



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO ESPORTE
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE PARA RUPTURA ROTACIONAL GLOBAL DE TALUDES DE MINA

Lucas Bianchetti Drumond

Ouro Preto/MG

2022



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO ESPORTE
Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto
Departamento de Engenharia de Minas
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM



ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTABILIDADE PARA RUPTURA ROTACIONAL GLOBAL DE TALUDES DE MINA

Projeto de Pesquisa: Análise tridimensional de estabilidade de escavações em maciços rochosos

Autor: **LUCAS BIANCHETTI DRUMOND**

Orientadora: **Prof^a. Dr^a. TATIANA BARRETO DOS SANTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração: Lavra de Minas

Ouro Preto/MG

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

D795a Drumond, Lucas Bianchetti.

Análise tridimensional de estabilidade para ruptura rotacional global de taludes de mina. [manuscrito] / Lucas Bianchetti Drumond. - 2022. 90 f.

Orientadora: Profa. Dra. Tatiana Barreto dos Santos.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

1. Geotecnia. 2. Mecânica do solo. 3. Mecânica das rochas. 4. Taludes (Mecânica do solo) - Estabilidade. I. Santos, Tatiana Barreto dos. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.121.537

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Bianchetti Drumond

Análise tridimensional de estabilidade para ruptura rotacional global de taludes de mina

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Mineral

Aprovada em 28 de junho de 2022

Membros da banca

Dra. Tatiana Barreto dos Santos - Orientador(a) - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos - CEFET-MG
Dra. Milene Sabino Lana - Universidade Federal de Ouro Preto

Tatiana Barreto dos Santos, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 29/11/2022



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Barreto dos Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 29/11/2022, às 13:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0433986** e o código CRC **89967179**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir dar mais um passo rumo ao crescimento pessoal, acadêmico e profissional.

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, Denise e Sérgio, por serem meus maiores apoiadores e incentivadores.

Agradeço a Faelma pela compreensão, cumplicidade e apoio incondicional durante esta jornada. Aos meus amigos, em especial Rafael Tarantino e Laryssa Fernandes pela convivência e auxílio durante este período.

Agradeço a UFOP, a Escola de Minas, ao PPGEM, DEMIN e seus mestres, pelo ensino de público, gratuito e de qualidade. Agradeço em especial à Prof. Dr. Tatiana Barreto dos Santos, tanto pela orientação e conhecimentos compartilhados quanto pela confiança depositada durante este tempo.

Aos colegas de trabalho da Hexagon Mining, Progen e Vale, pelo aprendizado constante do dia a dia, em especial a Ana Xavier, Daniel Azevedo, Cissa Lanna e Leonardo Sala que contribuíram para a construção deste trabalho.

RESUMO

Eventos que envolvem instabilidade de taludes infelizmente são costumazes na mineração, podendo causar ferimentos ou morte de trabalhadores. Além disso, tais incidentes podem representar grande impacto financeiro ao empreendimento, devido à falta de alimentação da planta de beneficiamento mineral e os custos de reparação local. Em casos extremos, podem levar ao encerramento precoce das atividades minerárias e diluição do minério, além de perda de licenças de operação. Rupturas de taludes ocorrem a depender das características das descontinuidades, da rocha intacta e do maciço rochoso, além da geometria do talude adotada no projeto de uma mina. Faz-se necessário então conhecer as propriedades mecânicas do maciço rochoso, descontinuidades e da rocha intacta que compõem a estrutura, além dos possíveis modos e mecanismos de ruptura. O método de equilíbrio limite é uma das possíveis técnicas para análise de estabilidade de um talude, fazendo uso de geometria representativa, propriedades de resistência tanto do maciço quanto das descontinuidades, além de informações pertinentes ao local, como o nível de água, para a determinação de um fator de segurança. Desta forma, este trabalho apresenta análises de estabilidade de taludes, bidimensional e tridimensional, aplicadas em uma mina a céu aberto de manganês, por meio do método de equilíbrio limite. A análise tridimensional utilizou-se do modelo de blocos geomecânico da mina, um ponto a se destacar devido a ampla utilização destes modelos dentro de rotinas operacionais de mineração, graças a sua versatilidade. Ressalta-se também, a importância da qualidade dos dados inseridos no modelo, que quanto mais fidedignos forem, mais próximo este estará da realidade. A partir destas análises, percebe-se a similaridade entre os resultados obtidos e a importância das análises tridimensionais, que permitem a visualização da extensão lateral, peso e volume das rupturas hipotéticas obtidas e pode balizar análises mais detalhadas no modelo.

Palavras chave: Estabilidade de taludes, análise de estabilidade tridimensional, método equilíbrio limite, mina a céu aberto, geotecnia, geomecânica.

ABSTRACT

Events that involve slope instability are unfortunately common in mining, and can cause injury or death to workers. In addition, such incidents can represent a great financial impact to the enterprise, due to the lack of feed to the mineral beneficiation plant and the costs of local repairs. In extreme cases, they can lead to early termination of mining activities and ore dilution, in addition to loss of operating licenses. Slope failures occur depending on the characteristics of the discontinuities, the intact rock and the rock mass, in addition to the slope geometry adopted in the mine design. It is then necessary to know the mechanical properties of the rock mass, discontinuities and the intact rock that compose the structure, in addition to the possible modes and mechanisms of rupture. The limit equilibrium method is one of the possible techniques for analyzing the stability of a slope, making use of representative geometry, strength properties of both the massif and the discontinuities, as well as information relevant to the location, such as the water level, to determine a safety factor. Thus, this work presents two-dimensional and three-dimensional slope stability analyses applied in an open pit manganese mine, using the limit equilibrium method. The three-dimensional analysis used the mine's geomechanical block model, a point to be highlighted due to the wide use of these models within mining operational routines, due to its versatility. It is also important to emphasize the importance of the quality of the data inserted in the model, that the more reliable they are, the closer it is to reality. From these analyses, it is possible to see the similarity between the results obtained and the importance of three-dimensional analyses, which allow the visualization of the lateral extension, weight and volume of the hypothetical ruptures obtained to guide more detailed analyses in the model.

Keywords: Slope stability, three-dimensional stability analysis, limit equilibrium method, open pit mine, geotechnics, geomechanics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Propriedades de descontinuidades	18
Figura 2 - Escalas de observação em um maciço rochoso	19
Figura 3 - Comparação entre escalas de taludes.....	19
Figura 4 - Ruptura por ponte de rochas.	21
Figura 5 - Combinações de descontinuidades formando diferentes superfícies de rupturas....	22
Figura 6 - Rupturas circulares e combinação de rupturas circulares e planas.....	24
Figura 7 - Ocorrências comuns de tombamento: (a) Tombamento de blocos, colunas de rocha com juntas ortogonais muito espaçadas. (b) Tombamento flexural de placas de rochas mergulhando em direção à face. (c) Tombamento bloco flexural caracterizado pela flexão pseudocontínua de longas colunas através de movimentos acumulados ao longo de inúmeras juntas cruzadas.....	25
Figura 8 - Exemplos de rupturas por deslocamento e flambagem.....	26
Figura 9 - Círculos de ruptura de Mohr	32
Figura 10 - Critério de resistência de Mohr-Coulomb	33
Figura 11 - Método de fatias – forças as quais uma fatia está submetida	35
Figura 12 - Vista 3D de forças atuantes em uma coluna	38
Figura 13 - Vista de topo da direção resultante de deslocamento das colunas.....	38
Figura 14 - Equilíbrio de forças no plano XY em coluna qualquer	39
Figura 15 - Distribuição de forças horizontais nos eixos: (a) z-x e (b) z-y.	39
Figura 16 - Parâmetros geométricos de um modelo de blocos.....	40
Figura 17 - Modelo de blocos cortado por topografia e filtrado por litologia.....	41
Figura 18 - (a) Análise inicial da área por método de equilíbrio limite tridimensional. (b) Mapa de deslocamento de radar.	42
Figura 19 - (a) Resultado da análise de equilíbrio limite retro-analisada, explicitando deslizamento ao longo de plano de falha sub-horizontal. (b) Imagem do radar IBIS-FM sobreposta a imagem do plano crítico de deslizamento	43
Figura 20 - Gráfico de deslocamento do radar IBIS-FM, pré e pós despressurização do talude	43
Figura 21 - Análise inicial realizada com parâmetros médios em condição estável, FS=1.33	44
Figura 22 - Gráfico correlacionado fator de redução e fator de segurança	45
Figura 23 - Análise de estabilidade correspondente a FS=1.0	45
Figura 24 - Região da cava em estudo.....	46

Figura 25 - Divisão de setores da cava	46
Figura 26 - Descritivo de ruptura ocorrida no talude norte	47
Figura 27 - Modelo inserido no software Slide 3, visualização por litologias	49
Figura 28 - Nível d'água inserido no modelo tridimensional	50
Figura 29 - Comparativo entre topografia em pontos fornecida pela empresa proprietária e os limites do modelo de blocos.	54
Figura 30 - Seções bidimensionais sobre o modelo de blocos no software Datamine.....	55
Figura 31 - Nível d'água da seção B no software Leapfrog	56
Figura 32 - Nível d'água (em azul) visto na seção B no software Datamine. Wireframe vista na interseção da seção do modelo tridimensional.	56
Figura 33 - Nível d'água inserido inicialmente.....	59
Figura 34 - Modelagem do nível d'água por seções	59
Figura 35 - Resultados obtidos em análise sem restrições adicionais no modelo, pelos métodos de Bishop e GLE	60
Figura 36 - Mapa de Fatores de Segurança - Método GLE.....	61
Figura 37 - Área de ruptura obtida em análise da Região da Parede Sul - Sem restrição da região da pilha de estéril.....	61
Figura 38 - Limites de restrições impostos de maneira a isolar a Parede Sul	62
Figura 39 - Resultados obtidos pelos métodos de Bishop e GLE na Parede Sul, sem restrição de escala de ruptura	62
Figura 40 - Mapa de Segurança – Método GLE - da Parede Sul da cava	63
Figura 41 - Ruptura obtida para o método GLE, com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade	64
Figura 42 - Mapa de Segurança (GLE) de análise com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade	64
Figura 43 - Ruptura obtida para o método Bishop, com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade	65
Figura 44 - Mapa de Segurança (Bishop) de análise com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade	65
Figura 45 - Áreas de ruptura indicada na Parede Sul, sem restrições de profundidade	66
Figura 46 - Mapa de Segurança - GLE, com foco na Parede Sul da cava.....	67
Figura 47 - Resultados de análise tridimensional comparativa entre os métodos.....	68
Figura 48 - Mapas de segurança dos diferentes métodos utilizados na comparação	69

Figura 49 - Resultado de análise de estabilidade sem restrição de profundidade de ruptura. Seção A - Parede Norte	71
Figura 50 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 10m. Seção A – Norte	72
Figura 51 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 10 metros. Seção B - Parede Sul.....	73
Figura 52 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 10 metros. Seção C - Parede Sul.....	73
Figura 53 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 30 metros. Seção A - Parede Norte.....	74
Figura 54 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 30 metros. Seção C - Parede Sul.....	75
Figura 55 - Fatores de segurança obtidos em análises bidimensionais por seção, com restrição de 10 metros de profundidade de ruptura	76
Figura 56 - Superfícies de ruptura obtidas em análises tridimensionais para as Paredes Norte e Sul da cava em análises tridimensionais sem limitação de profundidade de ruptura.....	77
Figura 57 - Mapa de segurança obtido para análises sem restrição de profundidade de rupturas	78
Figura 58 - Fatores de segurança obtidos por seção em análise bidimensional com restrição de profundidade de 30 metros	79
Figura 59 - Superfícies de ruptura obtidas em análises tridimensionais para as Paredes Norte e Sul da cava em análises tridimensionais com limitação de 30 metros de profundidade de ruptura	79
Figura 60 - Mapa de segurança obtido para análises com rupturas acima de 30 metros.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores estimados de mi.....	27
Tabela 2 - Estimativa de resistência à compressão uniaxial.....	28
Tabela 3 - GSI para maciços rochosos	30
Tabela 4 - GSI para maciços rochosos heterogêneos	31
Tabela 5 - Fatores de segurança recomendados para taludes	34
Tabela 6 - Métodos de equilíbrio limite e fatores de equilíbrio considerados	36
Tabela 7 - Parâmetros geomecânicos utilizados nas análises.....	51
Tabela 8 - Número de blocos por litologia e classe RMR.....	52
Tabela 9 - Relação entre classe RMR e grau de alteração dos blocos.....	58
Tabela 10 - Fatores de segurança obtidos em comparativo de métodos	67
Tabela 11 - Comparativo de resultados obtidos em diferentes análises com mesmos parâmetros	69
Tabela 12 - Fatores de Segurança obtidos na análise bidimensional sem restrição de profundidade de ruptura.....	70
Tabela 13 - Fatores de segurança obtidos na análise bidimensional com restrição de profundidade de ruptura de 10 metros	71
Tabela 14 - Fatores de Segurança obtidos na análise bidimensional com restrição de profundidade de ruptura de 30 metros	74
Tabela 15 - Comparativo entre as análises bidimensional e tridimensional	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Maciço Rochoso	16
3.1.1	Resistência do maciço rochoso	20
3.2	Modos e mecanismos de ruptura em taludes	21
3.2.1	Modos de ruptura	21
3.2.1.1	Rupturas por cisalhamento ao longo de descontinuidades	22
3.2.1.2	Ruptura por cisalhamento rotacional	23
3.2.1.3	Rupturas por tombamento	24
3.2.1.4	Ruptura por deslocamento e flambagem	26
3.3	Critérios de resistência para maciços rochosos	26
3.3.1	Critério de Hoek & Brown	26
3.3.2	Critério de Mohr-Coulomb	31
3.4	Análise de estabilidade de taludes - Método do Equilíbrio Limite	33
3.4.1	Método de Fatias	34
3.4.2	Métodos de Equilíbrio Limite 3D	36
3.4.2.1	Utilização de modelo de blocos	40
3.4.3	Aplicações da análise equilíbrio limite tridimensional e utilização do Slide3 na literatura	41
4	ÁREA DE ESTUDO	46
5	METODOLOGIA	48
5.1	Adaptação do modelo de blocos	48

5.2	Inserção do modelo de blocos, nível de água e parâmetros de resistência.....	49
5.2.1	Nível d'água	49
5.2.2	Parâmetros mecânicos e físicos	50
5.3	Realização das análises tridimensionais	53
5.4	Realização de análises bidimensionais	55
5.5	Análise dos resultados obtidos	57
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
6.1	Análise Tridimensional.....	58
6.1.1	Análise sem restrições	60
6.1.2.	Análise geral do modelo, com restrições de região – direcionado a Parede Sul	61
6.1.3	Análise geral do modelo com restrição de escala de ruptura (30m).....	63
6.1.4.	Análise do modelo com restrição de escala de ruptura (30m) e de região – Parede Sul	66
6.1.5.	Análise do modelo com restrição de escala de ruptura (30 metros) com todos os métodos disponíveis.....	67
6.2	Análise Bidimensional	70
6.2.1	Análise sem restrição.....	70
6.2.2	Análise com restrição (10 metros).....	71
6.2.3	Análise com restrição (30 metros).....	74
6.3	Comparativo entre análises.....	75
6.3.1	Comparativo entre análises tridimensionais sem restrições (resultado interrampa) e análise bidimensional com restrição de 10 metros	76
6.3.2	Comparativo entre análises com restrição de 30 metros de profundidade.	78
6.3.3	Comparativo entre a utilização dos softwares	81
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS	83
7.1	Conclusões	83
7.2	Sugestões de pesquisas futuras	84

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	89

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade que rotineiramente convive com o risco geotécnico. A possibilidade de ruptura em um talude de mineração acarreta diversos riscos a um empreendimento mineral. Read & Stacey (2009) destacam que garantir a segurança da operação de mina, para que não ocorra ferimentos ou morte dos trabalhadores, é um requisito moral e legal para mineração. Entretanto, acidentes envolvendo estabilidade de taludes são frequentes em minas de todo o mundo e, infelizmente, alguns destes se tratam de acidentes fatais.

Além dos possíveis prejuízos sociais, a ruptura de taludes pode representar também um grave impacto financeiro na operação de uma mina. Ruptura de taludes podem implicar em custos advindos do custo de reparação local e interrupção da produção via suspensão da alimentação da usina de beneficiamento mineral, que pode ocorrer devido a diversos fatores: dificuldade de acesso as faces de minério, diluição, diferença de teor e litologia pela utilização de frentes de lavra alternativas, entre outras (CONTRERAS, 2015). É importante salientar que rupturas de grande magnitude podem até mesmo acarretar um encerramento precoce da vida de uma mina.

É necessário compreender que as condições de estabilidade de taludes rochosos de mineração estão associadas às características geomecânicas dos maciços rochosos, das descontinuidades e da rocha intacta, da geometria do talude e, por fim, de fatores externos como método de desmonte e condição de percolação de água subterrânea. Para se analisar a estabilidade de tais estruturas, é fundamental o conhecimento da resistência e das propriedades do próprio maciço, das descontinuidades e da rocha intacta constituinte do talude, além de outros fatores.

Deve-se compreender também os modos e mecanismos de ruptura possíveis e prováveis em determinado talude, analisando cada situação individualmente e dispondo de dados confiáveis para tal.

O método de equilíbrio limite utiliza a geometria representativa do talude, a resistência ao cisalhamento do maciço e/ou das descontinuidades, seus pesos específicos, condições de percolação de água e outros possíveis dados de entrada para determinar a estabilidade de um talude através de uma análise de equilíbrio de forças e momentos que tem como produto o fator de segurança (READ & STACEY, 2009).

