



Deysi Milagritos Garcia Aguilar

**Análise numérica de taludes de
mineração a céu aberto em maciço de
rocha fraturada**

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
Agosto de 2015



Deysi Milagritos Garcia Aguilar

**Análise numérica de taludes de
mineração a céu aberto em maciço de
rocha fraturada**

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. Pedricto Rocha Filho

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Profa. Ana Cristina Castro Fontenla Seira

Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Nelson Inoue

GTEP/ PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 07 de Agosto de 2015.

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

Deysi Milagritos Garcia Aguilar

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidad Nacional de Ingeniería – UNI (Lima, Peru) em 2010. Ingressou no mestrado em Engenharia Civil na área de Geotecnia, da PUC-Rio em março de 2013, desenvolvendo dissertação na linha de pesquisa de Geomecânica Computacional.

Ficha Catalográfica

Garcia Aguilar, Deysi Milagritos

Análise numérica de taludes de mineração a céu aberto em maciço de rocha fraturada / Deysi Milagritos Garcia Aguilar; orientador: Celso Romanel - 2015.

131 f.: il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2015.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Civil – Teses. 2. Taludes de grande altura. 3. Estabilidade de taludes. 4. Mineração a céu aberto. 5. Equilíbrio limite. 6. Método dos elementos finitos. I Romanel, Celso. II Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III Título.

CCD 624

A Deus e aos meus pais

Agradecimentos

A Deus, porque que me acompanhou sempre na minha vida e principalmente neste caminho. Foi uma boa experiência, da qual não só me permite levar conhecimentos de geotecnia, levo também uma experiência de vida que me fez crescer e ser mais forte.

Aos meus pais, Maria Leonor e Francisco, ainda estando longe, eles foram minha motivação desde o início do meu caminho no mestrado.

Ao professor Celso Romanel, pela orientação, apoio, paciência e conhecimentos transmitidos.

A mi Yuma linda que sempre envio e-mails e estive presente mesmo estando muito longe.

A Nanda minha sobrinha pequenininha por seu carinho e motivação durante todo o tempo.

A Carlos Javier pela paciência e apoio incondicional nos momentos mais difíceis.

A meus irmãos e família em geral que sempre estiveram pertos a traves de seu carinho e motivação.

Aos meus amigos peruanos e colegas da PUC-Rio que compartilharam comigo todo este tempo e se converteram em minha família aqui no Brasil, não vou mencionar nomes para não esquecer de ninguém.

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

A CAPES pelo apoio financeiro concedido.

Ao Brasil e suas pessoas maravilhosas, obrigada pela oportunidade...

Resumo

Garcia Aguilar, Deysi Milagritos; Romanel, Celso (orientador) **Análise numérica de taludes de mineração a céu aberto em maciço de rocha fraturada.** Rio de Janeiro, 2015. 131 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta dissertação tem como objetivo principal estudar o comportamento dos taludes da mineração Pampa de Pongo, situada no Peru, em termos de deslocamentos e fatores de segurança contra ruptura por cisalhamento. As escavações atingem atualmente profundidades superiores a 900m com o corpo mineral seccionado por várias falhas geológicas que podem aumentar o potencial de risco de colapso dos taludes. As análises tensão x deformação foram executadas pelo método dos elementos finitos, em modelos bi e tridimensionais, considerando a existência e a ausência do sistema de falhas para melhor estimar e compreender a influência destas nos deslocamentos do maciço com o avanço das escavações. Este estudo também investigou as diferenças observadas nos resultados obtidos com dois programas comerciais de elementos finitos para solução de problemas geotécnicos (Phase2 e Plaxis 2D) tendo em vista as diferentes metodologias por eles empregadas na simulação de fraturas em meios contínuos. Nas análises de estabilidade os valores dos fatores de segurança determinados pelo método dos elementos finitos, em simulações 2D e 3D, foram também comparados com aqueles calculados por método de equilíbrio limite (método das fatias). De modo geral, observou-se que os efeitos das discontinuidades são maiores nos campos de deslocamentos horizontais e que também tendem a diminuir os valores de fator de segurança, inclusive para limites mínimos abaixo dos recomendados por normas brasileiras.

