



Carlos Enrique Paredes Otoyá

**Modelagem Geológica e Estrutural 3D e Análise de Estabilidade de
Taludes 2D em Mina a Céu Aberto Pelo Método SRM (*Synthetic Rock
Mass*)**

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.

Orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Rio de Janeiro, Junho de 2011



Carlos Enrique Paredes Otoyá

**Modelagem Geológica e Estrutural 3D e Análise de Estabilidade de
Taludes 2D em Mina a Céu Aberto Pelo Método SRM (*Synthetic Rock
Mass*)**

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.

Prof. Sérgio Augusto Barreto da Fontoura

Orientador

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

Prof. Eurípides Vargas Jr.

Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

Prof. Fernando Saboya Albuquerque Jr

Universidade Estadual do Norte Fluminense

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC - Rio

Rio de Janeiro, 15 de Junho de 2011

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

Carlos Enrique Paredes Otoyá

Graduou-se em Engenharia Civil pela Universidade Nacional de Engenharia (Lima, Peru – 2006). Trabalhou na área de Geomecânica em projetos de desenho de minas a céu aberto. No ano 2009 ingressou ao curso de Mestrado em Engenharia Civil na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, na área de Geotecnia, desenvolvendo dissertação de mestrado na linha de pesquisa Mecânica das Rochas.

Ficha Catalográfica

Paredes Otoyá, Carlos Enrique

Modelagem geológica e estrutural 3D e análise de estabilidade de taludes 2D em mina a céu aberto pelo método SRM (*Synthetic rock mass*) / Carlos Enrique Paredes Otoyá ; orientador: Sérgio Augusto Barreto da Fontoura. – 2011.

147 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Bonded

CDD: 624

A minha querida família, esposa e o meu filho ou a minha filha que vem em caminho,

Agradecimentos

A Deus, que é para mim a luz que guia a minha vida.

Ao meu primeiro círculo de felicidade: meus pais, meus irmãos, minhas irmãs, a minha linda esposa Fiorela e o filho ou filha que vem em caminho. Todos eles são minha fonte de amor e felicidade.

Gostaria expressar meu sincero agradecimento ao meu orientador principal, o professor Dr. Sérgio Fontoura, por seu interesse em dar-nos as ferramentas e condições necessárias para desenvolver uma boa dissertação assim como o agradecimento pela sua orientação e apoio.

Estou profundamente agradecido com o Dr. Diego Mas Ivars por seus valiosos conselhos e sugestões durante as etapas do desenvolvimento do modelo *Synthetic Rock Mass* (SRM).

Também quero agradecer ao meu colega Luis Mejía pelos conselhos e sugestões devido a sua experiência na modelagem com elementos discretos.

A cada um dos professores do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio pelos seus conhecimentos e as boas aulas impartidas.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro e ao GTEP pela infra-estrutura e suporte.

A cada uma das pessoas que de uma ou outra forma contribuíram a que a minha estância no Brasil seja mais feliz e me deram seu apoio e amizade ao longo destes dois anos. Seria injusto mencionar alguns nomes, cada um deles sabe o meu grande carinho e gratidão. Há lembranças que sempre levarei comigo e pessoas que nunca vou esquecer.

Ao Brasil e sua gente, um país maravilhoso que vou levar sempre no meu coração.