Desta forma, será apresentado neste trabalho uma revisão bibliográfica englobando o maciço rochoso e suas propriedades, critérios de resistência, modos e mecanismos de ruptura

de taludes, além do método de equilíbrio limite, como forma de embasar uma metodologia que possibilite uma análise tridimensional por equilíbrio limite, a ser realizada em uma cava de mina de manganês, com ocorrência usual de rupturas em taludes.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Essa dissertação teve como objetivo realizar as análises bidimensional e tridimensional de estabilidade de taludes em uma cava a céu aberto pelo método de equilíbrio limite, com objetivo de se avaliar a aplicabilidade e o ganho das análises tridimensionais em taludes de mina. Para isso, serão utilizados os softwares Slide3 (2021) e Slide2 (2021).

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar o banco de dados fornecidos pela empresa proprietária da mina;
- Definir os parâmetros de resistência;
- Construir modelo tridimensional local;
- Analisar os fatores de segurança e possíveis superfícies susceptíveis a rupturas.
- Verificar a usabilidade de tais softwares e suas principais características.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Maciço Rochoso

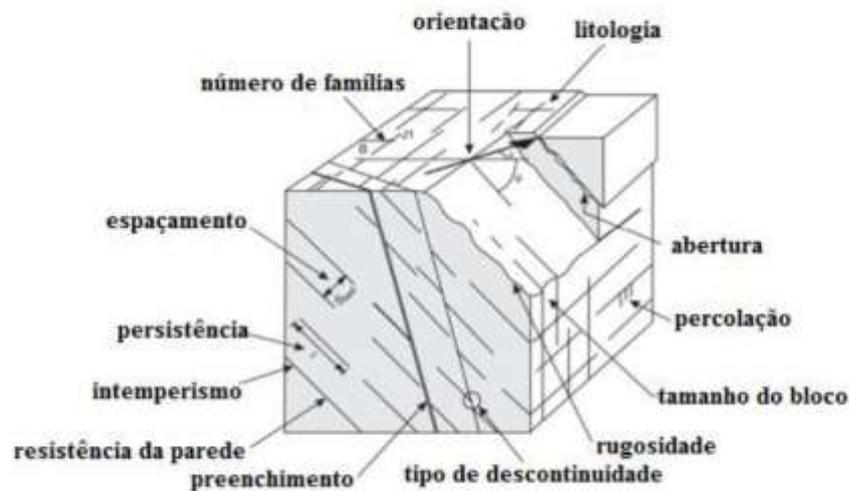
O maciço rochoso constitui se basicamente por porções de rocha intacta e descontinuidades. Brady & Brown (2004) o definem como o meio in situ que contém planos de acamamento, falhas, juntas, dobras e outras estruturas. Geralmente, os maciços rochosos são descontínuos e possuem propriedades heterogêneas e anisotrópicas. Já a rocha intacta é considerada a rocha que se encontra entre as descontinuidades.

As descontinuidades que constituem o maciço rochoso possuem origens e formações geológicas diversas, podendo ser classificadas principalmente como falhas, juntas, acamamentos, dobras, zonas de cisalhamento, diques e veios (BRADY & BROWN, 2004). Por serem as estruturas de menor resistência mecânica nos maciços rochosos, as descontinuidades constituem parte importante no comportamento geomecânico dos mesmos, sendo fundamental o conhecimento de suas características (ver Figura 1), como:

- Tipo de descontinuidade: usualmente são classificadas de acordo com a sua formação geológica, possibilitando uma categorização com características semelhantes. Os padrões de descontinuidades mais comumente utilizados são: falhas, acamamento, foliações, juntas, xistosidade e clivagens.
- O número de famílias: a quantidade de famílias que se inter cruzam em determinado maciço influencia a possibilidade de deformação deste. O mapeamento deve distinguir entre descontinuidades sistemáticas e aquelas aleatórias, menos previsíveis.
- Espaçamento: é obtido em afloramentos rochosos e em testemunhos de sondagem, com grande possibilidade de variação (de milímetros a metros).
- Persistência: é a medida de comprimento contínuo (traço) ou área da descontinuidade, podendo apresentar grandes variações de escala, sendo utilizada juntamente com o espaçamento para definir o tamanho de um bloco ou uma possível superfície deslizante.
- Grau de intemperismo: causa a redução da resistência da rocha devido ao desgaste. Reduz a força de cisalhamento das descontinuidades e do maciço, devido a diminuição da resistência da rocha intacta.
- Abertura: é a distância perpendicular que separa as paredes adjacentes de rocha de uma descontinuidade aberta. O espaço pode estar preenchido com ar ou água. A abertura de uma descontinuidade pode variar de escala milimétrica até metros.

- Preenchimento: consiste no material que separa as paredes adjacentes da descontinuidade. A descrição do material de preenchimento é necessária para prever o comportamento da descontinuidade, com informações como a mineralogia, tamanho da partícula, consolidação, teor de água, condutividade, rugosidade da parede, largura e fraturamento.
- Percolação de água: o nível de percolação de água por uma descontinuidade pode ser de seco até apresentar um fluxo contínuo. A localização da percolação de água pelas descontinuidades se mostra importante para obter informações sobre a abertura da mesma, já que o fluxo de água subterrâneo é confinado quase em sua totalidade nas descontinuidades. Estas observações também indiciam a posição do lençol freático em relação ao maciço rochoso.
- Orientação: é dada pelo ângulo de mergulho e o ângulo da direção de mergulho do plano de descontinuidade.
- Rugosidade da parede: se trata de um parâmetro importante com relação a resistência ao cisalhamento da descontinuidade. Deve ser descrita em campo, podendo se utilizar medição direta ou comparação com perfis de rugosidade da literatura.
- Tamanho do bloco: pode ser determinado juntamente com a sua forma a partir do espaçamento, persistência, número e orientação de famílias de descontinuidades. Podem incluir formatos de blocos, tabulares e colunares, com tamanhos variáveis.
- Resistência da parede da descontinuidade: é resistência da rocha que compõe as paredes da descontinuidade, podendo influenciar na resistência ao cisalhamento da mesma. O esclerômetro de Schmidt pode ser utilizado para estimar a resistência à compressão simples da rocha em superfícies de descontinuidades. Outra possibilidade é a utilização do martelo de geólogo, quando houver a impossibilidade de utilização do esclerômetro de Schmidt ou ele não fornecer resultados compatíveis.

Figura 1- Propriedades de discontinuidades

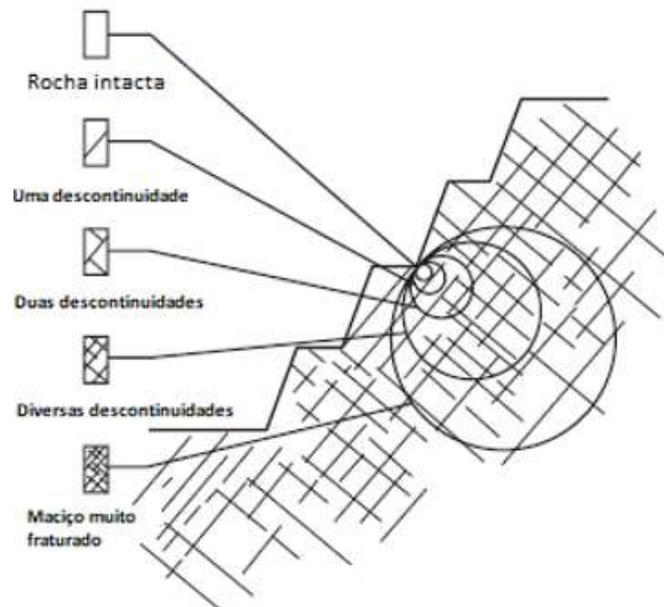


Fonte: Modificado de Willye (2009)

As descontinuidades estão presentes em diversas escalas, variando desde microfissuras de comprimento inferior a 10 mm até descontinuidades com quilômetros de comprimento. A geometria e orientação destas descontinuidades representam um grande impacto no comportamento dos taludes, já que são elos de fragilidade no maciço rochoso. Considerando uma situação usual de baixa tensão em um talude a céu aberto, as rupturas dependem das orientações, frequência e continuidade destas estruturas em relação ao talude e sua inclinação (SJÖBERG, 1996).

Hoek & Bray (2005) salientam a importância de se trabalhar com a escala correta das descontinuidades em relação ao maciço, ver Figura 2. A Figura 2 apresenta o conceito de efeito escala no maciço rochoso, no qual um mesmo maciço pode ser classificado de diferentes formas a depender da amostra utilizada.

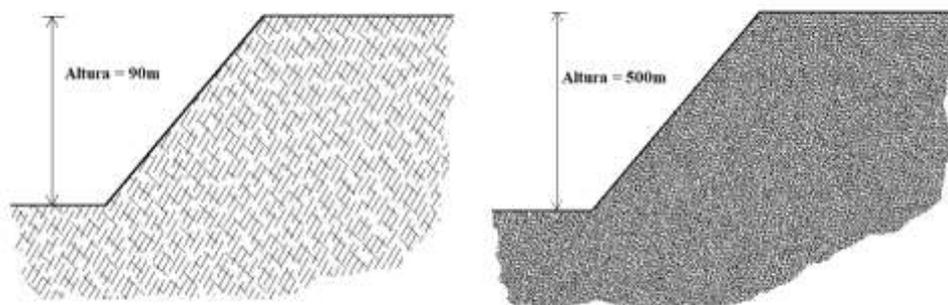
Figura 2 - Escalas de observação em um maciço rochoso



Fonte: Modificado de Hoek & Bray (2005)

Uma abordagem usual para a análise de estabilidade de taludes se concentra nos modos de ruptura governados por descontinuidades estruturais, como rupturas planares, em cunha, entre outras. Porém, ao se tratar de taludes altos, como é o caso de taludes globais de mina, esta análise se mostra mais complexa, já que em muitos casos, o mapeamento das características estruturais e de descontinuidades do maciço apontam que a maioria das descontinuidades apresenta uma escala pequena em relação ao talude, fazendo com que o maciço seja muito fraturado naquela escala de observação. A Figura 3 exemplifica esta ocorrência, comparando taludes de diferentes alturas (90m e 500m), com mesma inclinação e duas famílias de descontinuidades com mesmas características de espaçamento e persistência.

Figura 3 - Comparação entre escalas de taludes



Fonte: Adaptado de Sjöberg (1996)

Ao analisar a Figura 3 percebe-se que a situação de um talude de grande escala é de um maciço rochoso fortemente fraturado, com os blocos de pequenos tamanhos em relação a sua altura e dimensão. Desta forma, o maciço pode ser descrito como contínuo equivalente, quando o espaçamento das juntas é pequeno em relação à escala do talude. (PENDER & FREE – apud SJÖBERG 1996). Assim, pode-se concluir que o modo de ruptura de um talude de grande escala se difere de um talude de pequena escala. Apesar de uma descontinuidade individual possa ser provavelmente mais dominante em pequena escala do que em grande escala, estas descontinuidades não podem ser negligenciadas em taludes de grande escala. Além disso, grandes descontinuidades devem ser mapeadas e monitoradas, já que alteram drasticamente o padrão de comportamento de um maciço.

3.1.1 Resistência do maciço rochoso

É fundamental o conhecimento sobre a resistência de maciços rochosos e suas características. Desta forma, Hoek & Bray (2005) propõem as seguintes análises de características de um maciço:

- Descontinuidades – planos únicos de acamamentos, juntas ou falhas. As propriedades que influenciam a resistência ao cisalhamento incluem a forma e a rugosidade das descontinuidades, o grau de intemperismo da rocha na superfície e o preenchimento que pode ser coesivo ou de baixa resistência.
- Maciço Rochoso – os fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento no maciço rochoso incluem a resistência mecânica da rocha intacta, além do espaçamento das descontinuidades, suas características superficiais e resistência mecânica.
- Rocha intacta – O fator a ser considerado quanto a resistência da rocha intacta é que seu valor pode diminuir de acordo com o tempo graças ao intemperismo.

Uma potencial superfície de ruptura em um talude pode se originar nas descontinuidades ou no maciço rochoso em si a depender do efeito escala. Para a análise de estabilidade de taludes é necessário o conhecimento da resistência ao cisalhamento das descontinuidades e/ou do maciço rochoso.

Porém, o método de determinação da resistência nos dois casos é diferenciado. Para as descontinuidades, a determinação da resistência ao cisalhamento pode ser feita através de

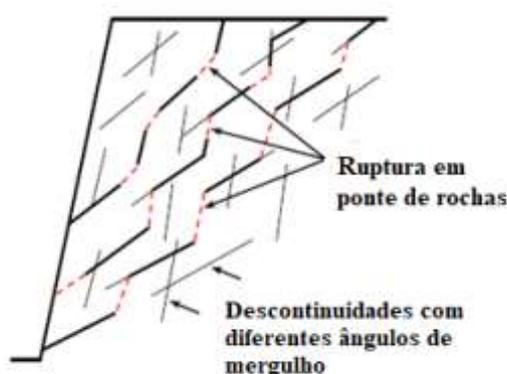
parâmetros medidos em campo, como J_r (índice de rugosidade das paredes das descontinuidades) e J_a (índice de alteração das paredes das descontinuidades), JRC (coeficiente de rugosidade da junta) e JCS (resistência a compressão na parede da junta) ou em ensaios de laboratório. Já para o maciço rochoso, podem se utilizar as tradicionais classificações geomecânicas como o Rock Mass rating (RMR) (BIENIAWSKI, 1989) e Geological Strength Index (GSI) (HOEK, 2002) retro análises ou por estimativas envolvendo a resistência da rocha.

3.2 Modos e mecanismos de ruptura em taludes

Sjöberg (1996) define o modo de ruptura como a descrição macroscópica da ocorrência, podendo ser resumido como uma descrição geométrica do desenvolvimento da ruptura, como a ruptura planar, em cunha, etc. Já o mecanismo de ruptura se refere a descrição do processo físico que ocorre no maciço rochoso do início da ruptura até sua propagação pela rocha.

Quando a persistência das descontinuidades é limitada, uma ruptura pode ocorrer quando as descontinuidades pré-existentes estão conectadas através de pontes de rochas intactas. Esse modo de ruptura é comumente nomeado como ruptura por degraus (EBERHARDT *et al.*, 2004 *apud* HUANG *et al.*, 2015), e pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Ruptura por ponte de rochas.



Fonte: Adaptado de Huang *et al.* (2015)

3.2.1 Modos de ruptura

Sjöberg (1999) utiliza a classificação dos modos de ruptura em taludes altos de Coates (1977,1981), que os subdivide em quatro categorias principais:

- rupturas por cisalhamento em plano;
- rupturas circulares;
- tombamento de blocos e flexural;

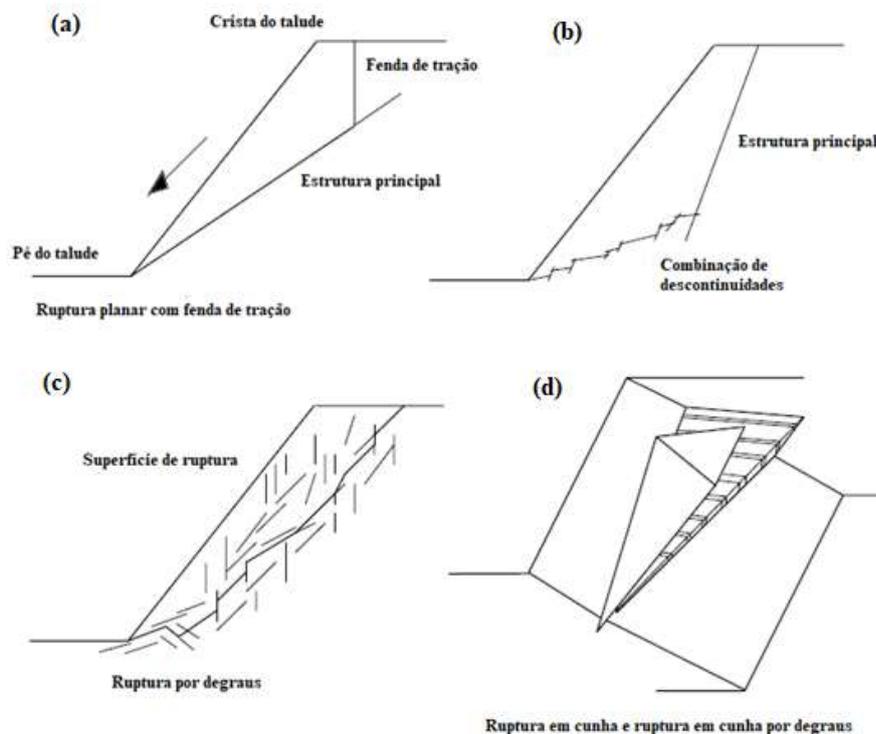
- ruptura por deslocamento e flambagem. (*Slab and buckling failure*).

3.2.1.1 Rupturas por cisalhamento ao longo de descontinuidades

Sjöberg (1999) descreve que a superfície na qual a ruptura se desenvolve pode ser uma descontinuidade (ruptura planar), por duas descontinuidades que se interceptem (ruptura em cunha) ou por uma combinação de descontinuidades, ver Figura 5.

Na Figura 5 (a), é possível observar uma ruptura planar típica com a presença de fenda de tração, em que o corpo se move na direção da estrutura principal de falha. É possível também observar a ruptura planar com combinações de descontinuidades, que envolve uma descontinuidade principal e uma combinação de diversas outras descontinuidades, levando o talude à ruptura (Figura 5 (b)). A ruptura por degraus é observada na Figura 5 (c), onde diversas descontinuidades são associadas a pontes de rochas, tornando possível um caminho preferencial para que ocorra a ruptura. Já a Figura 5 (d) demonstra geometricamente a formação de uma ruptura em cunha, podendo esta ocorrer pela intersecção de duas descontinuidades.

