	Critério de ruptura generalizada de Hoek-Brown	30
3.	Análise dos Mecanismos de Ruptura de tombamento	36
3.1	Generalidades	36
3.2	Tombamento Flexural	38
3.3	Tombamento de Blocos	38
3.4	Tombamento bloco-flexural	39
3.5	Revisão de Literatura	40
3.6	Métodos de Análise	42
3.6.1	Modelos Físicos	42
3.6.2	Análise Cinemático	46
3.6.3	Análise de equilíbrio limite	45
4.	Modelagem Numérica	54
4.1	Introdução	54
4.2	A Mecânica Generalizada de Cosserat e o Modelo Elastoplástico para Meios Estratificados	56
4.2.1	A Mecânica Generalizaa de Cosserat	56
4.2.1.1	Cinemática	57
4.2.1.2	Estática	58
4.2.1.3	Equações Constitutivas	58
4.2.1.3.1	Elasticidade Linear Isotrópica	58
4.2.1.3.2	Elastoplasticidade	60
4.2.1.3.2.1	Modelo Elastoplástico para Meios Estratificados	60
5.	Instabilidade por Tombamento na mina Tintaya	64
5.1	Generalidades	64
5.2	Geologia da Mina Tintaya	66

5.3	Instabilidade zona NW de Tintaya	67
5.4	Estrutura do Maciço Rochoso	70
5.5	Análise de Equilíbrio Limite	72
5.6	Propriedades do Maciço Rochoso	76
5.7	Modelagem Numérica	79
5.7.1	Resultados Obtidos	82
6.	Conclusões e sugestões	85
6.1	Conclusões	85
6.2	Sugestões	86
	Bibliografia	87
	Anexo 1	92
	Anexo 2	95

Lista de Figuras

- Figura 1.1 Mapa de localização do distrito mineiro de Tintaya.
Figura 1.2 Mapa de localização dos pontos de monitoramento da zona 2 (NW) tajo Tintaya.
- Figura 2.1 Diagrama idealizado mostrando transição desde rocha intacta até o maciço rochoso fraturado com o incremento do tamanho de amostra.
- Figura 2.2 Relação entre a Geologia e as classes de resistência da rocha
Figura 2.3 Relação entre as tensões de cisalhamento e normal sob uma superfície de ruptura para cinco diferentes condições geológicas.
- Figura 2.4 Envoltoria de ruptura bilineal para superfícies múltiplas.
Figura 2.5 Variação de valores medidos de k_s com a escala e o nível das tensões normais.
- Figura 2.6 Razão K_n / K_s em função em função de σ_n .
Figura 2.7 Relações entre as tensões principais máxima e mínima para os critérios de Hoek-Brown e equivalente de Mohr-Coulomb.
- Figura 3.1 Tipos de ruptura por tombamento.
Figura 3.2 Mecanismo de ruptura e tombamento secundário.
Figura 3.3 Mecanismo de ruptura por tombamento flexural.
Figura 3.4 Modelo esquemático da base friction mostrando a barreira, o modelo simulado e a correia de lixa.
- Figura 3.5 Análise cinemática para a ruptura pelo tombamento.
Figura 3.6 Condições de estabilidade em função da geometria dum bloco paralelepípedo sob ação do peso próprio.
- Figura 3.7 Princípios do equilíbrio limite para a análise de tombamento.
Figura 3.8 Modelo para análise de equilíbrio-limite do tombamento flexural.
- Figura 4.1 Ponto material em um contínuo de Cosserat 2D (a) e representação de γ_{12} (b).
Figura 4.2 Equilíbrio de forças (a) e momentos (b) em um elemento infinitesimal num meio de Cosserat.
- Figura 4.3 Parcelas simétrica e anti-simétrica do tensor de tensões-força de Cosserat (a) e representação gráfica de Mohr (b).
Figura 4.4 Geometria de um meio estratificado e tensões de Cosserat atuantes.
- Figura 5.1 Zonificação Geomecânica da Mina Tintaya (Departamento Geotecnia, 2005).
Figura 5.2 Litotipos predominantes na Mina Tintaya (Departamento Geologia, 2005).
Figura 5.3 Mapa geológico da mina Tintaya.
Figura 5.4 Desenvolvimento de trincas na zona NW do talude mina Tintaya; (a) trinca desenvolvida na cota 3925, pode-se observar a direção do movimento das juntas desenvolvidas, (b) sistema de trincas desenvolvidas em material de rejeito e solo natural, na cota 4105.
- Figura 5.5 Deslocamentos obtidos pelo programa de monitoramento, valor máximo dos deslocamentos verticais 4.5m e valor médio dos deslocamentos verticais relativos: 2.5m
Figura 5.6 Análise cinemática da zona 2, referentes às descontinuidades presentes no maciço rochoso.
Figura 5.7 Análise cinemática da zona 2, referentes às descontinuidades da zona.