Resumo

Otoya, Carlos Paredes; Fontoura, Sergio Augusto Barreto da (Orientador) **Modelagem Geológica e Estrutural 3D e Análise de Estabilidade de Taludes 2D em Mina a Céu Aberto Pelo Método SRM (Synthetic Rock Mass)**. Rio de Janeiro, 2011. 146p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em uma mina a céu aberto, a estabilidade dos taludes rochosos é um dos maiores desafios na engenharia das rochas devido aos processos geodinâmicos que formaram o depósito de minério, fazendo de cada depósito complexo e único. Algumas das complexidades encontradas comumente são: a geologia nos arredores do depósito, a alta variabilidade das propriedades, os complexos defeitos estruturais, o grau de alteração das rochas, a informação geomecânica limitada, etc. Antes de avaliar a estabilidade de taludes devemos caracterizar o maciço rochoso. Para caracterizá-lo se têm construído os modelos geológico, estrutural e do maciço rochoso para formar o modelo geotécnico como recomenda o projeto *Large Open Pit* (LOP), um projeto de pesquisa internacional relacionado à estabilidade de taludes de rocha nas minas a céu aberto. Uma vez construídos os domínios geotécnicos, a estabilidade de taludes rochosos pode ser avaliada para cada domínio pelos métodos de equilíbrio limite ou numéricos como o método dos elementos finitos ou o método dos elementos discretos. O uso do método depende de diversos fatores, como a influência dos elementos estruturais, a importância da análise, a informação disponível, etc. Os métodos de equilíbrio limite como os tradicionais de Bishop e Janbu podem ser usados na avaliação de estabilidade de grandes taludes de rocha que são susceptíveis a falhas rotacionais do maciço rochoso. Já o método de elementos finitos se tem desenvolvido rapidamente e tem ganhado popularidade para a análise de estabilidade de taludes no caso em que o mecanismo de falha não esteja controlado por estruturas discretas geológicas. Os métodos de elementos finitos estão baseados em modelos constitutivos de tensão – deformação para rochas intactas e têm dificuldades em simular famílias com um número grande de descontinuidades dentro do maciço rochoso. O método dos elementos discretos permite simular um número grande de descontinuidades assim como também

permite a simulação de grandes deformações. A presente dissertação usa o modelo SRM (*Synthetic Rock Mass*) para avaliar a estabilidade de taludes de uma mina a céu aberto no Peru. O SRM é uma nova técnica para simular o comportamento mecânico de maciços rochosos fraturados e permite simular a propagação de fraturas e os efeitos da anisotropia. Esta técnica usa o modelo BPM (*Bonded Particle Model*) para representar a rocha intacta e o SJM (*Smooth – Joint Contact Model*) para representar as estruturas do maciço rochoso dentro do programa PFC. Para a modelagem estrutural se utilizou o método DFN (*Discrete Fracture Network*). Para a determinação dos modelos geológicos e estrutural se utilizou o programa Petrel e para a análise de estabilidade de taludes usando o modelo SRM se utilizou o programa PFC 4.0 na versão 2D.

Palavras-chave

Bonded particle model; Smooth-joint contact model; Discrete fracture network; Synthetic rock mass.

Abstract

Otoya, Carlos Paredes; Fontoura, Sérgio Augusto Barreto da (Orientador).
3D Geological and Structural Geology Modeling and 2D Open Pit Mine Slope Stability Analysis by the Synthetic Rock Mass (SRM) Method.
Rio de Janeiro, 2010. 146p. MsC Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In an open pit mine, stability of rock slope is one of the most challenges in rock mechanics due to geodynamic processes that formed the ore deposit, making each deposit complex and unique. Some of the complexities commonly encountered are: the geology in the vicinity of the deposit, the high variability of properties, the complex structural defects, the rock alteration degree, limited geomechanical data, etc. Before evaluating the slope stability we should characterize the rock mass. To characterize it we have built the geological model, structural model and rock mass model to form the geotechnical model as it recommends the Large Open Pit project (LOP), an international research project related to stability of rock slope in open pit mines. Once constructed geotechnical domains, the stability of rock mass slope can be evaluated for each domain by using some known methods like limit equilibrium, the finite elements and discrete element methods. The use of the method depends of different factors like influence of structural elements (defects), importance of analysis, available information, etc. Limit equilibrium traditional methods like Bishop and Janbu can be used to evaluate the stability of large rock slopes that are susceptible to rotational failure of rock mass. Since the finite element method has developed rapidly and has gained popularity for the slope stability analysis in the case where failure mechanism is not controlled by discrete geological structure. Finite element method is based on constitutive models of stress-strain for intact rocks and has difficulties in simulating sets with a large number of discontinuities within the rock mass. The discrete element method allows to simulate a large number of discontinuities and also allows the simulation of large deformations. This dissertation uses the SRM (Synthetic Rock Mass) model to evaluate the stability of slopes in an open pit mine in Peru. The SRM model is a new technique that allows the simulation of the mechanical behavior of fractured rock mass taking into account propagation of fractures and anisotropic effects. This technique uses two well established techniques like BPM (Bonded Particle Model) for representation of intact rock and the SJM (Smooth-Joint Contact Model) to

represent the structural fabric within the PFC program. For structural modeling it was used DFN method (Discrete-Fracture Network). To determine the geological and structural model it was used the Petrel program (Version 2010.1) and for slope stability analysis with the SRM model it was used the version 2D of the PFC 4.0 program.