Figura 5 - Combinações de descontinuidades formando diferentes superfícies de rupturas



3.2.1.2 Ruptura por cisalhamento rotacional

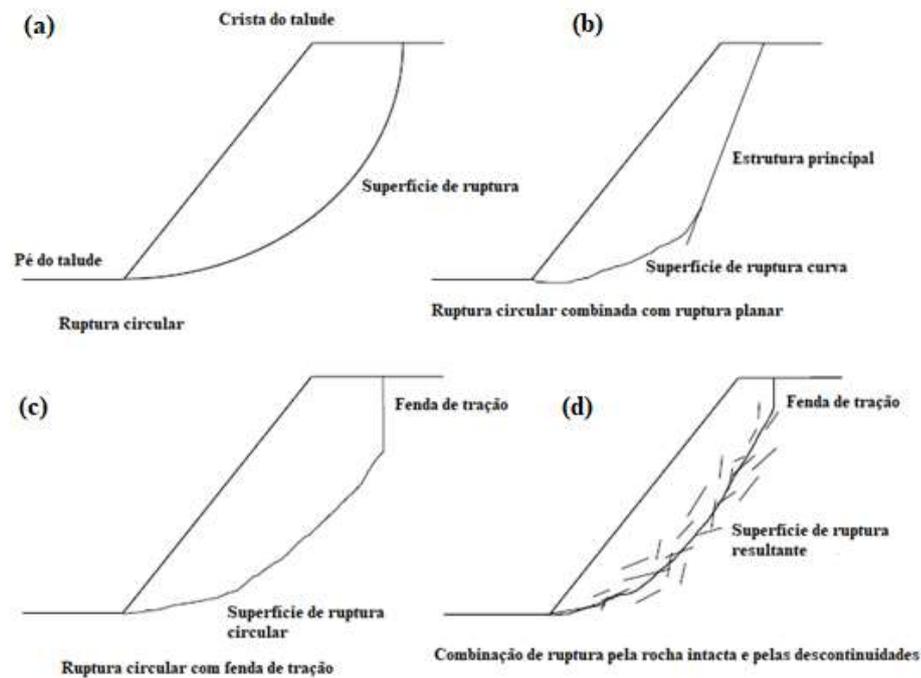
As rupturas rotacionais ou circulares são mais comuns e normalmente associadas a taludes de solos. No entanto, Hoek & Bray (2005) destaca que quando o maciço é altamente intemperizado ou muito fraturado (efeito escala), não existe uma estrutura bem definida, permitindo assim que a superfície de ruptura seja livre para encontrar a menor resistência disponível, ver Figura 6.

A condição para que a ruptura circular ocorra é que as partículas individuais no maciço rochoso sejam muito pequenas quando comparadas às dimensões do talude, e que essas partículas não estejam conectadas. (Hoek & Bray, 1981 *apud* Sjöberg, 1999).

Sjöberg (1999) considera que as rupturas circulares são um modo de ruptura plausível para taludes altos, já que a consideração sobre o maciço rochoso ser muito fraturado depende principalmente da questão de escala. Considera ainda a possibilidade de que a ruptura circular possa englobar alguma ruptura pré-existente por descontinuidades e algumas partes da ruptura ocorra na rocha intacta. Além disso, a rotação/translação de blocos individuais no maciço rochoso poderia contribuir para a criação de uma superfície circular de ruptura.

Na Figura 6 (a) é possível observar uma ruptura circular tradicional, onde a principal superfície de ruptura dita sua geometria. Na Figura 6 (b), pode-se observar uma ruptura planar e circular combinada, com uma estrutura principal planar conectando-se a outra estrutura curva. A Figura 6 (c) descreve uma ruptura circular com a presença de fenda de tração no topo talude. O caso retratado na Figura 6 (d) é uma ruptura por degraus, que ocorre pelas descontinuidades e ruptura na rocha intacta (pontes de rocha), contando ainda com a presença de fenda de tração no topo do talude.

Figura 6 - Rupturas circulares e combinação de rupturas circulares e planas



Fonte: Modificado de Coates (1977); Hoek e Bray (1981)

3.2.1.3 Rupturas por tombamento

De acordo com Hoek & Bray (2005) modos de ruptura por tombamento se diferem dos outros modos observados, já que envolvem a rotação de colunas ou blocos de rocha ao longo de uma base. Os tombamentos podem ser diferenciados em tombamento de blocos, tombamento flexural ou tombamento bloco-flexural.

3.2.1.3.1 Tombamento de blocos

O tombamento de blocos ocorre em rochas resistentes, necessitando um conjunto de descontinuidades que mergulhem contra o talude com altos valores de mergulho e um segundo conjunto de descontinuidades, ortogonais espaçadas com mergulho a favor da face do talude, formando colunas de rocha, ver Figura 7(a).

No pé do talude, as colunas de menores dimensões são pressionadas pelas cargas das colunas superiores, ocasionando um deslizamento no local. Esse movimento permite que mais tombamentos ocorram na parte alta do talude.

3.2.1.3.2. Tombamento flexural

O tombamento flexural ocorre quando descontinuidades persistentes formam colunas contínuas de rochas que apresentam direção de mergulho oposta a face do talude. Diferentemente da ruptura por queda de blocos, o plano basal no tombamento flexural não é bem definido.

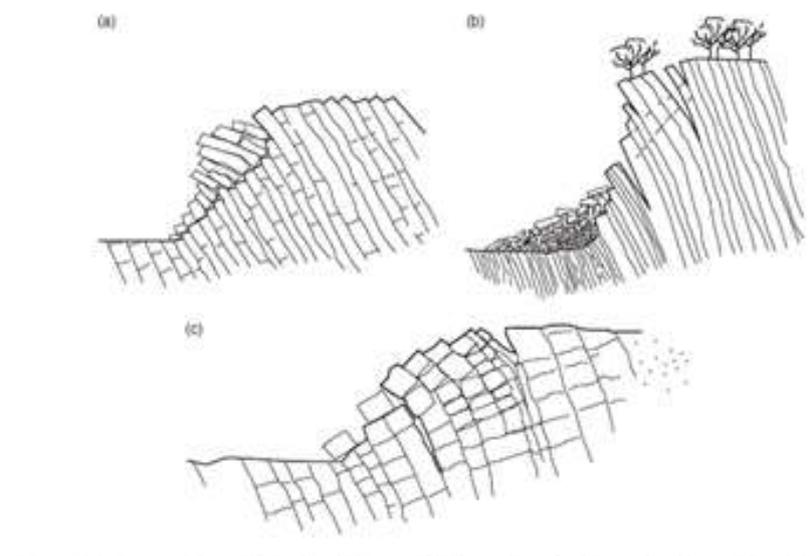
Com a ocorrência de deslizamento, escavação ou erosão no pé do talude, o processo de tombamento pode ser iniciado e propagado pelo maciço rochoso, formando fendas na rocha. Na parte inferior, blocos caídos podem dificultar o reconhecimento do modo de ruptura, como mostrado na Figura 7(b).

3.2.1.3.3. Tombamento bloco – flexural

O tombamento bloco– flexural se caracteriza pela flexão pseudocontínua ao longo de colunas divididas por diversas descontinuidades. O tombamento das colunas neste caso resulta de deslocamentos acumulados pelas juntas, ver Figura 7(c).

Devido ao grande número de pequenos movimentos nesta formação, ocorrem menos trincas e espaços vazios no maciço do que no tombamento flexural.

Figura 7 - Ocorrências comuns de tombamento: (a) Tombamento de blocos, colunas de rocha com juntas ortogonais muito espaçadas. (b) Tombamento flexural de placas de rochas mergulhando em direção à face. (c) Tombamento bloco flexural caracterizado pela flexão pseudocontínua de longas colunas através de movimentos acumulados ao longo de inúmeras juntas cruzadas.



Fonte: Modificado de Goodman & Bray (1976)

3.2.1.4. Ruptura por deslocamento e flambagem

Sjöberg (1999) pontua que algumas rupturas observadas em taludes não se encaixam nas descrições anteriores. São os casos das rupturas por *slab* (deslocamento), que incluem as rupturas por flambagem. Estes modos de ruptura podem se desenvolver em taludes com planos de acamamentos longos e contínuos e com descontinuidades orientadas paralelamente a inclinação da face do talude, ver Figura 8.

A ruptura por deslocamento pode ser iniciada no pé do talude ou uma ruptura planar através das descontinuidades. Além disso, pode ocorrer devido a saturação do material. Já a flambagem pode se desenvolver se houverem altas tensões axiais/laterais na camada de rochas e esta for muito fina em relação ao seu comprimento total.

É pontuado também que as condições para estas rupturas são específicas e de difíceis ocorrências, com poucos casos observados em campo.

Figura 8 - Exemplos de rupturas por deslocamento e flambagem



Fonte: Modificado de Piteau & Martin (1982) e Nilsen (1987)

3.3 Critérios de resistência para maciços rochosos

3.3.1 Critério de Hoek & Brown

De acordo com Hoek & Brown (2019), o critério generalizado de Hoek & Brown para estimativa da resistência de maciços rochosos, é expresso pela Equação (1).

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \cdot \left[mb \cdot \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right) + s \right]^a \quad (1)$$

O critério correlaciona a tensão principal maior (σ_1), a tensão principal menor (σ_3) com outros parâmetros do maciço rochoso. Sendo σ_c a compressão uniaxial da rocha intacta. Já m_b , s , e a são constantes relativas ao maciço rochoso, dadas pelas Equações (2) a (4).

$$m_b = m_i \cdot e^{[(GSI-100)/(28-14D)]} \quad (2)$$

$$s = e^{[(GSI-100)/(9-3D)]} \quad (3)$$

$$a = 1/2 + 1/6 \cdot (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

Em que o parâmetro D depende do grau que o maciço foi perturbado, por desmontes ou por alívio de tensões no maciço rochoso. O valor de D pode variar entre 0 e 1 e pode ser estimado a partir da tabela “*Guidelines for estimating disturbance factor D due to stress relaxation and blasting damage*” (Anexo 1).

O parâmetro m_i é relativo à rocha intacta, assim como a resistência a compressão uniaxial e a determinação ideal destes parâmetros ocorre por meio de ensaios triaxiais. Entretanto, quando não for possível a realização do teste, o valor de m_i pode ser estimado a partir da Tabela 1 e através da Tabela 2.

Tabela 1 - Valores estimados de m_i

Tipo de Rocha	Classe	Grupo	Textura							
			Grossa	Média	Fina	Muito fina				
Sedimentares	Clásticas	Conglomerados	21 ± 3	Arenito	17 ± 4	Siltito	7 ± 2	Argilito	4 ± 2	
			Brecha		19 ± 5		Grauvaque		18 ± 3	Folhelho
		Não-clásticas	Carbonatos	Calcário Cristalino		12 ± 3		Calcário Micrítico	9 ± 2	Dolomitos
				Evaporitos	Gipso		8 ± 2		Anidrito	
	Orgânicos						Giz	7 ± 2		
	Metamórficas	Sem foliação	Mármore	9 ± 3	Hornfels	19 ± 4	Quartzitos	20 ± 3		
				Levemente foliadas		Metarenito		19 ± 3	Migmatitos	29 ± 3
Foliadas							Xisto	12 ± 3		Filito

Ígneas	Plutônicas	Félsicas	Granito 32 ± 3	Diorito 25 ± 2	
			Granodiorito 29 ± 3		
		Máficas	Gabro 27 ± 3	Dolerito 16 ± 5	
			Norito 20 ± 5		
	Hipoabisales		Pórfiros 20 ± 5	Diabásio 15 ± 5	Periododito 25 ± 5
	Vulcânicas	Lava	Riolito 25 ± 5	Dacito 25 ± 3	Obsidiana 19 ± 3
		Andesito 25 ± 5		Basalto 25 ± 5	
	Piroclásticas	Aglomerado 19 ± 3	Brecha 19 ± 5	Tufos 13 ± 5	

Obs: (*) No caso das rochas foliadas o valor de *mi* se refere a direção normal dos planos de foliação.
Fonte: Adaptado de Marinós & Hoek (2000)

Tabela 2 - Estimativa de resistência à compressão uniaxial

Gradação	Termo	Resistência a compressão uniaxial	Índice de carga pontual (Mpa)	Estimativa de resistência em campo	Exemplos
R6	Extremamente resistente	> 250	> 10	A amostra só pode ser lascada com o martelo de geólogo	Basalto fresco, diabásio, gnaiss, granito, quartzito e cherte.
R5	Muito resistente	100 - 250	4 - 10	A amostra requer vários golpes do martelo para fraturar	Anfibolito, arenito, basalto, gabro, gnaiss, granodiorito, calcário, mármore, riolito e tufo.
R4	Resistente	50 - 100	2 - 4	A amostra requer mais de um golpe do machado para fratura.	Calcário, mármore, filito, arenito e xisto.
R3	Médio resistente	25 - 50	1 - 2	A amostra não pode ser arranhada ou descascada com estilete. Pode ser fraturada com um único golpe de martelo.	Argila, carvão, concreto, xisto e siltito.
R2	Fracó	5 - 25	**	Pode ser arranhada com dificuldade com estilete.	Giz, sal rochoso ou potassa.

R1	Muito fraco	1 - 5	**	Desintegra-se com golpe firme com a ponta do martelo de geólogo, pode ser arranhada por estilete.	Rocha muito intemperizada ou alterada.
R0	Extremamente fraco	0.25 - 1	**	Identificada com a unha	Solo residual.

Fonte: Adaptado de Hoek (2007)

O *Geological Strength Index* (GSI) é um índice proposto por Hoek (1994) e Hoek *et al.* (1995) utilizado no critério de Hoek & Brown juntamente com os parâmetros da rocha intacta, de forma a ajustar a estimativa de resistência do maciço rochoso estudado de acordo com as condições geológicas as quais ele foi submetido. O sistema é apresentado na Tabela 3 para maciços rochosos “blocados” e na Tabela 4 para maciços heterogêneos.

Tabela 3 - GSI para maciços rochosos

GSI - Geological Strength Index Índice Geológico de Resistência - maciços diaclasados A partir da litologia, da estrutura do maciço e das características das superfícies das suas descontinuidades, estimar o valor médio de GSI. Não ser demasiado preciso (é mais realista referir um intervalo de GSI=33-37 que afirmar GSI=35) É de referir que a tabela não tem validade para roturas determinadas pela estrutura do maciço. Quando ocorram descontinuidades desfavoravelmente orientadas determinarão o comportamento da escavação. No caso de descontinuidades com preenchimento que se possa deteriorar com a presença de humidade, resultando na diminuição da resistência ao corte, sugere-se o uso de valores mais à direita. A ação da pressão da água é analisada em função das tensões efectivas.		CONDIÇÕES DAS SUPERFÍCIES DAS DESCONTINUIDADES									
ESTRUTURA		MUITO BOAS - Muito rugosas, inalteradas	BOAS - Rugosas, pouco alteradas, vestígios de oxidação	RAZOÁVEIS - Lisas, moderadamente alteradas a alteradas	FRACAS - Polidas, superfícies muito alteradas com revestimento compacto ou com preenchimentos de material anguloso	MUITO FRACAS - Polidas, superfícies muito alteradas com revestimento ou preenchimento argiloso mole					
 INTACTA OU MACIÇA - Rocha intacta ou maciça com descontinuidades em pequena quantidade e muito afastadas.	90	80	70	60	50	40	30	20	10	NA	NA
 COMPARTIMENTADO - Maciço rochoso não perturbado, constituído por blocos cúbicos bem travados entre si, definidos por três famílias de descontinuidades.	85	75	65	55	45	35	25	15	NA	NA	
 MUITO COMPARTIMENTADO - Maciço rochoso parcialmente perturbado com blocos angulares e multifacetados, travados entre si, formados por 4 ou mais famílias de descontinuidades.	80	70	60	50	40	30	20	10	NA	NA	
 COMPARTIMENTADO/TECTONIZADO - Maciço rochoso dobrado e/ou cisalhado, com blocos angulosos formados por bastantes intercepções de várias descontinuidades. Persistência da xistosidade ou planos de fraqueza.	75	65	55	45	35	25	15	10	NA	NA	
 DESINTEGRADO - Maciço rochoso muito perturbado, muito fracturado, com mistura de material angular e arredondado.	70	60	50	40	30	20	10	NA	NA	NA	
 FOLIADO/LAMINADO - Maciço rochoso foliado, dobrado e tectonizado; A estrutura do maciço é conferida pela presença de planos de xistosidade ou de corte pouco espaçados; sem formação de blocos devido à prevalência da xistosidade.	65	55	45	35	25	15	10	NA	NA	NA	

Fonte: Marinos & Hoek (2005)

Tabela 4 - GSI para maciços rochosos heterogêneos

<p>GSI para Maciços Rochosos Heterogêneos (tipo "Fyisch").</p> <p>A estimativa do GSI se dá pela avaliação visual de características das descontinuidades: litologia, estrutura e condições da superfície. Essa estimativa deve ser precisa, ou seja, um valor entre 33 e 37 será mais realista do que 35. Este abaco não se aplica aos casos controlados estruturalmente, onde os planos de fraqueza em relação à escavação dominarem a estabilidade da obra. A resistência ao cisalhamento de rochas sujeita ao intemperismo químico será reduzida na presença de água, ou seja, uma superfície moderada será classificada como pobre. Análises de tensão efetiva serão realizadas quando a poropressão se fizer presente.</p> <p style="text-align: center;"><i>Composição e Estrutura</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>Condições da Superfície de Descontinuidade</i></p> <p>MUITO BOA: Recente e muito ríspida (não-intemperizada).</p> <p>BOA: Rígida, levemente intemperizada.</p> <p>MODERADA: Uniforme, moderadamente intemperizada e alterada.</p> <p>POBRE: Muito uniforme, ocasionalmente pedida, com alguma corrosão ou preenchida por fragmentos angulares.</p> <p>MUITO POBRE: Muito uniforme, pedida ou alburnosa, intemperizada com camadas de argila mole ou preenchimento.</p>
<p>A: Densos acantamentos, arenito muito fraturado. O efeito das camadas de peliticos sobre os planos de acantamento é minimizado pelo confinamento do maciço rochoso. Em taludes ou túneis rasos esses planos de acantamento podem causar instabilidade estrutural.</p> <p>B: Arenito com finas lentes de siltitos.</p> <p>C: Arenito e siltitos em iguais quantidades.</p> <p>D: Siltitos ou folhelho siltoso com camadas de arenito.</p> <p>E: Finos siltitos ou folhelho argiloso com camadas de arenito.</p> <p>F: Tecnicamente deformada, irregularmente dobrada/falada, siltito ou folhelho argiloso cisalhado com camadas de arenito fraturadas e deformadas formando uma estrutura quase caótica.</p> <p>G: Folhelho argiloso ou siltito deformado com, ou sem, poucas e finas camadas de arenito.</p> <p>H: Siltito ou argila normalmente tectonicamente deformada formando uma estrutura caótica com bolsos de argila. Finas camadas de arenito são transformadas em pequenos fragmentos de rocha.</p>	

Fonte: Marinós & Hoek (2005)

Hoek (2018) explicita que previamente a introdução do GSI, a aplicação do método de Hoek & Brown era baseada na correlação com o Rock Mass Rating (RMR) (BIENIAWSKI, 1976), um modelo de classificação de maciços rochosos. Desta forma, o valor do GSI era diretamente obtido a partir do valor de RMR, ver Equação (5).