Palavras – chave

Taludes de grande altura; estabilidade de taludes; mineração a céu aberto; equilíbrio limite; análise de elementos finitos.

Abstract

Garcia Aguilar, Deysi Milagritos; Romanel, Celso (advisor). **Numerical slope analysis of an open pit mine in jointed rock mass.** Rio de Janeiro, 2015. 131p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis aims to study the behavior of the Pampa de Pongo open pit mine, situated in Peru, in terms of displacements and safety factors against shear failure. Excavations currently reach depths greater than 900m and the orebody is sectioned by several geological faults that may increase the potential risk of collapse of embankments. The stress x strain analyses were carried out by the finite element method, with two and three dimensional models, considering the existence and the absence of the fault system, to better estimate and understand the influence of these discontinuities in the displacements of the rock mass with the advancement of excavations. This study also investigated the differences in results obtained with two commercial finite element programs for solution of geotechnical problems (Phase2 and Plaxis 2D) since they use different techniques to simulate fractures in continuous media. In the stability analyses, the values of safety factors determined by the finite element method in 2D and 3D simulations were also compared with those calculated by the equilibrium method limit (method of slices). In general, it could be observed that the effects of discontinuities are larger on the horizontal displacement fields and they also tend to decrease the values of safety factors, even below the minimum thresholds recommended by Brazilian Standards.

Keywords

Slopes of large height; slope stability; open pit mine; limit equilibrium; finite element analysis.

Sumário

1	Introdução	17
1.1.	Relevância e justificativa da pesquisa	17
1.2.	Objetivos da pesquisa	19
1.3.	Organização da dissertação	20
2	Comportamento de Taludes em Maciços Rochosos	21
2.1.	Introdução	21
2.2	Estado de tensão in situ	21
2.3.	Descontinuidades em taludes rochosos	26
2.3.1.	Tipos de Descontinuidades	26
2.3.1.	Falhas preenchidas	28
2.3.3.	Rigidez normal e rigidez cisalhante em descontinuidades	29
2.4	Critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown	31
2.4.1	Critério de ruptura Mohr-Coulomb	33
2.4.2	Módulo de elasticidade	35
2.5.	Tipos e Mecanismos de Ruptura em Taludes Fraturados	35
2.5.1.	Rupturas planares	36
2.5.2.	Rupturas rotacionais	37
2.5.3.	Deslizamento e tombamento de blocos	38
2.6.	Métodos de análise de estabilidade de taludes	39
2.6.1.	Método de equilíbrio limite	39
2.6.2.	Método dos elementos finitos	42
3	Características do projeto de mineração Pampa de Pongo no Peru	44
3.1.	Introdução	44
3.2.	Propriedades geotécnicas do maciço rochoso	45
3.2.	Propriedades geotécnicas das descontinuidades	51
3.2.1	Resistência ao cisalhamento	51
3.3.2	Parâmetros de rigidez	53
4	Deslocamentos gerados pela escavação	57
4.1.	Introdução	57
4.2.	Seções analisadas e características dos taludes	57
4.3.	Modelagem 2D	58

4.3.1. Geometria da malha e condições de contorno	58
4.3.2. Distribuição de campos de tensões	61
4.3.3. Distribuição de campos de deslocamentos	62
4.3.4. Distribuição de perfis de deslocamentos	67
4.4. Modelagem 3D	88
4.4.1. Geometria da malha e condições de contorno	88
4.4.2. Distribuição de perfis de deslocamentos	90
5 Análises de estabilidade	104
5.1. Introdução	104
5.2. Método de equilíbrio limite: resistência ao cisalhamento direcional	105
5.3. Fatores de segurança	111
6 Conclusões e sugestões	121
Referências Bibliográficas	125
Anexo A: Geological strength index (GSI)	131