Keywords

Bonded particle model; Smooth-joint contact model; Discrete fracture network; Synthetic rock mass.

Sumário

1 Introdução	20
1.1. Definição do problema	20
1.2. Objetivo do trabalho	22
1.3. Estrutura da pesquisa	23
2 Revisão da Literatura	26
3 Modelo Geológico	33
3.1. Geologia Regional	34
3.2. Geologia Local	35
3.3. Dados de entrada para a modelagem	36
3.3.1. Topografia e cava econômica final	37
3.3.2. Mapeamento geológico-estrutural	39
3.3.3. Perfis de sondagem	40
3.3.4. Ensaios de laboratório	42
3.4. Modelagem geológica	46
4 Modelo Estrutural	52
4.1. Modelagem de falhas de grande escala (Determinístico)	54
4.2. Modelagem de descontinuidades de menor escala (DFN – Modelo estocástico)	58
4.2.1. Definição de Domínios Estruturais	59
4.2.2. Preparação e importação de dados no Petrel	63
4.2.3. Criação da grelha geométrica 3D	68
4.2.4. Modelagem de propriedades	72
4.2.4.1. <i>Criação de registros (logs) das fraturas</i>	74
4.2.4.2. <i>Upscaling</i> da intensidade das fraturas	76
4.2.4.3. <i>Análise geoestatística e modelagem 3D da intensidade das fraturas</i>	77
4.2.5. Criação da rede de fraturas	84
4.2.5.1. Distribuição	84
4.2.5.2. Geometria das fraturas	84
4.2.5.3. Comprimento da fratura	85

4.2.5.4. Orientação	85
5 Componentes do SRM	88
5.1. Introdução	88
5.2. Representação da rocha intacta	90
5.3. Calibração numérica dos micro-parâmetros	92
5.4. Efeito da escala	101
5.5. Representação das descontinuidades (Modelo de Contacto <i>Smooth-Joint</i>)	104
6 Análise de estabilidade de taludes e Resultados	110
6.1. Análise de estabilidade de taludes	112
6.1.1. Considerações para a avaliação da estabilidade de taludes	112
6.1.2. Geração da amostra (“tijolo”) usando o AC/DC (<i>Adaptive Continuum/Discontinuum</i>):	114
6.1.3. Montagem do modelo	116
6.1.4. Instalação das tensões in situ no modelo	117
6.1.5. Inserir as descontinuidades explicitamente	119
6.1.6. Escavação para geração do talude	120
6.2. Resultados	122
6.2.1. Etapas das escavações mostrando as forças de compressão e tração	123
6.2.2. Etapas das escavações mostrando os deslocamentos das partículas	125
6.2.3. Talude em equilíbrio – Monitoramento	127
6.2.4. Talude instável – Monitoramento	129
6.2.5. Talude instável (Ruptura) – Monitoramento	132
7 Conclusões e Sugestões	136
7.1. Conclusões	136
7.2. Sugestões	138
Referências bibliográficas	140