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5 \quad (5)$$

Segundo o autor, esta relação se mostrava pouco confiável para maciços pouco resistentes e com peculiaridades geológicas não abrangidas pelo método. Desta forma, orienta-se a estimativa do valor do GSI pelas tabelas previamente apresentadas. (Hoek & Brown, 2018).

3.3.2. Critério de Mohr-Coulomb

O critério de Mohr-Coulomb se trata de um conjunto de equações relacionadas a tensão principal predizendo as condições nas quais um material isotrópico será levado a ruptura. O critério pode ser utilizado em função da tensão principal maior (σ_1) e principal menor (σ_3) ou ainda em função da tensão normal (σ) e cisalhante (τ) no plano de cisalhamento.

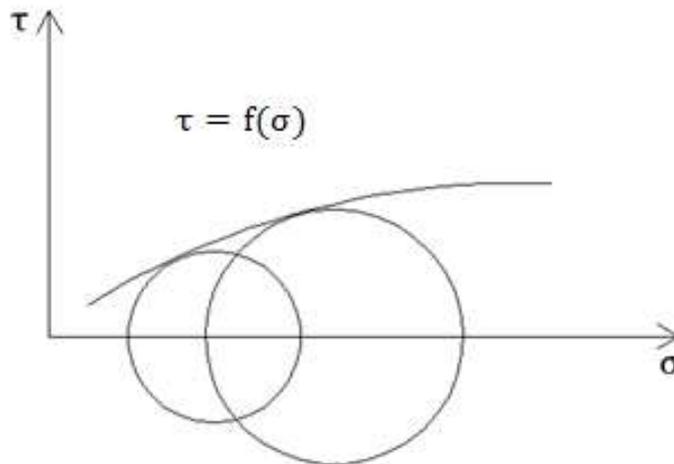
O critério de Mohr-Coulomb é uma contribuição de ambos os autores, sendo baseado na condição implicada por Mohr (1900) de que a ruptura depende apenas da maior e da menor tensão, podendo a forma do envelope ser linear ou não, ver Figura 9. Já a condição de Coulomb (1776) se baseia num envelope linear para determinar o ponto de falha no plano.

O critério de Mohr é definido pela Equação (10).

$$\tau = f(\sigma) \quad (10)$$

Onde τ representa a tensão cisalhante e $f()$ a função da tensão normal.

Figura 9 - Círculos de ruptura de Mohr



Fonte: Oliveira (2019)

Já o critério de Coulomb (1776) é definido por uma reta (Figura 9), composta pela tensão cisalhante em função da tensão normal, ver Figura 10 e Equação (11).

$$|\tau| = c + \sigma \tan \phi \quad (11)$$

Em que:

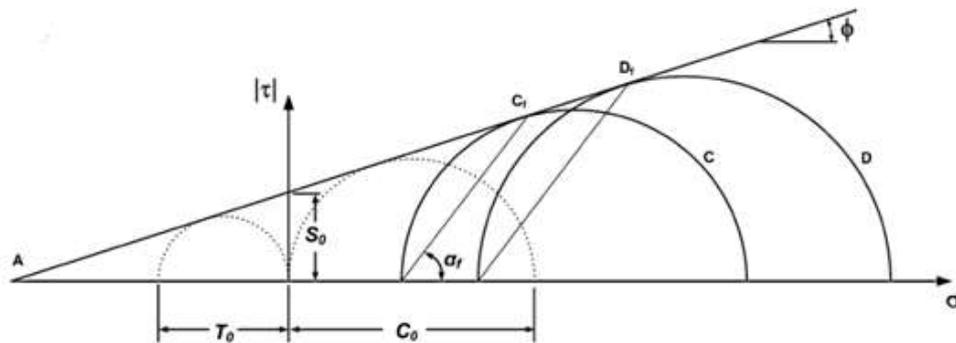
τ = tensão cisalhante;

c = coesão;

σ = tensão normal;

ϕ = ângulo de atrito.

Figura 10 - Critério de resistência de Mohr-Coulomb



Fonte: Labuz (2012)

O critério Mohr-Coulomb define que a ruptura do material ocorre no ponto em que a reta de resistência proposta por Coulomb intercepte os círculos de tensão de Mohr.

3.4 Análise de estabilidade de taludes - Método do Equilíbrio Limite

De acordo com Read & Stacey (2009) os métodos de equilíbrio limite utilizam a geometria representativa do talude, a resistência ao cisalhamento do maciço e/ou das discontinuidades, seu peso específico, as condições de percolação de água e outras condições externas de carga para determinar as condições de estabilidade de um talude por meio de um índice denominado fator de segurança.

O fator de segurança (F.S) pode ser definido como a relação entre as componentes resistentes e atuantes, podendo ser tensões, forças e/ou momentos (OLIVEIRA, 2019). Como exemplificado na equação 12 no caso de forças.

$$F.S = \frac{\Sigma \text{Forças resistentes}}{\Sigma \text{Forças atuantes}} \quad (12)$$

Desta forma, quando o fator de segurança é inferior a 1, há a indicação de instabilidade do talude, quando igual a 1, representa uma ruptura. Já nos casos em que o valor é superior a 1, indica estabilidade.

De acordo com Aguilera (2009), os métodos de equilíbrio limite consideram que no caso de ruptura as forças atuantes e resistentes se igualem numa superfície de ruptura. Logo, para se considerar a estabilidade, deve-se ter um fator de segurança acima de 1.

Diversos autores já citaram fatores de segurança recomendados para estruturas. De acordo com Read & Stacey (2009) alguns destes valores foram obtidos de forma empírica, considerando a confiabilidade dos dados, análises dos dados e simplificando suposições. Um exemplo citado pelos autores credita um fator de segurança aceitável para taludes de mineração está entre 1,2 e 2 (PRIEST & BROWN, 1983 *apud* READ & STACEY, 2009).

Na literatura se encontram diversas indicações de valores de fator de segurança aceitáveis, sendo comumente recomendados para condições normais de operação a longo prazo valores variando entre 1,25 e 2. Já em taludes de curto prazo os valores variam entre 1,25 e 1,3, enquanto para condições de carga severa varia entre 1,30 a 1,50. A tabela 5 apresenta alguns fatores de segurança recomendados para taludes.

Tabela 5 - Fatores de segurança recomendados para taludes

Material/Condições	FS	Referência
Solos não coesivos	1,3	Bjerrum (1973)
Solos coesivos	1,5	
Corrigidos para taxa de deformação (vane test) e efeitos anisotrópicos	1,3	
Valor mais alto para ruptura de consequência grave ou alta incerteza	1,25	Bowles (1979)
Valores baixos para carregamento temporário	1,25 -	Gedney & Weber (1978)
	1,5	
	1,5	
	1,3-1,5	
Valores baixos para carregamento temporário	1,3-1,4	Mayerhof (1970)
	1,5	Sowers (1979)
Condições permanentes de carregamento	1,5	US Navy Department (1962)
	1,25-1,3	
Temporário	1,25	SAICE COP (1989)
Permanente	1,5	SAICE COP (1989)

Fonte: Modificado de Read & Stacey (2009)

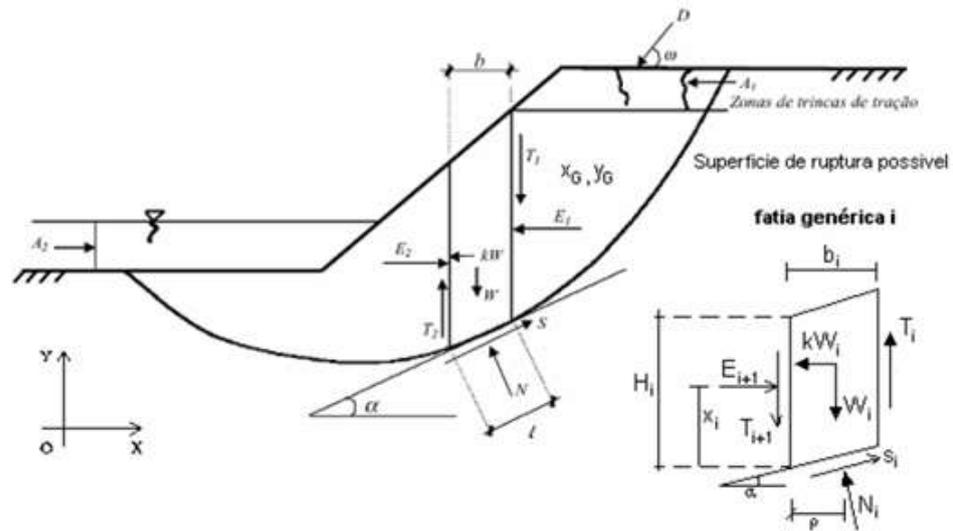
3.4.1 Método de Fatias

De acordo com Abramson *et al.* (1994), o método de fatias consiste na divisão da área mobilizada limitada pela superfície de ruptura em fatias, em que cada fatia é analisada

individualmente como um único bloco deslizante. Pela facilidade de se adaptar a diversas geometrias, condições de solo/rocha e cargas externas, o método de fatias é o mais utilizado em programas computacionais.

Considerando a teoria do equilíbrio limite, o método divide o maciço em n fatias as quais estão submetidas a um sistema de forças, a Figura 11 explicita uma fatia e as forças as quais ela está submetida.

Figura 11 - Método de fatias – forças as quais uma fatia está submetida



Fonte: Morote (2006)

Onde: W = Peso da fatia

kW = Componente horizontal da força de inércia

N = Força normal à base da fatia

E_1, E_2 = Componente horizontal das forças entre as fatias

T_1, T_2 = Componente vertical das forças entre as fatias

S = Força tangencial à base da fatia

D = Força aplicada na superfície

b = Largura da fatia

l = Comprimento da base da fatia

A_1, A_2 = Forças hidrostáticas.

Diversos métodos de fatias foram desenvolvidos e propostos na literatura, sendo utilizados na análise de estabilidade de taludes. Um dos métodos desenvolvidos é o método de Morgenstern-Price (1965), que é compatível com o método Geral de Equilíbrio Limite (GLE)

(CHUGH, 1986). O método pode ser aplicado para uma superfície de ruptura qualquer, selecionando uma função que possa descrever a variação dos ângulos das forças entre as fatias. Usualmente, o método GLE é aplicado devido a confiabilidade de seus resultados, graças as equações que satisfazem o equilíbrio de força e momentos numa análise (AGUILERA, 2009). Analogamente ao método GLE, o método de Spencer (1973) também considera o equilíbrio de forças e momentos. O método considera uma ruptura por superfície qualquer, entretanto, a resultante das forças entre as fatias possui inclinação constante através da massa deslizante (ABRAMSON, 2002 *apud* OLIVEIRA, 2019).

Os métodos de Bishop (1955) e Janbu (1973) possuem como vantagem a facilidade e rapidez do cálculo do fator de segurança. Porém, ambos os métodos não consideram completamente o equilíbrio de forças e momentos. Desta forma, podem apresentar fatores de segurança diferentes em relação a métodos que satisfazem estas condições de equilíbrio.

As diferenças entre os fatores de equilíbrio considerados pelos métodos podem ser observadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Métodos de equilíbrio limite e fatores de equilíbrio considerados

Método	Equilíbrio de Forças		Momento
	X	Y	
Bishop (1955)	Sim	Não	Sim
GLE	Sim	Sim	Sim
Spencer (1973)	Sim	Sim	Sim
Janbu (1973)	Sim	Não	Não

Fonte: Adaptado de Abramson *et al.* (2002)

3.4.2 Métodos de Equilíbrio Limite 3D

Os métodos de equilíbrio limite bidimensional supracitados, baseados em equilíbrio de forças e/ou momentos (Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price (GLE)), podem ser generalizados para o método tridimensional de colunas, onde as forças e momentos são decompostas em duas direções ortogonais. As forças verticais determinam as forças normais e as forças na base determinam as forças cisalhantes de cada coluna.

De acordo com a Rocscience (2019), os métodos de equilíbrio limite 3D encontram problemas não encontrados nos métodos bidimensionais, como buscar a superfície de deslizamento desconhecida em 3D e questões problemáticas nas análises de estabilidade

bidimensionais aumentam nos programas tridimensionais, como por exemplo como lidar com as forças de tração.

Métodos previamente propostos para o equilíbrio limite tridimensional eram obrigados a seguir algumas restrições, como:

- Assumir uma direção de deslizamento;
- Assumir plano de simetria;
- Não satisfazer força e/ou momento transversal;
- Precisava de sistema de coordenadas locais;
- Método simples de busca para superfícies críticas.

Os resultados se mostravam satisfatórios para problemas 3D simétricos, mas não para taludes mais complexos, assimétricos. Anteriormente estes métodos eram mais usualmente utilizados para retro análises de rupturas conhecidas do que para buscar novas superfícies críticas de ruptura.

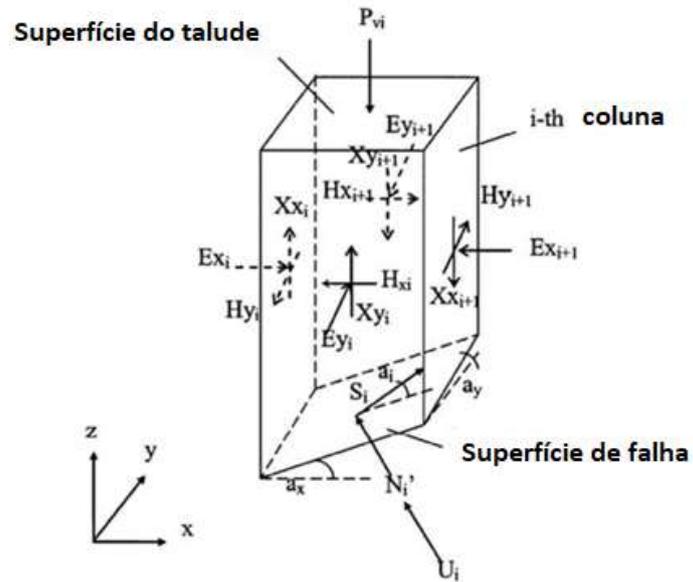
Huang *et al.* (2002) e posteriormente Cheng & Yip (2007) propuseram melhoras na metodologia do equilíbrio limite tridimensional, incluindo:

- Equilíbrio de forças e momentos em duas direções ortogonais;
- Cálculo da direção de deslizamento;
- Sistema 3D de equações estaticamente determinado.

Nesta metodologia, as forças consideradas numa coluna (como podem ser vistas nas figuras 12 a 15) qualquer são:

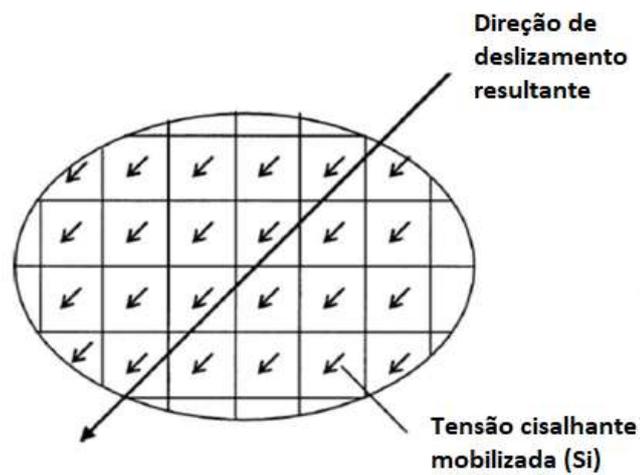
- N, U = Força normal efetiva e poro pressão na base da coluna;
- S = Força de cisalhamento mobilizada na base da coluna;
- a = Direção do deslizamento;
- E = Forças normais entre as colunas;
- X = Forças de cisalhamento verticais entre colunas;
- H = Forças de cisalhamento horizontais entre colunas;
- P = Força externa vertical;
- W = Peso da coluna.