Lista de Figuras

Figura 1.1 Geometria típica de um talude de mineração a céu aberto.	18
Figura 2.1 Estado de tensão In situ devido à gravidade em um maciço rochoso homogêneo, isotrópico e com a superfície horizontal (Wittke, 2014).	23
Figura 2.2 Mapa de tensões da região do projeto Jinzao Minning segundo o World Stress Map (Heidbach et al., 2008).	24
Figura 2.3 Representação bidimensional da redistribuição da componente de tensão horizontal em uma escavação a céu aberto (Sjöberg, 1999).	25
Figura 2.4 Tipos de falha; a) falha normal, b) falha transversal c) falha reversa.	27
Figura 2.5 Descrição de descontinuidade fechada, aberta e com material de preenchimento.	28
Figura 2.6 Variação da resistência ao cisalhamento com o incremento da porcentagem de preenchimento da falha (Goodman, 1970).	29
Figura 2.7 Razão k_n/k_s em função de σ_n (Bandis et al., 1983).	31
Figura 2.8 Relações entre as tensões principais máxima e mínima nos critérios de Hoek-Brown e de Mohr-Coulomb (Hoek et al., 2002).	34
Figura 2.9 Combinação de descontinuidades formando rupturas planares.	36
Figura 2.10 Ruptura rotacional e combinada com rupturas planas.	37
Figura 2.11 Deslizamento e tombamento de blocos (Sjöberg, 1999).	38
Figura 2.12 Forças atuantes sobre uma fatia individual no método das fatias.	41
Figura 3.1 Mapa de localização geográfica do projeto Pampa de Pongo, Peru.	44
Figura 3.2 Localização das falhas na região do projeto.	46
Figura 3.3 Unidades litológicas observadas na última fase de escavação da mina a céu aberto.	47
Figura 4.1 Seções selecionadas para análise do comportamento de taludes na mineração Pampa de Pongo, Peru.	58
Figura 4.2 Detalhes geométricos do avanço das fases de escavação.	59
Figura 4.3 Seção analisada 1-1 (Plaxis 2D) na última fase de escavação.	59
Figura 4.4 Seção analisada 1-1 (Plaxis 3D) na última fase de escavação.	60
Figura 4.5 Geometria da malha 2D de elementos finitos.	60

Figura 4.6 Tensões efetivas σ_{xx} na seção 1-1, na etapa inicial sem escavação, sem presença de descontinuidades.	61
Figura 4.7 Tensões efetivas σ_{xx} na seção 1-1, fase final de escavação, sem presença de descontinuidades.	62
Figura 4.8 Deslocamentos horizontais na seção 4-4, etapa de escavação 20, sem presença de descontinuidades.	63
Figura 4.9 Deslocamentos horizontais na seção 4-4, etapa de escavação 20, considerando a presença de descontinuidades a) Phase2, b) Plaxis 2D, c) Plaxis 3D.	64
Figura 4.10 Deslocamentos verticais na seção 4-4, etapa de escavação 26, sem a presença de descontinuidades a) Phase2, b) Plaxis 2D, c) Plaxis 3D.	65
Figura 4.11 Deslocamentos verticais na seção 4-4, etapa de escavação 26, considerando a presença de descontinuidades a) Phase2, b) Plaxis 2D, c) Plaxis 3D.	66
Figura 4.12 Malha de elementos finitos elementos finitos seção 1-1. a) Plaxis 2D, b) Phase2.	68
Figura 4.13 Perfis a-a, b-b e c-c na seção transversal 1-1.	69
Figura 4.14 Perfis a-a, b-b e c-c na seção transversal 2-2.	70
Figura 4.15 Perfis a-a, b-b e c-c na seção transversal 3-3.	71
Figura 4.16 Perfis a-a e b-b na seção transversal 4-4.	72
Figura 4.17 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 20.	73
Figura 4.18 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 24.	74
Figura 4.19 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 1-1 na fase 20.	75
Figura 4.20 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 1-1 na fase 24.	76
Figura 4.21 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil c-c da seção 1-1 na fase 24.	77
Figura 4.22 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2: na fase 20.	79
Figura 4.23 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2: na fase 25.	80
Figura 4.24 Deslocamentos horizontais ao longo do perfil b-b e c-c da seção 2-2 nas fases 5 e 10.	81