Lista de figuras

Figura 1.1 - Elementos geométricos típicos encontrados nos taludes de mina a céu aberto.	21
Figura 1.2 - Conceito do Volume Elementar Representativo (VER): (Hudson & Harrison, 1997).	22
Figura 1.3. Diagrama de fluxo do método SRM.	24
Figura 1.4 – Diagrama de fluxo do método DFN.	24
Figura 1.5 – Diagrama de fluxo do PFC.	25
Figura 2.1 – Curva tensão – deformação de rocha intacta e do maciço rochoso	26
Figura 2.2 – Formação de fratura no ELFEN (a) Estado inicial; e desenvolvimento da fratura (b) através do elemento ou (c) ao longo do contorno do elemento (Modificado de Yu,1999).	30
Figura 3.1 – Localização do depósito de minério, observa-se os alinhamentos regionais com uma orientação predominante NO-SE (Google Earth).	34
Figura 3.2 – (A) Depósitos de sedimentos e tufos (Tufos pré mineralizados). A linha vermelha é a topografia atual, (B) Formação das falhas lítricas principais no depósito de tufos, (C) Formação das falhas lítricas secundárias (opostas à orientação das falhas lítricas principais, (D) Brecha mineralizada nas falhas lítricas principais, (E) Seqüência de tufos após a mineralização (Tufos pós mineralizados), (F) Perfil geológico atual idealizado após os processos de erosão.	36
Figura 3.3 – Vista em planta das sondagens utilizadas para a modelagem geológica com o contorno da cava econômica final da mina.	37
Figura 3.4 – Planta topográfica com curvas a cada 5 metros, com o limite da cava econômica final da mina.	38
Figura 3.5 – Vista em planta da cava econômica final da mina.	38
Figura 3.6 – Esterogramas mostrando as estruturas encontradas no depósito Norte (A) Juntas mostradas como grandes círculos, (B) Juntas mostradas como pólos e plano médio dos pólos, (C) Veias mostradas como grandes círculos, (D) Veias mostradas como pólos e plano médio dos pólos, (E) Estratos mostrados como grandes círculos (Nelson, 2006).	39
Figura 3.7 – Estereogramas mostrando as estruturas encontradas no depósito Este. (A) Juntas, (B) Veias e (C) Falhas (Nelson, 2006).	40
Figura 3.8 – Estereogramas mostrando as estruturas encontradas no depósito	

Sul (A) Veias mostradas como grandes círculos, (B) Veias mostradas como pólos e plano médio dos pólos, (C) Veias de prata mostradas como grandes círculos (Nelson, 2006). 40

Figura 3.9 – Localização das sondagens geomecânicas orientadas e cava econômica final da mina. 41

Figura 3.10 – Planos paralelos com orientação horizontal e vertical (Modelo de Polígonos). 47

Figura 3.11 – Sondagens mostrando as litologias encontradas no depósito de minério e a cava econômica final da mina. 48

Figura 3.12 – Interpretação preliminar baseada na informação litológica nas sondagens da seção. 48

Figura 3.13 – Seção transversal mostrando também as interseções modeladas anteriormente em outras seções. 49

Figura 3.14 – Interpretação utilizando os dados das outras seções transversais. 49

Figura 3.15 – Vista do plano horizontal mostrando os contatos geológicos, as sondagens e a cava econômica final da mina. 50

Figura 3.16 – Modelo sólido 3D mostrando a cava econômica final da mina e as zonas: pré-mineral (verde), mineral (rosa) e pós-mineral (roxo). 51

Figura 3.17 – Modelo geológico 3D mostrando a topografia do terreno e a cava econômica final da mina. 51

Figura 4.1 – Características estruturais do depósito de minério (Modificado de Nelson, 2006). 54

Figura 4.2 – Modelos de rotação de camadas relacionadas à (A) rotação das falhas e camadas, e (B) quando as falhas lítricas normais nas quais as camadas sofrem rotação devido à natureza da superfície curva (Modificado de Nelson, 2006). 55

Figura 4.3 – Vista das seções transversais contendo a seguinte informação: topografia (marrom), contacto pré mineral - mineral (verde), contacto mineral - pós mineral (vermelho) e as falhas lítricas (azul). 56

Figura 4.4 – Falhas lítricas localizadas na cava este. 56

Figura 4.5 – Falhas lítricas localizadas na cava norte. 57

Figura 4.6 – Falhas lítricas localizadas na cava sul. 57

Figura 4.7 – Falhas lítricas interceptando a cava econômica final da mina. 58

Figura 4.8 – Vista em planta mostrando os limites da cava da mina, a topografia, as estações de mapeamento e os domínios estruturais definidos inicialmente. 60