Figura 12 - Vista 3D de forças atuantes em uma coluna



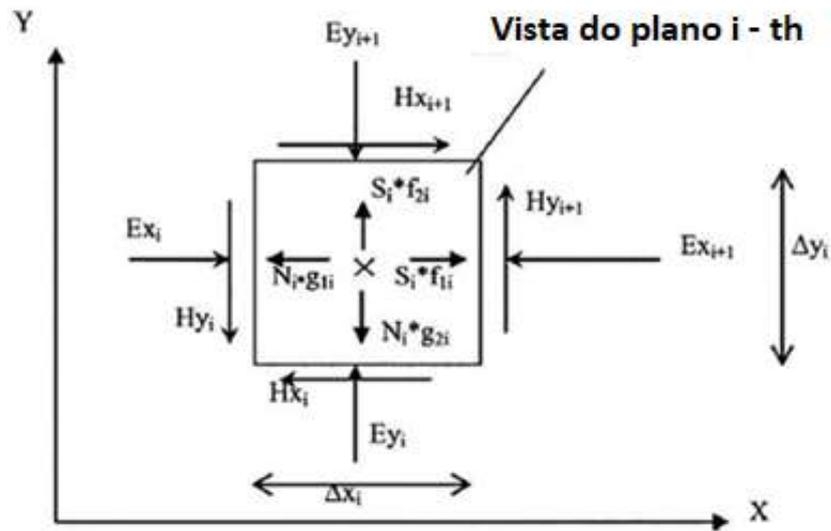
Fonte: Rocscience (2019)

Figura 13 - Vista de topo da direção resultante de deslocamento das colunas



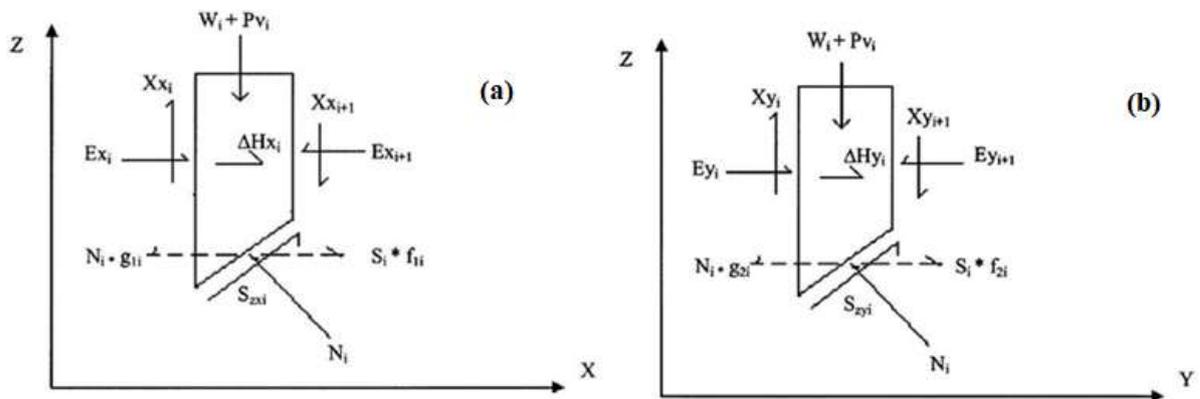
Fonte: Rocscience (2019)

Figura 14 - Equilíbrio de forças no plano XY em coluna qualquer



Fonte: Rocscience (2019)

Figura 15 - Distribuição de forças horizontais nos eixos: (a) z-x e (b) z-y.



Fonte: Modificado de Rocscience (2019)

O software Slide3 da Rocscience Inc. utiliza a formulação geral de Cheng e Yip (2007), com algumas melhorias, como a resolução eficiente de equações de equilíbrio limite em três dimensões, a possibilidade de se utilizar qualquer critério de ruptura, ferramentas que permitem a busca de superfícies de ruptura e o recurso de modelagem geométrica e interpretação dos respectivos dados.

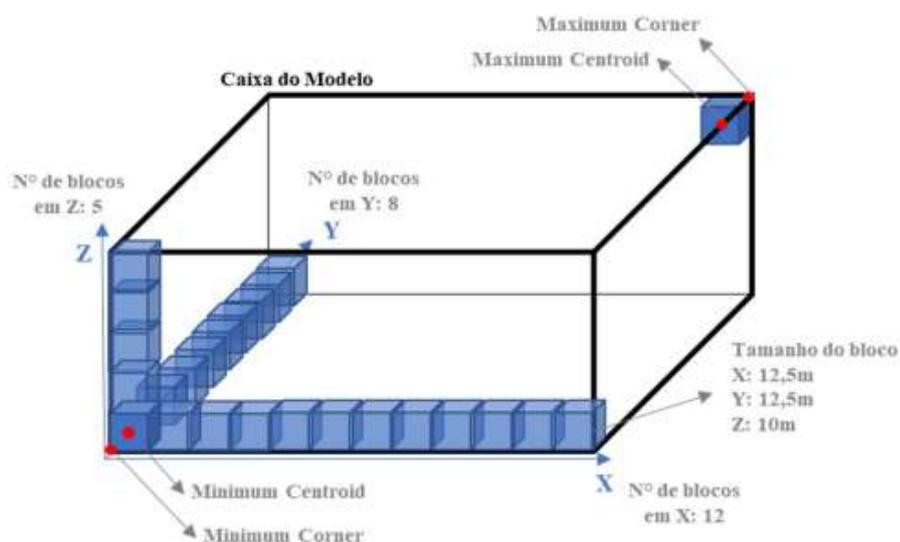
3.4.2.1. Utilização de modelo de blocos

O software Slide3 (2021) fornece a possibilidade de utilizar o modelo de blocos geomecânico para realização das análises tridimensionais. Tais modelos tem ampla utilização na rotina operacional de minerações, devido a sua versatilidade.

Os modelos de blocos permitem atribuir diversas variáveis para um mesmo bloco, facilitam a cubagem de volume e permitem o georreferenciamento dos centroides, de maneira a permitir a atribuição dos dados espacialmente (SALA, 2022).

Os modelos de blocos são construídos com base em parâmetros geométricos, que permitem a utilização dos mesmos em diferentes softwares utilizados na mineração. Os principais parâmetros são os corners ou centroides mínimo e máximo, dimensão do bloco, número de blocos em cada eixo e a existência ou não de rotação do modelo (SALA, 2022). A Figura 16 explicita os parâmetros geométricos de um modelo de blocos.

Figura 16 - Parâmetros geométricos de um modelo de blocos



Fonte: Sala (2022)

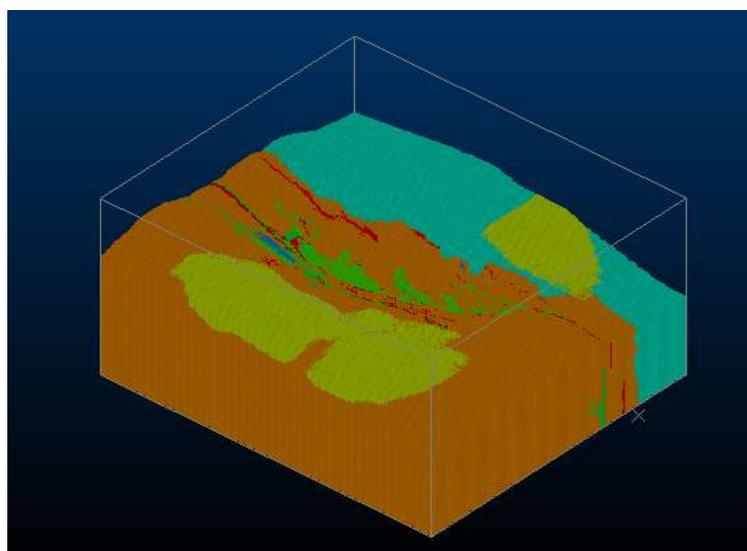
Tais modelos são usualmente utilizados na rotina operacional de minerações, normalmente associados ao planejamento de lavra. Entretanto, as características geomecânicas dos maciços rochosos podem ser inseridas em um modelo geológico de blocos, como a resistência da rocha, classe, condição de água, entre outras (AQUINO, 2020).

A utilização de geoestatística para a geomecânica é ainda pouco difundida na mineração, porém vem ganhando projeção com diversos estudos recentes. A maioria dos trabalhos utiliza krigagem ordinária, por indicadores e simulações geoestatísticas (AQUINO, 2020).

A utilização do modelo de blocos geomecânico para as análises tridimensionais se mostra interessante devido a facilidade operacional que proporciona, trazendo agilidade para diferentes possíveis análises.

A Figura 17 exemplifica o modelo de blocos utilizado no desenvolvimento deste trabalho, sendo exibidas as divisões litológicas do local.

Figura 17 - Modelo de blocos cortado por topografia e filtrado por litologia



Fonte: O autor (2022)

3.4.3 Aplicações da análise equilíbrio limite tridimensional e utilização do Slide3 na literatura

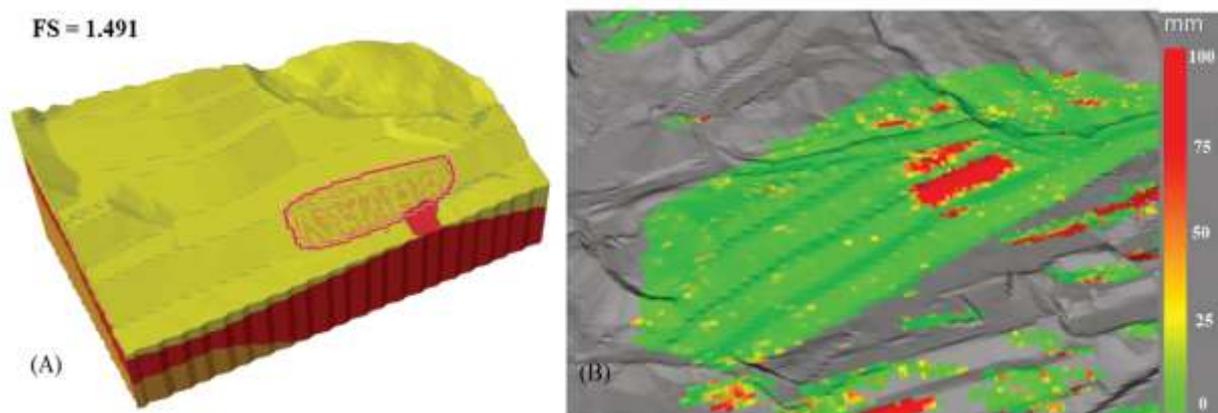
O software Slide3 (2021) permite a importação de *wireframes* 3D, que podem representar topografia, superfícies geológicas, falhas, descontinuidades, entre outros, que podem ser importados diretamente para serem utilizados no cálculo de equilíbrio limite. Além disso, é possível realizar a importação de dados de monitoramento por radar, assim como imagens de satélite.

McQuillan *et al.* (2020) apresentam um estudo de caso sobre a integração de dados de radar de abertura sintética (SAR) com a modelagem por equilíbrio limite 3D e elementos finitos em 3D, utilizando respectivamente os softwares Slide 3 e RS3.

A técnica SAR utiliza um feixe de ondas que atingem o mesmo alvo durante várias vezes em uma mesma varredura. Para cada pixel de uma imagem SAR, um valor de fase é obtido ao longo da linha de visada do radar. Comparando a diferença de fases entre as leituras, é possível detectar pequenas variações (sub-milimétricas) de deslocamento do talude.

O estudo de caso utilizado por McQuillan *et al.* (2020) se localiza numa mina de ouro, na Papua Nova Guiné. A Figura 18 (a) explicita uma análise inicial realizada por meio de equilíbrio limite tridimensional, indicando um fator de segurança igual a 1.491. A imagem (b) mostra um mapa de deslocamento, indicando deformação dos taludes nas bancadas superiores da cava. Tal deformação foi notada após vários dias de chuvas fortes.

Figura 18 - (a) Análise inicial da área por método de equilíbrio limite tridimensional. (b) Mapa de deslocamento de radar.



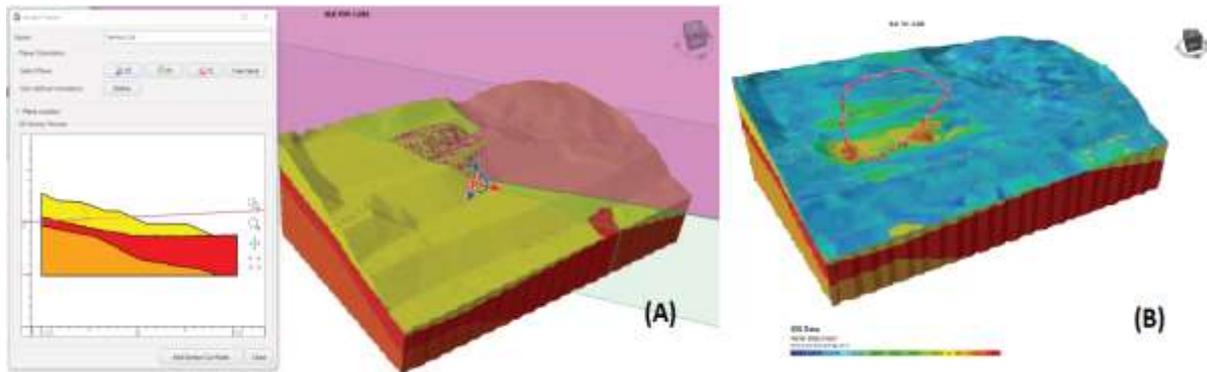
Fonte: Adaptado de McQuillan *et al.* (2020)

Após inspeções visuais realizadas no local, foi relatada uma escarpa, com fissuras de 20 a 50 cm de largura na crista da zona de falha. Posteriormente constatou-se que o mecanismo de ruptura estava relacionado a uma falha de baixo mergulho em direção à cava, preenchida com argilito recoberta por colúvio. A poro pressão indicada por piezômetro próximo indicava que o talude estava próximo da saturação total.

Após a obtenção destes dados, os modelos de análise foram atualizados, diminuindo consideravelmente o fator de segurança obtido anteriormente, resultando em 1.03 para o método de equilíbrio limite tridimensional e em 0.92 para o método de elementos finitos tridimensional.

A Figura 19 (a) apresenta o resultado da retro análise realizada e seu fator de segurança obtido, além de explicitar o deslizamento ao longo de um plano de falha sub-horizontal. Já a imagem (b) sobrepõe as imagens dos dados de monitoramento obtidos pelo radar IBIS-FM e a superfície de deslizamento modelada, apresentando uma boa correlação entre os dados.

Figura 19 - (a) Resultado da análise de equilíbrio limite retro-analisada, explicitando deslizamento ao longo de plano de falha sub-horizontal. (b) Imagem do radar IBIS-FM sobreposta a imagem do plano crítico de deslizamento



Fonte: McQuillan *et al.* (2020)

Realizadas as análises, foram observados resultados positivos na sobreposição dos modelos, assim como entre as localizações da superfície de deslocamento previstas e a movimentação real do talude. Opções de mitigação de danos foram determinadas a partir de uma série de modelos adicionais de estabilidade. Determinou-se então que o procedimento de inserção de drenos horizontais poderia diminuir o movimento do talude, melhorando o fator de segurança entre 15 e 30%.

Após a realização das obras dos primeiros drenos notou-se a estabilização de deslocamento no talude, como pode ser observado no gráfico de deslocamento presente na Figura 20.

Figura 20 - Gráfico de deslocamento do radar IBIS-FM, pré e pós despressurização do talude



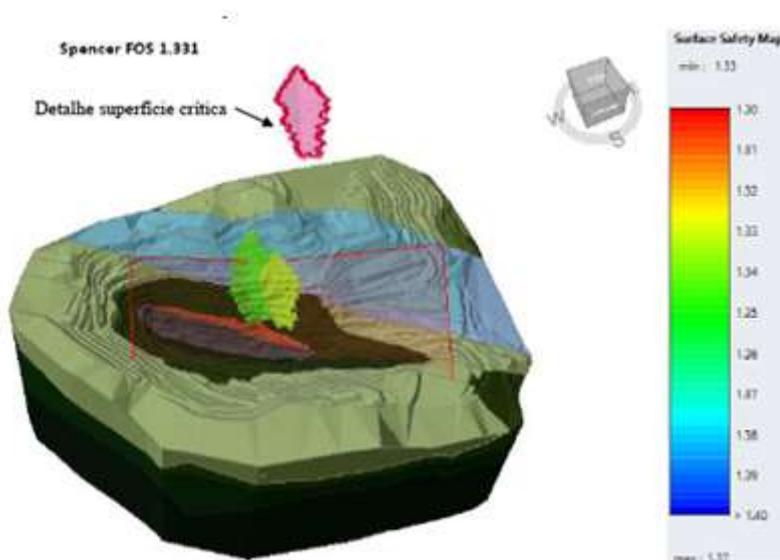
Fonte: Adaptado de McQuillan *et al.* (2020)

Os autores concluem que a correlação dos métodos de equilíbrio limite e elementos finitos com a integração dos dados de monitoramento por radar fornece um importante recurso para analisar as condições e refinar os modelos de estabilidade dos taludes. Esta combinação foi utilizada no caso para determinar ações de remediação na cava em estudo.