Figura 4.25 Deslocamentos horizontais ao longo do perfil b-b e c-c da seção 2-2 nas fases 15 e 25.	82
Figura 4.26 Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil b-b da seção 3-3: Fase 20. Plaxis 2D vs Phase2.	83
Figura 4.27 Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil c-c da seção 3-3 na fase 25.	84
Figura 4.28 Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil a-a da seção 4-4: na fase 26.	85
Figura 4.29 Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil b-b da seção 4-4 na fase 20.	86
Figura 4.30 Deslocamentos verticais e horizontais ao longo do perfil b-b da seção 4-4 na fase 26.	87
Figura 4.31 Geometria da malha de elementos finitos 3D e condições de contorno.	88
Figura 4.32 Malha de elementos finitos utilizada no programa Plaxis 3D, seção 4-4. a) sem descontinuidade, b) com descontinuidades.	89
Figura 4.33 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 20.	92
Figura 4.34 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 1-1 na fase 24.	94
Figura 4.36 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil c-c da seção 1-1 na fase 24.	95
Figura 4.37 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2 na fase 20.	96
Figura 4.38 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 2-2 na fase 25.	97
Figura 4.39 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil a-a da seção 4-4 na fase 26.	98
Figura 4.40 Deslocamentos horizontais e verticais ao longo do perfil b-b da seção 4-4 na fase 26.	99
Figura 4.41 Influência das descontinuidades na distribuição dos deslocamentos horizontais na fase 20 do perfil a-a da seção 1-1 determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.	100
Figura 4.42 Influência das descontinuidades na distribuição dos deslocamentos verticais e horizontais na fase 24 do perfil b-b da seção 1-1 determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.	101

Figura 4.43 Influência no incremento das fases de escavação nos deslocamentos verticais e horizontais do perfil b-b da seção 1-1 sem descontinuidades, determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.	102
Figura 4.44 Influência no incremento das fases de escavação nos deslocamentos verticais e horizontais do perfil b-b da seção 1-1 com descontinuidades, determinados pelos programas computacionais Phase2 e Plaxis 2D.	103
Figura 5.1 Efeitos de descontinuidades paralelas ao talude na resistência ao cisalhamento do maciço rochoso - a magnitude da resistência direcional para uma orientação θ é proporcional à distância radial da origem até a curva vermelha.	106
Figura 5.2 Descontinuidades persistentes e não persistentes, as últimas com plano de fraqueza interrompido por pontes de rocha (adaptado de Wittke, 1990).	107
Figura 5.3 Definição do ângulo de mergulho provável e da zona de descontinuidade equivalente (adaptado de Read & Stacey, 2009).	108
Figura 5.4 Definição de uma zona de transição (adaptado de Read & Stacey, 2009).	109
Figura 5.5 Definição da resistência direcional de um maciço rochoso que contém dois conjuntos de descontinuidades. As descontinuidades do conjunto 1 são não persistentes e incluem pontes de rochas (maior resistência) enquanto que as descontinuidades do conjunto 2 são persistentes e apresentam uma zona de alteração (adaptado de Read & Stacey, 2009).	109
Figura 5.6 Superfície aproximada de ruptura sem presença de descontinuidades a) Slide, b) Phase2, c) Plaxis 2D e d) Plaxis 3D.	113
Figura 5.7 Superfície aproximada de ruptura com presença de descontinuidades a) Slide, b) Phase2, c) Plaxis 2D e d) Plaxis 3D.	114
Figura 5.8 Variação dos fatores de segurança com a profundidade nas seções 1-1 (topo) e 2-2 (base).	115
Figura 5.9 Variação dos fatores de segurança com a profundidade nas seções 3-3 (topo) e 4-4 (base).	116
Figura 5.10 Influência das descontinuidades no fator de segurança da seção 1-1.	117