Figura 4.9 – Estereogramas realizados segundo o tipo de mineralização para os domínios estruturais D-1 e D-2 Legenda: FL: Falha, JN: Junta, JS: Família de

juntas, CN: Contactos, VN: Veias.	61
Figura 4.10 – Estereogramas realizados segundo o tipo de mineralização para os domínios estruturais D-3 e D-4. Legenda: FL: Falha, JN: Junta, JS: Família de juntas, CN: Contactos, VN: Veias, BD: Estratificação.	62
Figura 4.11 – Processo de importação das sondagens no Petrel.	63
Figura 4.12 – Arquivo ASCII well head.	63
Figura 4.13 – Arquivo ASCII well path deviation.	64
Figura 4.14 – Arquivo ASCII well log para a distribuição dos dados ao longo da sondagem VH-01.	64
Figura 4.15 – Arquivo ASCII point well data.	65
Figura 4.16 – Sondagens mostrando a variação do RQD com a profundidade.	66
Figura 4.17 – Sondagens geomecânicos orientados mostrando informação pontual das falhas encontradas (point well data).	66
Figura 4.18 – Superfícies importadas no Petrel: curvas de nível da topografia, contactos litológicos (verde e rosa), cava econômica final da mina (ouro) e as falhas lítricas (azul).	67
Figura 4.19 – Fluxograma para a geração da grelha geométrica 3D.	68
Figura 4.20 – Falhas modeladas para a divisão em domínios estruturais (as falhas têm como limite superior e inferior a topografia e o plano horizontal de cota de elevação 4600 m. respectivamente).	69
Figura 4.21 – Vista em planta do Pillar gridding mostrando as falhas geológicas geradas anteriormente.	69
Figura 4.22 – Geração de horizontes.	70
Figura 4.23 – Horizontes definidos: topografia (marrom), contacto pré-mineral – mineral (verde), contacto mineral – pós-mineral (rosa) e fundo do modelo (azul claro).	70
Figura 4.24 – Camadas geradas para cada zona.	71
Figura 4.25 – Grelha 3D mostrando as zonas (mineral, pré-mineral e pós-mineral) e também os domínios do modelo (vermelho e azul).	71
Figura 4.26 – Estereogramas mostrando os pólos dos domínios estruturais para a zona mineralizada.	73
Figura 4.27 – Sondagens VH-01, VH-02 e VH-03 mostrando os tadpoles das fraturas e os estereogramas a cada 50 metros.	73
Figura 4.28 – Filtragem dos pólos das fraturas para o domínio “1 & 2” definidos anteriormente no programa Dips 3.5	74
Figura 4.29 – Fraturas mostradas na seção do poço junto ao registro cumulativo das fraturas e a intensidade de fraturas. As linhas vermelhas mostram a janela	

usada para o cálculo da intensidade. A intensidade no ponto vermelho é calculada como a gradiente do registro cumulativo entre os outros dois pontos vermelhos no registro cumulativo (separado pelo comprimento da janela).	75
Figura 4.30 – Registros das intensidades de fraturas para cada família de fraturas para as sondagens VH-01 e VH-02.	76
Figura 4.31 – Upscaling dos dados de intensidade das fraturas nas nove sondagens geomecânicas orientadas.	77
Figura 4.32 – Análise de dados da intensidade de fraturas para a zona mineral. Mostra-se o histograma final com a forma de uma distribuição normal.	79
Figura 4.33 – Semivariograma mostrando os parâmetros (de Camargo, 1997)	80
Figura 4.34 – Anisotropia geométrica.	81
Figura 4.35 – Variograma da intensidade de fraturas na maior direção.	81
Figura 4.36 – Variograma da intensidade de fraturas na direção vertical.	82
Figura 4.37 – Janela para realizar o Petrophysical modeling para a intensidade de fraturas (P_{32}) na zona mineral para o domínio “3 & 4”	83
Figura 4.38 – Distribuição espacial estimada da intensidade de fratura (P_{32})	83
Figura 4.39 – Rede de fraturas da família (1) geradas para a zona mineral e nos domínios “3 & 4”.	86
Figura 4.40 - Rede de fraturas da família (2) geradas para a zona mineral e nos domínios “3 & 4”.	86
Figura 4.41 – Rede de fraturas geradas para os domínios “1 & 2” e “3 & 4” e as zonas Mineral e Pré-mineral.	87
Figura 4.42 – Seção transversal Oeste - Este a utilizar para a análise de estabilidade de taludes.	87
Figura 5.1 – Componentes usados para a geração do SRM (Synthetic Rock Mass)	89
Figura 5.2 – (a) Conjunto de partículas representando a rocha intacta (b) Ligação paralela (c) Contacto entre duas partículas. (b) e (c) de Potyondy e Cundall, 2004.	92
Figura 5.3 – Amostra sintética formado por 5071 partículas que representa o tufo mineralizado.	93
Figura 5.4 – Amostras sintéticas com diferentes R_{\max}/R_{\min} (R_{rat}).	94
Figura 5.5 – Sensibilidade dos micro-parâmetros R_{\min} e R_{\max}/R_{\min} .	95
Figura 5.6 – Amostras quadradas utilizadas para ver a influência do tamanho da amostra.	96
Figura 5.7 – Simulação do ensaio biaxial (Pressão de confinamento = 4 Mpa).	96
Figura 5.8 – Resultado do Módulo de Young obtido para 10 realizações para	