Avelar (2019) utilizou o software Slide3 no estudo de uma ruptura por cunha de grande proporção ocorrida em talude de mina para determinar os parâmetros geomecânicos por meio de análise inversa e construir o modelo tridimensional a partir de análise de dados fornecidos previamente.

Com a utilização de parâmetros médios, os valores obtidos de fator de segurança foram superiores a 1.3, utilizando-se os métodos de análise disponíveis (Bishop, Janbu, Spencer e Morgenstern-Price (GLE)). Tais resultados são considerados próximos ao mínimo aceitável na literatura.

Figura 21 - Análise inicial realizada com parâmetros médios em condição estável, FS=1.33

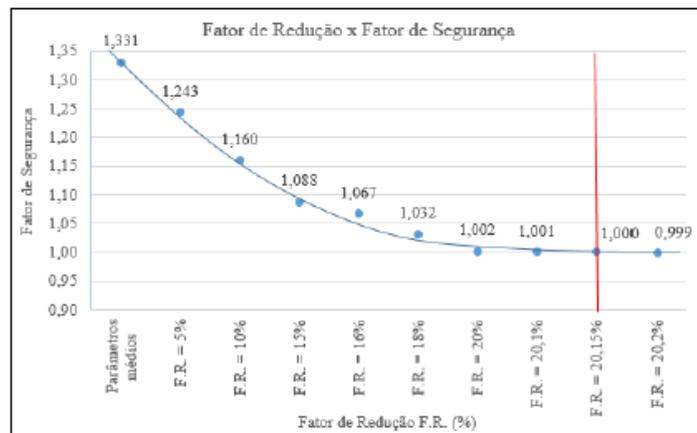


Fonte: Oliveira (2019)

Após as análises iniciais, as superfícies críticas geradas pelo software foram comparadas entre si, obtendo maior similaridade na forma os métodos de Spencer e Morgenstern-Price (GLE).

Desta forma, foi realizada uma série de análises inversas, reduzindo gradualmente os valores dos parâmetros das descontinuidades, até a obtenção de fator de segurança = 1.0. A redução gradual do fator de segurança a partir da diminuição dos valores dos parâmetros pode ser vista na Figura 22.

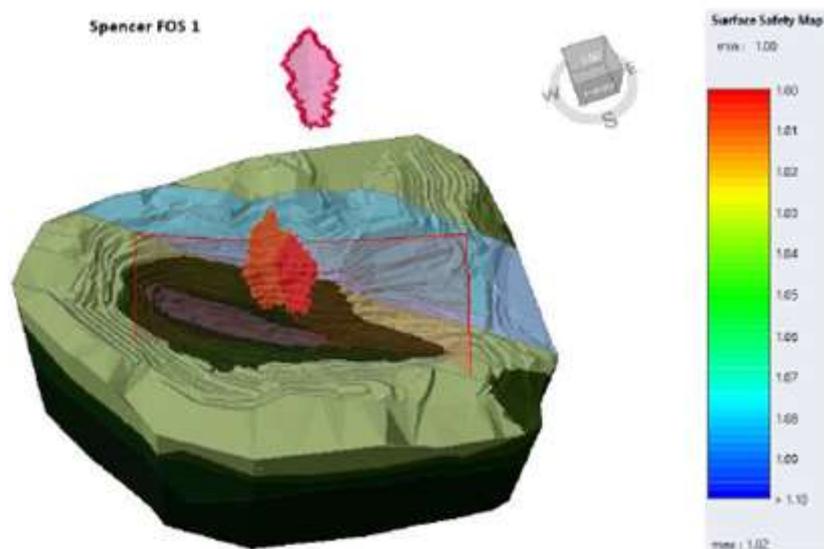
Figura 22 - Gráfico correlacionado fator de redução e fator de segurança



Fonte: Oliveira (2019)

O resultado da análise de estabilidade correspondente ao fator de segurança igual a 1.0 e a superfície crítica de ruptura podem ser observados na Figura 23:

Figura 23 - Análise de estabilidade correspondente a FS=1.0



Fonte: Oliveira (2019)

Oliveira (2019) conclui que as reduções percentuais progressivas dos valores dos parâmetros das discontinuidades refletiram diretamente na redução do fator de segurança, propondo posteriormente uma adaptação de retaludamento da área afetada pela ruptura.

4 ÁREA DE ESTUDO

As presentes análises se baseiam em uma área de mineração de manganês, localizada no estado de Minas Gerais, sendo uma mineração à céu aberto que apresenta um histórico de rupturas de taludes. A cava pode ser visualizada na Figura 24.

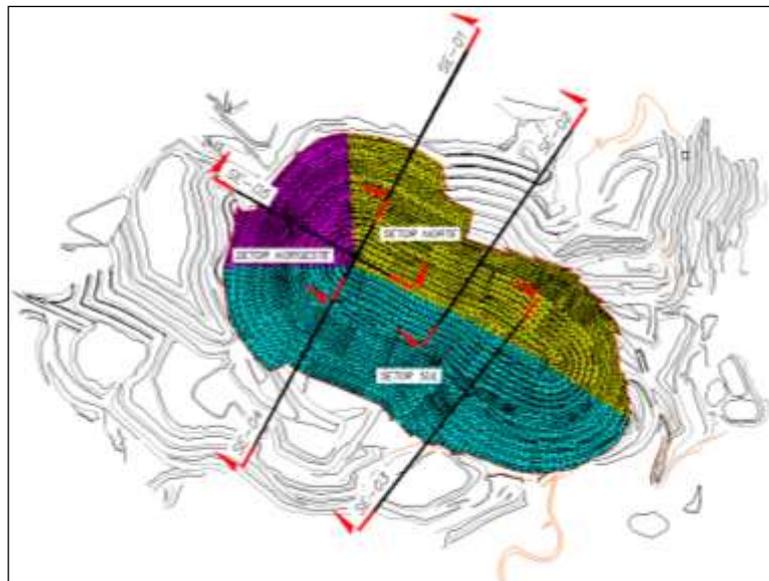
Figura 24 - Região da cava em estudo



Fonte: Google Earth, 2022.

A mineradora divide a cava em três regiões distintas, denominadas Parede Sul, Parede Norte e Parede Noroeste, conforme pode ser verificado na Figura 25. De maneira a simplificar as interpretações das análises bidimensionais, serão consideradas apenas os setores/paredes Norte e Sul, dividindo a cava longitudinalmente.

Figura 25 - Divisão de setores da cava

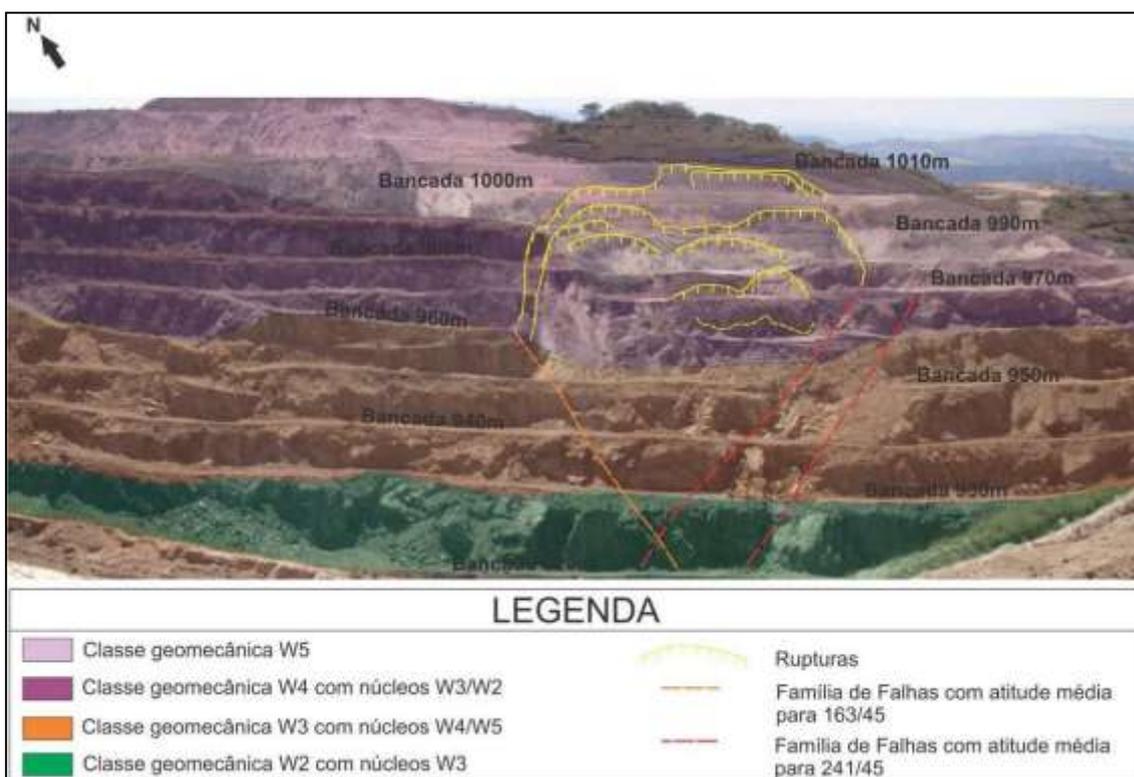


Fonte: Empresa proprietária

De acordo com documentos fornecidos pela empresa proprietária, o histórico indica rupturas ocorridas no talude norte da cava e na porção superior do talude sul. No talude sul foram observadas rupturas na escala de bancada e rupturas de maior magnitude, provocadas provavelmente por uma associação entre descontinuidades e enfraquecimento do maciço rochoso.

Já no talude norte, notaram-se movimentações maiores, chegando o mesmo a ser interditado devido à instabilidade. Devido a tais problemas apresentados, foram realizados estudos geológico-geotécnicos complementares e específicos para tal região. A Figura 26 demonstra a delimitação da superfície de ruptura ocorrida na região, que demonstra uma ruptura circular no topo e por cunha abaixo, bem como as famílias de falhas que delimitam o eixo de uma cunha principal, sendo a região circular o material mais alterado no local.

Figura 26 - Descritivo de ruptura ocorrida no talude norte



Fonte: Disponibilizado pela mina

Avelar (2019) discorre sobre tal ruptura em seu trabalho, realizando uma série de análises, reduzindo gradualmente os valores de parâmetros geomecânicos das descontinuidades envolvidas na ruptura supracitada. Diferentemente destas análises, o autor realizou a confecção do modelo através dos graus de alterações presentes na cava.

5 METODOLOGIA

5.1 Adaptação do modelo de blocos

Foi disponibilizado pela empresa proprietária o modelo geomecânico de blocos da cava em estudo. Tal modelo foi desenvolvido a partir de dados de sondagens, mapeamentos no maciço rochoso aflorado e diversos estudos previamente realizados no local.

Para maximizar a precisão da análise de estabilidade, escolheu-se utilizar as litologias de acordo com sua classe RMR. Tal modelo trazia ambas as informações, possibilitando tal classificação. O modelo inicialmente disponibilizado contava com mais de 2.2 milhões de blocos. No caso, a classificação em litologias e RMR estavam disponíveis. Desta forma, uma nova coluna de classificação foi criada, reunindo as informações de litologia e a classificação RMR naquele bloco.

A área de estudo foi organizada e setorizada segundo sete litologias principais, sendo elas: Anfibolito, Minério, Granitoide, Granodiorito, Xisto e Xisto Grafitoso, além de Pilha de Estéril. Por exemplo, um xisto classificado com classe RMR III é identificado no modelo como Xi_3.

Desta análise, foram obtidos 25 grupos, sendo todo material de pilha de estéril (presente no modelo tridimensional) classificado unicamente, enquanto cada litologia possui quatro classificações (II, III, IV e V), considerando que o modelo reúne as classes RMR I e II em apenas um grupo.

Ao finalizar tal procedimento, notou-se a presença de blocos não classificados pela Litologia/Classe RMR. Tal fato se deve a questão de determinados blocos não possuírem classificação RMR. Após essa verificação, foi realizada a tentativa de preenchimento do modelo pelo método de células vizinhas, utilizando o software Studio RM (DATAMINE, 2021).

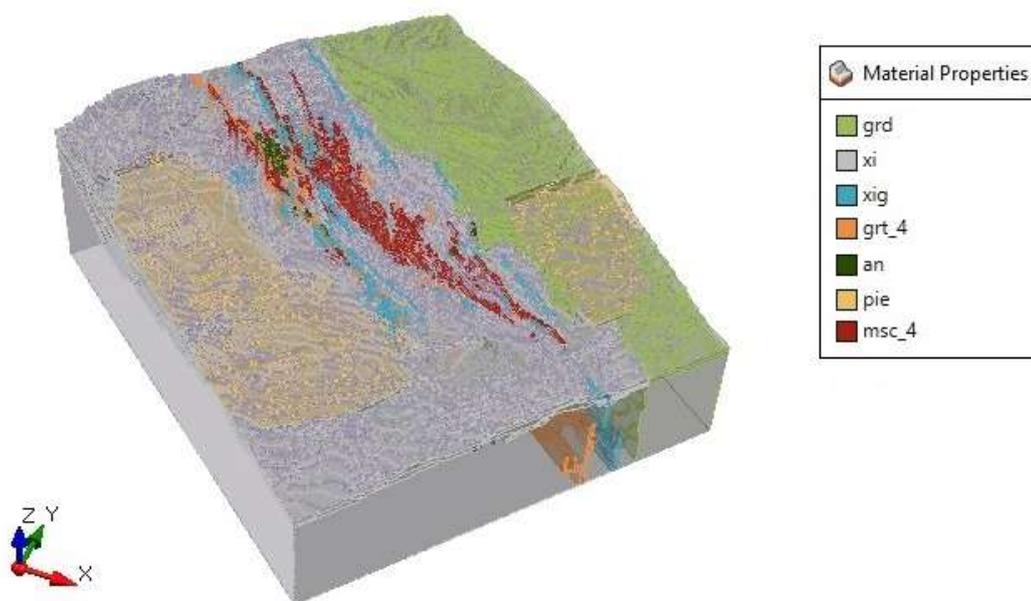
Verificando o resultado final, percebeu-se que a diversidade de materiais e o tamanho do modelo resulta em uma propagação errônea de materiais pelas células vazias, atribuindo litologias/classificações RMR incompatíveis com o restante do modelo.

Para que tal falha não influenciasse o resultado final, adotou-se um procedimento “manual” de preenchimento das células vazias. Foi percebido que dentro de cada litologia, existia uma relação clara entre o Grau de Alteração (W) e o RMR determinado.

5.2 Inserção do modelo de blocos, nível de água e parâmetros de resistência

Após o modelo estar adaptado, o mesmo foi exportado ao software de análise Slide3. Além do modelo, foram importados dados de nível de água local e definidos os parâmetros de resistência a serem utilizados. A Figura 27 explicita o modelo visualizado por litologias.

Figura 27 - Modelo inserido no software Slide 3, visualização por litologias



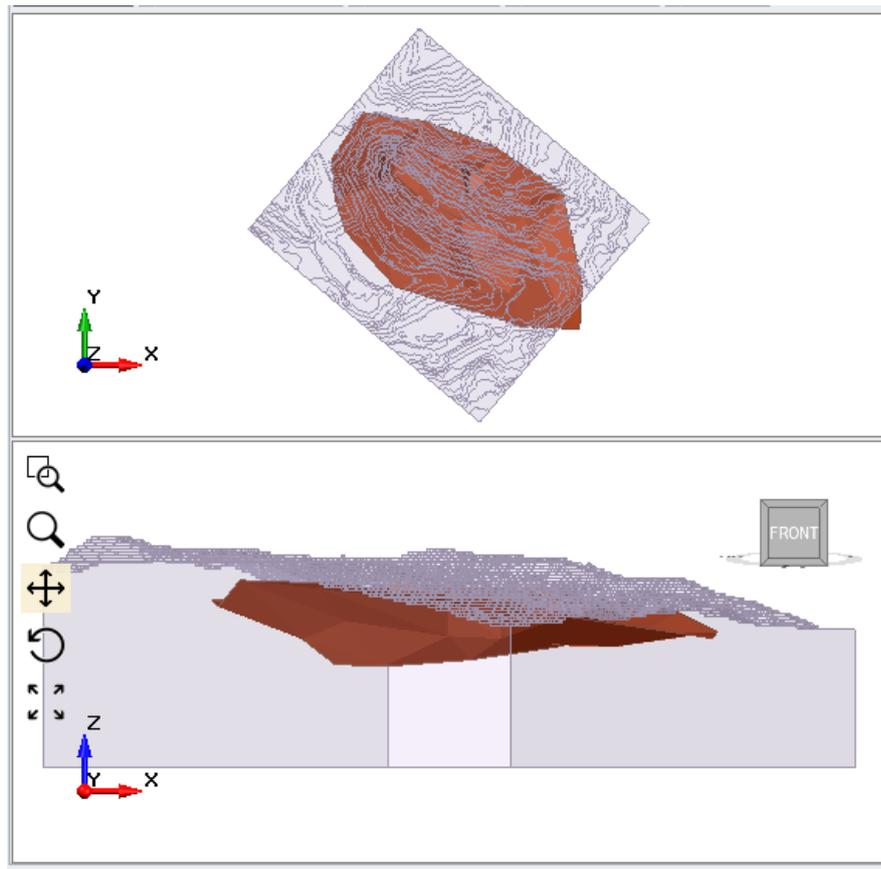
Fonte: O autor (2022)

5.2.1 Nível d'água

O nível de água importado inicialmente foi definido a partir de uma tabela disponibilizada pela empresa proprietária, sendo selecionados os dados de medidores de nível de água do mesmo período da topografia utilizada, do mês de fevereiro. É importante salientar que fevereiro se trata de um período chuvoso, que se inicia normalmente no fim do ano anterior.