Figura 5.11 Influência das descontinuidades no fator de segurança da seção 2-2.	118
Figura 5.12 Influência das descontinuidades no fator de segurança da seção 3-3.	119
Figura 5.13 Influência das descontinuidades no fator de segurança da seção 3-3	120

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Classificação de abertura em descontinuidades (ISRM, 1981).	28
Tabela 2.2 Equações e incógnitas no método das fatias.	40
Tabela 2.3 Condições de equilíbrio estático satisfeitas pelos métodos de equilíbrio limite. (Abramson et al, 2002).	41
Tabela 3.1 Critério de classificação do maciço rochoso segundo (Buenaventura Ingenieros Bisa, 2012).	46
Tabela 3.2 Parâmetros do maciço rochoso (Buenaventura Ingenieros S.A, 2011).	47
Tabela 3.3 Módulos de elasticidade do maciço rochoso pelo critério de Hoek-Brown.	48
Tabela 3.4 Parâmetros de resistência do maciço rochoso empregados nas análises.	49
Tabela 3.5 Ângulos de atrito para areias, argilas e siltes (Terzaghi e Peck 1967).	51
Tabela 3.6 Valores de resistência ao cisalhamento para descontinuidades com preenchimento. Modificado Hoek & Bray (1974).	52
Tabela 3.7 Rigidez normal empregado no programa Phase2.	53
Tabela 3.8 Rigidez cisalhante empregado no programa Phase2.	53
Tabela 3.9 Parâmetros do modulo de cisalhamento das descontinuidades empregadas para as análises 2D para as seções 1-1 e 2-2.	55
Tabela 3.10 Parâmetros do modulo de cisalhamento das descontinuidades empregadas para as análises 2D para as seções 3-3 e 4-4.	55
Tabela 3.11 Parâmetros do modulo de cisalhamento das descontinuidades empregadas para as análises 3D para as seções 1-1 e 2-2.	56
Tabela 3.12 Parâmetros do modulo de cisalhamento das descontinuidades empregadas para as análises 3D para as seções 3-3 e 4-4.	56
Tabela 4.1 Quantidade de elementos que foram empregados neste análise.	61
Tabela 5.1 Fatores de segurança mínimos para estabilidade de taludes (ABNT NBR 11682/91).	103
Tabela 5.2 Propriedades de Resistência Direcionar ao Cisalhamento da seção 1-1.	108
Tabela 5.3 Fatores de segurança ao longo da profundidade de escavação da seção 1-1.	110

Lista de Símbolos

σ_z	Tensão vertical a uma profundidade z
Z	Profundidade
K	Coefficiente de empuxo no repouso
σ_h	Tensão horizontal
σ_1	Tensão normal principal maior
σ_3	Tensão normal principal menor
E	Módulo de deformabilidade
ε	Deformação
E_{oed}	Módulo de compressão confinada triaxial
ϕ'	Angulo de atrito interno da rocha
c'	Coesão
G	Módulo cisalhante
G_i	Módulo cisalhante associado para cada interface
G	Aceleração da gravidade
γ	Peso específico
k_n	Rigidez normal
k_s	Rigidez de cisalhamento
t	Espessura equivalente da falha
t_i	Espessura virtual associada as interfaces no programa Plaxis 2D e Plaxis 3D
GSI	Índice de resistência geológica
m_i	Constante do material da rocha intacta, no critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown
s e a	Constantes para o maciço rochoso, no critério de ruptura generalizado de Hoek-Brown
σ_{ci}	Resistência à compressão simples da rocha intacta
D	Fator de perturbação
ν	Coefficiente de Poisson