cada amostra ($R_{\min} = 1.0 \text{ mm}$).	97
Figura 5.9 – Resultados do coeficiente de Poisson obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{\min}=1 \text{ mm}$).	97
Figura 5.10 – Resultados da resistência à compressão obtida para 10 realizações para cada amostra ($R_{\min}= 1 \text{ mm}$).	98
Figura 5.11 – Resultados do Módulo de Young obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{\min} = 0.5 \text{ mm}$).	99
Figura 5.12 – Resultados do coeficiente de Poisson obtido para 10 realizações para cada amostra ($R_{\min} = 0.5 \text{ mm}$).	99
Figura 5.13 – Resultados da resistência à compressão pico obtida para 10 realizações para cada amostra ($R_{\min} = 0.5 \text{ mm}$).	100
Figura 5.14 – Histogramas das propriedades mecânicas calculadas usando o PFC.	100
Figura 5.15 – Coeficiente de variação das macro-propriedades para $R_{\min} = 0.5 \text{ mm}$ e $R_{\text{rat}} = 2.0$).	101
Figura 5.16 – Efeito da escala na resistência à compressão uniaxial em rocha intacta (modificado de Hoek e Brown, 1980).	102
Figura 5.17 – Efeito da escala na resistência à compressão uniaxial em rocha intacta (Yoshinaka et al., 2008) junto com a curva de Hoek e Brown (1980) (Adaptado de Pierce et al., 2009).	103
Figura 5.18 – Representação das descontinuidades (cor vermelho) reduzindo as micro-propriedades de resistência e rigidez.	105
Figura 5.19 – (a) Representação da junta, e (b) amostra 2D baixo ação da gravidade é quebrada pela descontinuidade (as partículas vermelhas são fixas) – grandes movimentos por cisalhamento resultam na criação de novos contactos smooth – joint ao longo do plano da junta. (Modificado de Mas Ivars, 2008).	106
Figura 5.20 – (a) Modelo de contacto padrão (deslocamento normal e tangencial respeito à orientação do contacto), (b) movimento da partícula com contacto padrão quando submetido à força lateral, (c) Modelo de contacto Smooth-joint (deslocamento normal e tangencial respeito à orientação da junta), (d) movimento da partícula com o modelo de contacto smooth-joint quando submetido à força lateral.	106
Figura 5.21 – Operações quando o modelo smooth-joint é criado	107
Figura 5.22 – Micro-propriedades do modelo de contato smooth-joint (juntas com e sem ligação)	108
Figura 5.23 – Amostra de ensaio para o cisalhamento direto.	109
Figura 5.24 – Resultados do ensaio de cisalhamento direto realizado.	109
Figura 6.1 – Seção de análise e cava final econômica da mina.	111