Para tal, foi considerado que a cava em estudo possui sistema de drenagem/bombeamento efetivo, sem acúmulo de água no fundo de cava. O nível d'água elaborado pode ser verificado na Figura 28.

Figura 28 - Nível d'água inserido no modelo tridimensional



Fonte: O autor (2022)

5.2.2 Parâmetros mecânicos e físicos

As propriedades mecânicas e físicas definidas para as diversas litologias foram fornecidas pela empresa proprietária da cava em estudo e podem ser vistas na Tabela 7. Tais valores foram obtidos a partir de ensaios laboratoriais ou levantamentos de campo, para os valores demarcados com “*”, enquanto os demais valores foram determinados a partir da bibliografia e da experiência dos profissionais responsáveis pelos estudos.

Uma modificação na interpretação realizada foi a utilização do parâmetro “D” (*Disturbance Factor*) com o valor igual a 1.0, por se tratar de uma mina de grande porte com produção industrial, sendo o maciço afetado pelos desmontes de rocha e pelo alívio de tensões gerado pela remoção do material da cava.

Tabela 7 - Parâmetros geomecânicos utilizados nas análises

Litologia	Sigla	Classe (RMR)	Peso Específico (kN/m ³)		Parâmetros de Resistência do maciço					
			Natural	Saturado	Mohr-Coulomb		Hoek-Brown			
					Coesão (kPa)	Atrito (°)	σ_0 (Mpa)	D	mi	GSI
Quartzo-Biotita Xisto	XI	I/II	28*	30			32*	1	10	65
		III	25	27			26	1	7	48
		IV	25	27	45	35				
		V	18	19	24*	26*				
Xisto Grafítico	XGT	I/II	28*	30			55*	1	12	60
		III	25	27			40	1	9	40
		IV	25	27	45	32				
		V	19	21	30	20				
Anfibolito	AN	I/II	28*	30			110	1	30	66
		III	25	27			70	1	25	50
Monzogranito	GRT	I/II	26*	28			150	1	30	70
		III	23	25			40	1	20	40
		IV	23	25	70	35				
		V	19	21	23*	24*				
Granodiorito	GRD	I/II	26*	28			153*	1	30	70
		III	23	25			100	1	25	45
		IV	23	25	75	40				
		V	18	19	5	25*				
Minério Sílico Carbonatado	MSC	I/II	33*	35			188*	1	30	75
		III	30	32			90	1	25	45
Pilha de Estéril	PIE	Não se aplica	20	22	5	28				

Fonte: Adaptado de material fornecido pela mina

Nota-se que alguns parâmetro não atendem as faixas de RMR propostas por Bieniawski (1989) na tabela de correlação entre RMR e parâmetros geomecânicos, entretanto, opta-se por utilizar tais valores, definidos em testes de laboratório e experiência dos profissionais envolvidos.

É importante ressaltar que o modelo de blocos fornece como resultados blocos de litologias com RMR não encontrados em campo, sendo as litologias Anfibolito e Minério Sílico Carbonático com RMR iguais a IV e V. Trata-se de um desvio na elaboração do modelo geomecânico, representando um número ínfimo de blocos totais (0,04%), como pode ser visto no Tabela 8.

Tabela 8 - Número de blocos por litologia e classe RMR

Litologia	Número de Blocos	Classe RMR	Número de Blocos
Anfibolito	4765	I/II	3255
		III	1356
		IV	84
		V	70
Granodiorito	703211	I/II	554327
		III	66625
		IV	19614
		V	62645
Xisto	1363583	I/II	1126403
		III	111138
		IV	23017
		V	103025
Xisto Grafítico	47034	I/II	41921
		III	3079
		IV	609
		V	1425
Granitoide	60445	I/II	55728
		III	3740
		IV	141
		V	836
Minério Sílico Carbonatado	57609	I/II	54845
		III	1936
		IV	128
		V	700
Pilha de Estéril	57518	-	57518
Modelo	2294165		

Fonte: O autor (2022)

Os blocos considerados inadequados quanto a classificação RMR foram mantidos no modelo, com a inserção de parâmetros geomecânicos relativos à classificação RMR de classe III.

5.3 Realização das análises tridimensionais

Após a inserção do modelo, do nível de água e a determinação dos parâmetros geomecânicos a serem utilizados, foram realizados ciclos de análises tridimensionais, buscando obter o resultado mais relevante com relação a rupturas rotacionais em escala interrampa/global na área de estudo.

Para estas análises, utilizaram-se os métodos de Morgenstern Price (GLE) e Bishop. A fim de comparar todos os métodos disponíveis no software, foi realizada uma análise posterior utilizando também os métodos de Spencer e Janbu.

A utilização de diferentes métodos de análise possibilita a comparação de resultados em um mesmo estudo e a verificação de coerência entre os diferentes resultados, de maneira a selecionar o melhor método a ser considerado para análise.

O método de busca utilizado foi o *cuckoo search*, devido à sua possuir a maior eficácia na busca de superfícies de ruptura. O número de iterações e *nests* também foi alterado em busca de um resultado otimizado, sendo utilizado 80 iterações e 40 *nests*, o dobro do número utilizado como padrão pelo software.

O método *cuckoo Search* pode buscar superfícies esféricas ou elipsoidais. A busca realizada se inicia com um número – n – de superfícies de falha, sendo cada uma destas associada a um *nest*. Para cada *nest*, uma nova superfície aleatória baseada na superfície atual é gerada. Estas novas superfícies são comparadas com as soluções em um *nest* aleatório, e caso o fator de segurança seja menor, substituirão a solução naquele ninho (ROCSCIENCE, 2022).

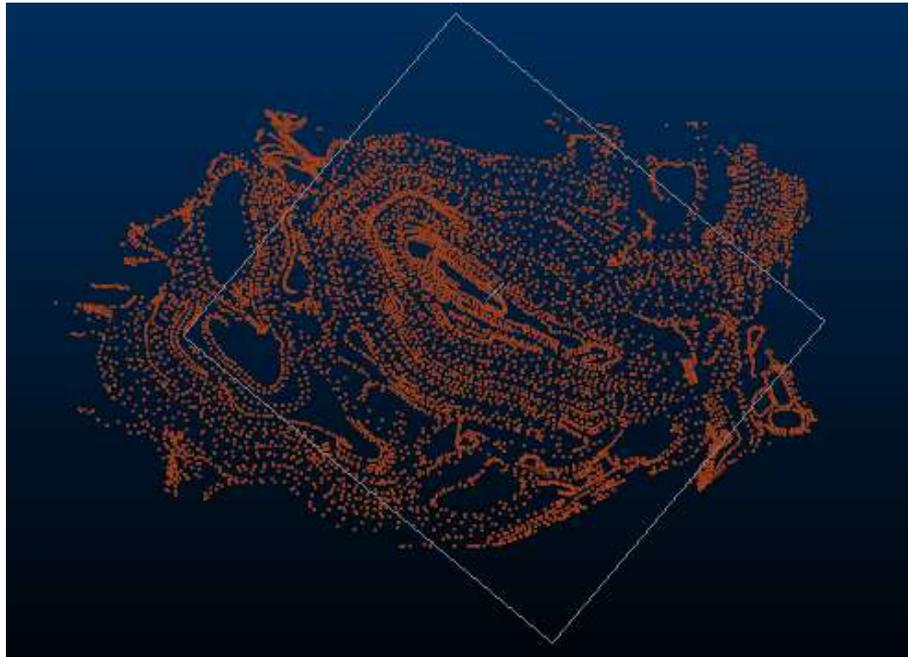
Uma pequena fração das “piores” soluções no número n de *nests* será descartada e substituída por novas soluções totalmente aleatórias. Esse processo de busca e obtenção de superfícies é repetido por um número determinado de iterações (ROCSCIENCE, 2022).

A opção *Surface Alterating Optimization* foi utilizada durante todas as análises. Tal opção se trata de um algoritmo de otimização, que modifica as geometrias obtidas nas análises iterativamente, obtendo assim o menor fator de segurança naquela região (ROCSCIENCE, 2020, *apud* LANNA *et al.*, 2021).

A topografia cedida pela empresa proprietária não contempla toda a região do modelo de blocos geomecânico. Desta forma, a topografia foi adaptada de maneira a possibilitar sua

inserção no software, entretanto, tais áreas foram restringidas de buscas, de maneira a evitar que superfícies de rupturas hipotéticas sejam buscadas em tais regiões. A Figura 29 compara a topografia fornecida com os limites do modelo de blocos utilizado.

Figura 29 - Comparativo entre topografia em pontos fornecida pela empresa proprietária e os limites do modelo de blocos.



Fonte: O autor (2022)

Inicialmente, realizou-se uma análise geral do modelo, sem restrições de área ou tamanho das rupturas, direcionando seus resultados a Parede Norte do local.

Posteriormente, a fim de buscar regiões de maior dimensão de ruptura, foi estipulada uma profundidade de ruptura mínima de 30 metros. Após o resultado, restringiu-se a região da Parede Norte, explicitando o resultado da busca também na Parede Sul.

Foram realizadas então diferentes análises no modelo:

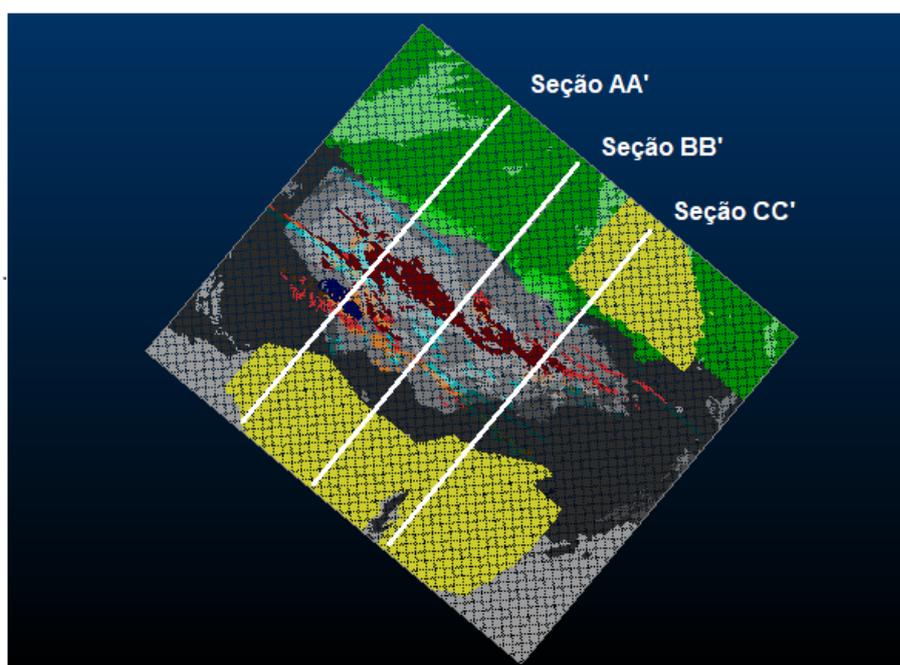
- I. análise geral do modelo, sem restrições;
- II. análise geral do modelo, com restrições de região - direcionado à Parede Sul;
- III. análise geral do modelo com restrição de escala de ruptura (30m);
- IV. análise do modelo com restrição de escala de ruptura (30m) e de região – direcionado a Parede Sul;
- V. análise do modelo com restrição de escala de ruptura (30m) com todos os métodos disponíveis.

5.4 Realização de análises bidimensionais

A partir do modelo tridimensional, é possível exportar seções bidimensionais para análise. Tal ferramenta se mostra interessante para a verificação dos fatores obtidos e a definição da real necessidade de uma análise tridimensional. Entretanto, tal ferramenta não se mostra funcional para modelo de blocos, sendo uma limitação do software.

Desta forma, foi necessária a exportação de imagem das seções bidimensionais do software Studio RM (DATAMINE, 2021) para o Slide2 (2021). A partir destas imagens, foram determinados manualmente os limites da geometria e dos materiais. A Figura 30 explicita as seções determinadas:

Figura 30 - Seções bidimensionais sobre o modelo de blocos no software Datamine



Fonte: O autor (2022)

Foram selecionadas três seções bidimensionais a serem analisadas, verificando a estabilidade para as paredes Norte e Sul da cava, resultando num total de seis análises. As seções foram definidas a partir de seções previamente disponibilizadas pela empresa proprietária, utilizadas para identificação de feições geológicas locais. Tais seções podem ser vistas na Figura 30.

O nível de água foi verificado utilizando o software Leapfrog (2021), onde o modelo de nível d'água local foi exportado como *wireframe* para o software Studio RM (Datamine, 2021)

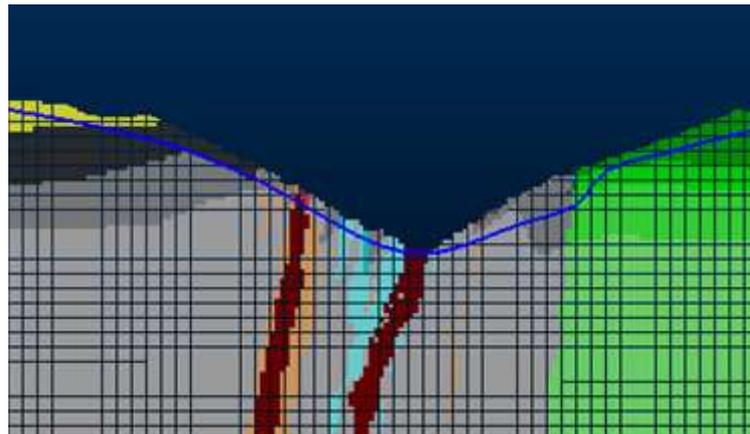
e assim inserido nas seções bidimensionais a serem exportados ao Slide2 (2021). As Figuras 31 e 32 mostram os níveis da seção B' nos softwares Leapfrog (2021) e Studio RM (Datamine, 2021), respectivamente:

Figura 31 - Nível d'água da seção B no software Leapfrog



Fonte: O autor (2022)

Figura 32 - Nível d'água (em azul) visto na seção B no software Datamine. Wireframe vista na interseção da seção do modelo tridimensional.



Fonte: O autor (2022)

As seções definidas para as análises bidimensionais foram divididas em duas regiões: “Parede Sul” e “Parede Norte”, sendo limitadas pelo fundo da cava. Tais análises foram realizadas utilizando os mesmos parâmetros geomecânicos que os utilizados no modelo

tridimensional e o mesmo modelo de nível d'água desenvolvido. Os métodos selecionados para análise foram GLE e Bishop.

Foram realizadas análises bidimensionais utilizando três diferentes métodos de restrição:

- I. Sem restrições – Tal método busca trazer o menor Fator de Segurança obtido naquela seção, normalmente apontando rupturas de bancada.
- II. Restrição de rupturas com 10 metros de profundidade – Tal restrição busca rupturas de maior influência, normalmente rupturas interrampas/globais.
- III. Restrição de rupturas com 30 metros de profundidade – Tal restrição busca rupturas com maior grau de magnitude na escala global do talude.

5.5 Análise dos resultados obtidos

Após a realização das análises tridimensionais com variados métodos e as análises bidimensionais, foi realizada a comparação entre os métodos e resultados, com a interpretação dos resultados obtidos.

O objetivo desta análise é verificar as características dos métodos de equilíbrio limite disponíveis para uma análise tridimensional, além de verificar a necessidade efetiva de se realizar tal análise, quando a análise bidimensional é uma alternativa a ser utilizada.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Análise Tridimensional

Para a realização das análises tridimensionais, era necessária a adaptação total do modelo de blocos com a categoria “litologia e classe” e a inserção das demais informações necessárias.

Para que tal falha não influenciasse o resultado final, adotou-se um procedimento “manual” de preenchimento das células vazias. Foi percebido que dentro de cada litologia, existia uma relação clara entre o Grau de Alteração (W) e o RMR determinado.

Desta forma, para associar a todos os blocos as informações necessárias, associou-se o Grau de Alteração (W) e o RMR determinado. Tais valores podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação entre classe RMR e grau de alteração dos blocos

Litologia	Grau de alteração				
	W2	W3	W4	W5	Vazio
Anfibolito	2	3	3	3	-
Granodiorito	2	3	5	5	2
Granitoide	2	3	3	5	-
Minério	2	3	3	5	-
Xisto	2	3	3	5	2
Xisto Grafitoso	2	3	3	5	2

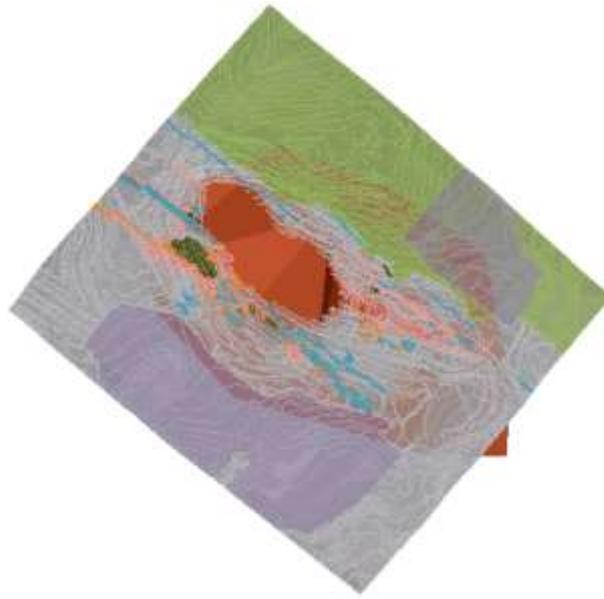
Fonte: O autor (2022)

Após este procedimento, notou-se que alguns blocos permaneciam sem classificação, por não possuírem classificação RMR nem Grau de Alteração determinado. Desta forma, foi utilizado o valor de RMR mais comum naquela litologia, sendo RMR classe II utilizado nas três litologias (Granodiorito, Xisto e Xisto Grafitoso).