- Figura 5.8 Tombamento bloco-flexural definido na zona 2 nível 4030
- Figura 5.9 Tombamento bloco-flexural no nível 3955, pode-se observar os deslocamentos das juntas transversais.
- Figura 5.10 Tombamento bloco-flexural no nível 3910.
- Figura 5.11 Comportamento pós-pico típico em função do GSI do maciço rochoso (Hoek & Brown, 1997): (a) $GSI \geq 75$, elasto-frágil perfeito; (b) $75 < GSI \leq 30$, elasto-plástico com amolecimento e (c) $GSI < 30$, elasto-plástico perfeito.
- Figura 5.12 Modelo adotado da Mina Tintaya.
- Figura 5.13 Malha de elementos finitos para o modelo da Mina Tintaya.
- Figura 5.14 Campo de deslocamentos mostrando o possível mecanismo de ruptura por tombamento do talude.
- Figura 5.15 Características típicas do padrão de deslocamentos em análises de tombamento flexural.

Lista de Símbolos

μ	Coeficiente de fricção
σ_n	Tensão normal aplicado
τ	Resistência ao cisalhamento das juntas
ϕ_b	Ângulo de fricção básico
i	Ângulo de inclinação da rugosidade (Patton)
c_j	Coesão aparente da junta
ϕ_r	Ângulo de fricção residual
JRC	Coeficiente de rugosidade de junta
JCS	Resistência à compressão da rocha na superfície de fratura
σ'	Tensão normal efetiva
ϕ_p	Ângulo de fricção pico
Kn	Rigidez normal da junta
Ks	Rigidez transversal da junta
τ_p	Tensão de cisalhamento pico
d_{hp}	Deslocamento das juntas
L	Escala da junta (limitada pelo espaçamento de outras juntas transversais)
σ_1	Tensão principal efetiva máxima ou maior
σ_2	Tensão principal efetiva intermediária
σ_3	Tensão principal efetiva mínima ou menor
σ_1	Tensão principal máxima ou maior
σ_2	Tensão principal intermediária
σ_3	Tensão principal mínima ou menor
σ_x	Tensão aplicada na direção X
σ_y	Tensão aplicada na direção Y
σ_z	Tensão aplicada na direção Z
σ_m	Tensão efetiva média
E	Módulo de Young
m_b	Valor reduzido da constante do material m_i ou constante do maciço rochoso
s, a	Constantes para o maciço rochoso
GSI	Índice de resistência geológica
RMR	Rock Mass Rating
D	Fator de perturbação

σ_{cm}	Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso
α :	Ângulo de inclinação
α_d :	Direção de mergulho da descontinuidade
β :	Mergulho da descontinuidade
C :	Coesão
δ :	Deslocamento por cisalhamento
Dip :	Mergulho
Dipdir :	Direção de Mergulho
γ :	Unidade de peso de rocha
H :	Altura do talude
i :	Ângulo efetivo de rugosidade
ISRM :	International Society of Rock Mechanics
Ja :	Índice de alteração de paredes do Sistema – Q
Jr :	Índice de rugosidade do Sistema – Q
JRC :	Coeficiente de rugosidade de Juntas
KN :	Quilonewton
kPa :	Quilopascal
L :	Comprimento
m^3 :	Metro cúbico
MPa :	Megapascal
ψ_i :	Ângulo de mergulho da linha de intersecção de 2 descontinuidades
di:	dilatância.
c:	coesão da rocha (KPa).
σ_t :	resistência à tração da rocha (KPa).
Φ_j :	ângulo de atrito da junta ubíqua.
dij:	dilatância da junta ubíqua.
cj:	coesão da junta ubíqua (KPa).
tj:	resistência à tração da junta ubíqua (KPa).
ja:	mergulho da junta ubíqua.
E:	módulo de elasticidade da rocha intacta (GPa).
Em:	módulo de elasticidade da rocha intacta (GPa).
ν :	Coeficiente de Poisson.
t:	Espessura de bloco
h:	Altura de bloco
FS:	Factor de segurança

$(x_1, x_2), x_i$ ($i = 1, 2$) Coordenadas de um ponto material em um contínuo de Cosserat 2D.

γ_{ij} e k_i : Deformação em um contínuo de Cosserat.

e_{ij} : Tensor alternante a 2D

$\partial_i(\cdot)$: Gradiente na i -ésima direção espacial

F_i : Forças e o momento de massa

Θ : Momento de massa.

λ e G : Parâmetros clássicos de Lamé.

G_c : Módulo de cisalhamento anti-simétrico.

B : Módulo de flexão.

\hat{c} : Coesão-momento (força/comprimento) de Cosserat.

λ_s, λ_t e λ Multiplicadores plásticos relativos.

f_s Função de escoamento.

g_s Função potencial plástico.