Figura 6.2 – Seção mostrando o talude que vai ser analisado.	111
Figura 6.3 – Métodos para calcular o fator de segurança no SRM segundo o modo de ruptura do talude (Em vermelho o método utilizado para calcular o fator de segurança).	113
Figura 6.4 – Ilustração de dois tijolos separados para ver como encaixam perfeitamente. A localização da partícula controladora no tijolo da esquerda é idêntica à associada escrava no lado direito. (Modificado de Billaux, Dedecker & Cundall, 2004).	114
Figura 6.5 – Procedimento de geração do material (a) Conjunto de partículas depois da geração inicial, mas antes do rearranjo; (b) Distribuição dos contatos de força depois da etapa (2); (c) partículas flutuantes (com menos de 3 contatos) e contatos depois da etapa (2); (d) ligação paralela depois da etapa (4).	116
Figura 6.6 – Modelo de rocha intacta formado por tijolos de partículas.	117
Figura 6.7 – Gráfica das tensões principais	118
Figura 6.8 – Evolução das tensões para atingir as tensões in situ.	119
Figura 6.9 – Campo de deslocamentos finais do conjunto de partículas, círculo de medição de tensão (de cor vermelho)	119
Figura 6.10 – Instalação das descontinuidades explicitamente utilizando o modelo Smooth- Joint.	120
Figura 6.11 – Primeira etapa da escavação do maciço rochoso (15 metros de escavação).	121
Figura 6.12 - Quarta etapa da escavação do maciço rochoso (60 metros de escavação).	121
Figura 6.13 – Talude rochoso mostrando os pontos de monitoramento e círculos de medição de tensões.	122
Figura 6.14 – Etapa 1 da escavação mostrando as forças de compressão (azul) e tração (vermelho).	123
Figura 6.15 – Etapa 2 da escavação mostrando as forças de compressão (azul) e tração (vermelho).	123
Figura 6.16 – Etapa 3 da escavação mostrando as forças de compressão (azul) e tração (vermelho).	124
Figura 6.17 – Etapa 4 da escavação mostrando as forças de compressão (azul) e tração (vermelho).	124
Figura 6.18 – Etapa 5 da escavação mostrando as forças de compressão (azul) e tração (vermelho).	124
Figura 6.19 – Etapa 1 da escavação mostrando os deslocamentos no talude.	125
Figura 6.20 – Etapa 2 da escavação mostrando os deslocamentos no talude.	125

Figura 6.21 – Etapa 3 da escavação mostrando os deslocamentos no talude.	126
Figura 6.22 – Etapa 4 da escavação mostrando os deslocamentos no talude.	126
Figura 6.23 – Etapa 5 da escavação mostrando os deslocamentos no talude.	126
Figura 6.24 – Forças não balanceadas média.	127
Figura 6.25 – Monitoramento na crista do talude (Velocidade x).	127
Figura 6.26 – Monitoramento na metade talude (Velocidade x).	128
Figura 6.27 – Monitoramento no pé do talude (Velocidade x).	128
Figura 6.28 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 4.	128
Figura 6.29 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 5.	129
Figura 6.30 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 6.	129
Figura 6.31 – Forças não balanceadas média.	129
Figura 6.32 – Monitoramento na crista do talude (Velocidade x, y).	130
Figura 6.33 – Monitoramento na metade do talude (Velocidade x, y)	130
Figura 6.34 – Monitoramento no pé do talude (Velocidade x, y).	130
Figura 6.35 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 4.	131
Figura 6.36 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 5.	131
Figura 6.37 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 6.	131
Figura 6.38 – Forças não balanceadas média.	132
Figura 6.39 – Monitoramento na crista do talude (Velocidade x, y).	132
Figura 6.40 – Monitoramento na metade do talude (Velocidade x, y).	133
Figura 6.41 – Monitoramento no pé do talude (Velocidade x, y).	133
Figura 6.42 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 4.	133
Figura 6.43 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 5.	134
Figura 6.44 – Monitoramento das tensões (s_{xx} , s_{yy} , s_{xy}) no círculo 6.	134
Figura 6.45 – Talude do maciço rochoso fraturado (do equilíbrio até a ruptura) – Parte 1	135
Figura 6.46 – Talude do maciço rochoso fraturado (do equilíbrio até a ruptura) – Parte2	135

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de propriedades físicas	42
Tabela 3.2 – Resultados dos ensaios de carga pontual.	43
Tabela 3.3 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial (UCS)	44
Tabela 3.4 – Resultados dos ensaios triaxiais.	44
Tabela 3.5 – Resultados dos ensaios de cisalhamento direto nas juntas simuladas e naturais.	45
Tabela 5.1 – Micro-parâmetros utilizados no modelo para $R_{\min} = 0.35$ mm.	94
Tabela 5.2 – Resultados da calibração.	95
Tabela 5.3 – Micro-propriedades para a amostra de 2.5 x 4.65 m.	104