É importante salientar que tais procedimentos se mostraram necessários em uma minoria dos dados, tendo aproximadamente 3% sem RMR e apenas 0,04% dos dados sem ambas as informações.

Com relação ao nível d’água, notou-se que após a inserção dos dados fornecidos pela mina, os instrumentos se concentram nas partes superiores da cava, criando assim uma dificuldade para que o software gerasse um nível d’água coerente. A partir destes dados, verificou-se que o nível d’água cruzaria a cava de maneira não natural, como pode ser visto na Figura 33.

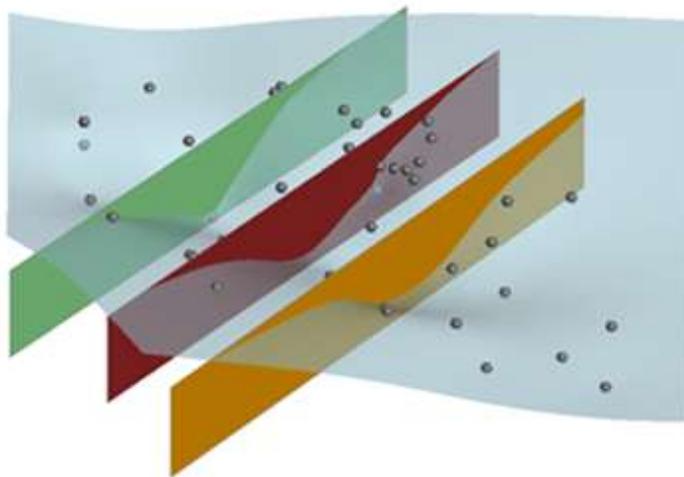
Figura 33 - Nível d'água inserido inicialmente



Fonte: O autor (2022)

Posteriormente, com auxílio do software Leapfrog, foram inseridos novos pontos hipotéticos de maneira a conformar o nível d'água de maneira mais próxima da realidade. Para atribuição das profundidades de coluna d'água, foram realizadas interpolações das profundidades dos instrumentos mais próximos. Estas análises resultaram em 12 novos “pontos”, que possibilitaram a modelagem de um nível d'água, como pode ser visto na Figura 34.

Figura 34 - Modelagem do nível d'água por seções



Fonte: O autor (2022)

A partir da inserção do modelo de blocos e regularização do nível d'água, foram realizadas sucessivas análises tridimensionais, de maneira a obter o resultado mais representativo para a cava em análise.

É importante salientar que se mostra interessante a inserção de descontinuidades principais no modelo. Entretanto, os dados disponíveis não eram suficientes para o modelamento ideal das descontinuidades principais presentes na região. Desta forma, optou-se pela não inserção das mesmas.

Os parâmetros geomecânicos e de configuração do software (citados no item 4.3) não foram alterados em nenhuma das análises. A utilização de diferentes modos de restrições foi obtida de acordo com a evolução da análise.

6.1.1 Análise sem restrições

Inicialmente realizou-se análise tridimensional sem nenhuma restrição, seja esta de área, volume ou profundidade de ruptura.

Obteve-se como resultado a indicação de ruptura interrampa localizada na parte superior da Parede Norte, região que abrange aproximadamente três bancos. Nota-se que os fatores de segurança obtidos foram extremamente próximos, como pode ser visto na Figura 35.

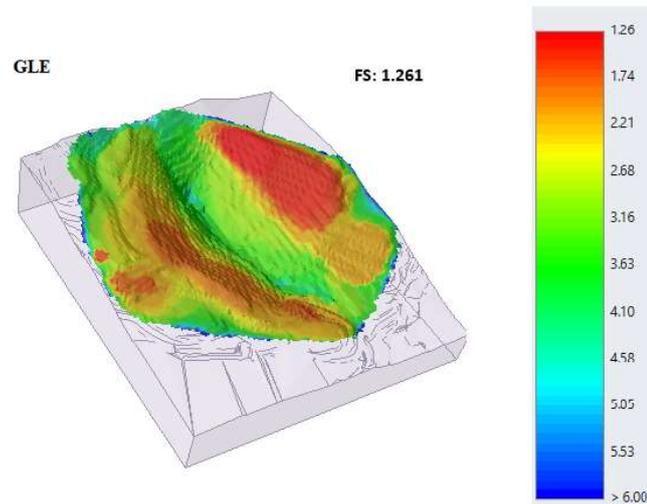
Figura 35 - Resultados obtidos em análise sem restrições adicionais no modelo, pelos métodos de Bishop e GLE



Fonte: O autor (2022)

Através da análise tridimensional é possível também verificar o “safety map” (mapa de segurança) do modelo analisado, como pode ser visto na Figura 36.

Figura 36 - Mapa de Fatores de Segurança - Método GLE

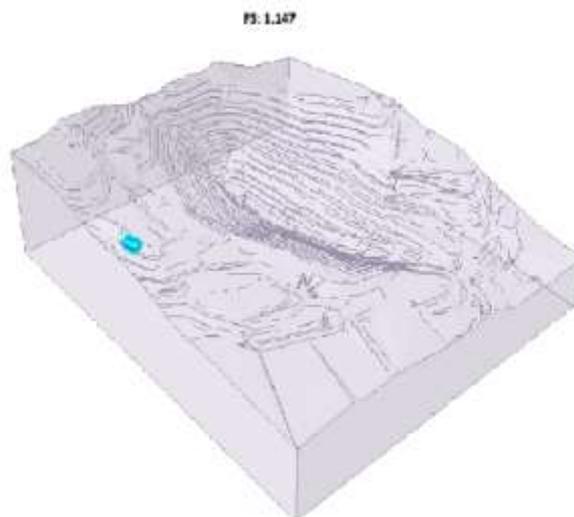


Fonte: O autor (2022)

6.1.2. Análise geral do modelo, com restrições de região – direcionado a Parede Sul

Após a verificação geral sem restrições apontar a região de ruptura na Parede Norte, criou-se uma restrição de área sobre a mesma, de maneira a verificar as possíveis regiões de instabilidade na Parede Sul. Entretanto, a busca resultou em um baixo fator de segurança advindo da região da pilha de estéril, como pode ser visto na Figura 37.

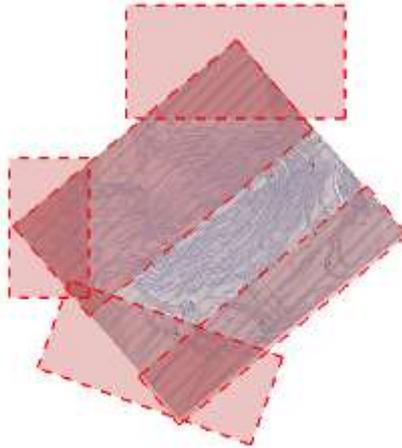
Figura 37 - Área de ruptura obtida em análise da Região da Parede Sul - Sem restrição da região da pilha de estéril.



Fonte: O autor (2022)

De modo a direcionar as buscas para a região da cava, criou-se mais uma restrição de área sobre a região externa da parede sul, que engloba a região da pilha de estéril, como pode ser visto na Figura 38. Os retângulos vermelhos representam as áreas a serem excluídas da análise.

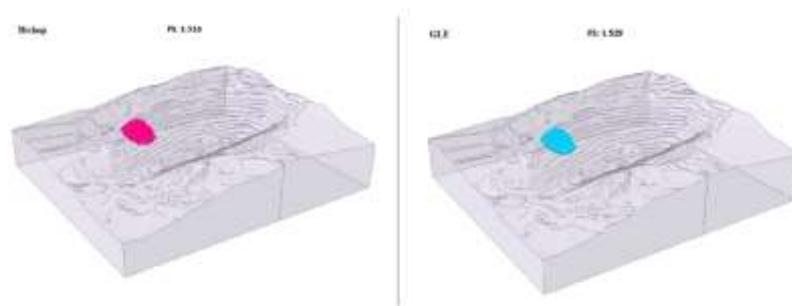
Figura 38 - Limites de restrições impostos de maneira a isolar a Parede Sul



Fonte: O autor (2022)

Com os novos limites impostos, repetiu-se a análise de maneira a buscar o menor Fator de Segurança no local. Com a análise, percebe-se que as superfícies obtidas por ambos os métodos são extremamente semelhantes, sendo superfícies interrampa que englobam aproximadamente cinco bancos. Os fatores de segurança também apresentam valores semelhantes, com $FS = 1.52$ para o método de Bishop e 1.53 para o método GLE. Tal resultado se mostra coerente com os dados informados pela empresa proprietária, já que a região indicada é composta por material com menor qualidade geomecânica da Parede Sul da cava. As análises podem ser verificadas na Figura 39.

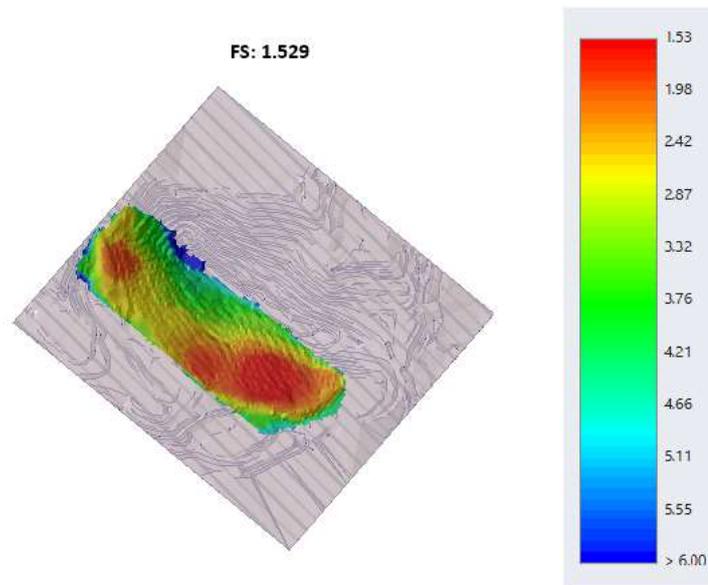
Figura 39 - Resultados obtidos pelos métodos de Bishop e GLE na Parede Sul, sem restrição de escala de ruptura



Fonte: O autor (2022)

O “*safety map*” da Parede Sul (Figura 40) explicita a zona analisada e também os fatores de segurança distribuídos pela região. Nota-se que a região possui FS acima de 1.5, sendo este valor considerado acima dos parâmetros de referência.

Figura 40 - Mapa de Segurança – Método GLE - da Parede Sul da cava



Fonte: O autor (2022)

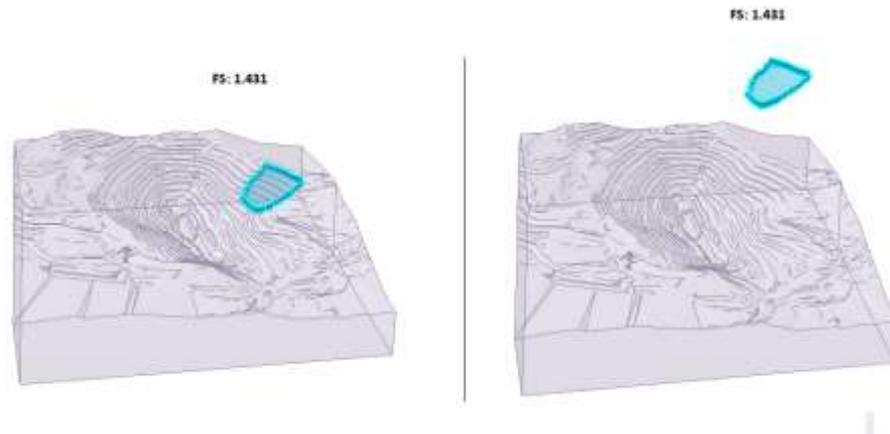
6.1.3 Análise geral do modelo com restrição de escala de ruptura (30m)

Devido aos resultados obtidos nas análises prévias, mostrou-se necessária a utilização de restrição de tamanho (profundidade) de ruptura, de maneira a buscar rupturas de maiores magnitudes na região da cava.

Para tal, foi escolhida a restrição de profundidade da ruptura, sendo estabelecido um mínimo de 30 metros para que as superfícies fossem consideradas. Tal consideração foi obtida após testes realizados com outros métodos de restrições. Restrições de profundidade inferiores obtinham resultados menos significativos, com rupturas de menores dimensões nas camadas mais friáveis de material. Tais rupturas são relatadas em relatório interno da empresa proprietária, porém não são o foco deste trabalho.

A Figura 41 traz o resultado obtido pelo método GLE em análise com restrição de ruptura maior ou igual a 30 metros de profundidade, com FS igual 1.43.

Figura 41 - Ruptura obtida para o método GLE, com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade

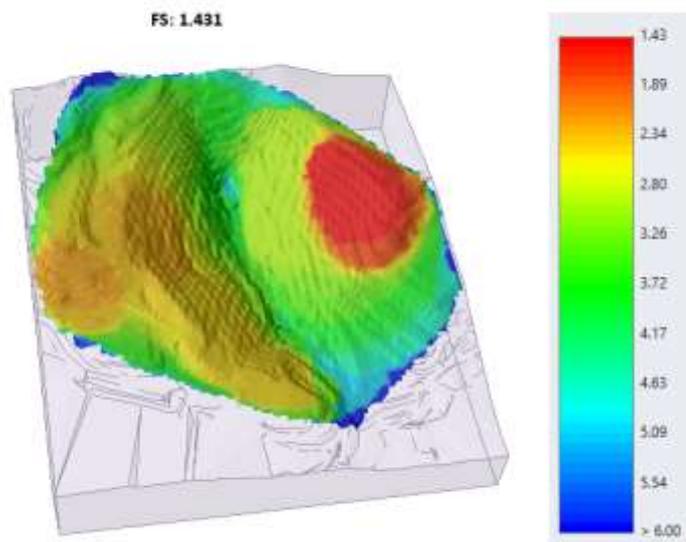


Fonte: O autor (2022)

Assim como o resultado da análise sem restrição de profundidade, tal análise busca uma superfície hipotética de ruptura na parte superior da parede norte, região que contém litologias com menores valores de classes RMR. De toda forma, o FS encontrado é considerado acima dos parâmetros adotados.

O mapa de segurança do método GLE (Figura 42) explicita a região da ruptura hipotética mais susceptível a ruptura, com uma considerável extensão lateral de fatores de segurança mais baixos que os demais locais. Nota-se também fatores de segurança mais altos na Parede Sul.

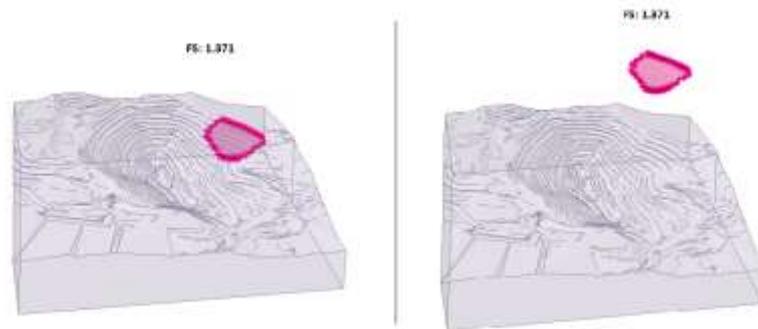
Figura 42 - Mapa de Segurança (GLE) de análise com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade



Fonte: O autor (2022)

O resultado para o método de Bishop é levemente inferior ($FS = 1.37$), confirmando a tendência de tal método ser mais “punitivo” que o método GLE. O resultado da análise pode ser observado na Figura 43.

Figura 43 - Ruptura obtida para o método Bishop, com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade

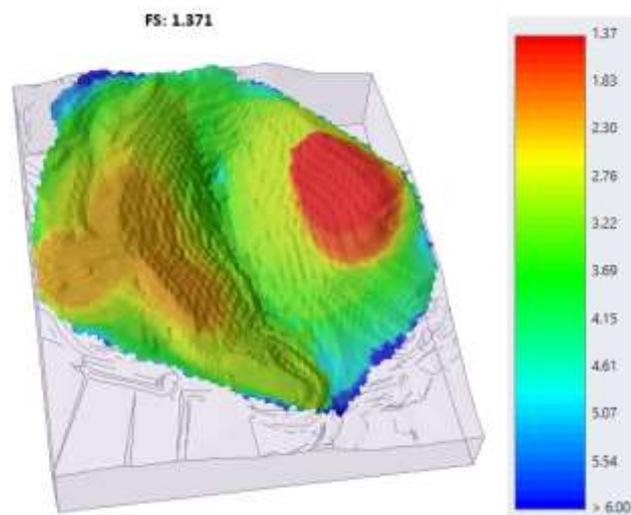


Fonte: O autor (2022)

Percebe-se que entre os métodos de análises, existe uma diferença geométrica entre os formatos das rupturas hipotéticas, apesar da semelhança de localização das mesmas. Além disso, existe uma pequena diferença no fator de segurança encontrado, sendo o FS do método GLE apenas 0.06 superior.

Quanto ao mapa de segurança, percebemos uma grande similaridade entre os métodos, com uma leve variação na Parede Sul, como pode-se verificar na Figura 44.

Figura 44 - Mapa de Segurança (Bishop) de análise com restrição de rupturas com mínimo de 30 metros de profundidade



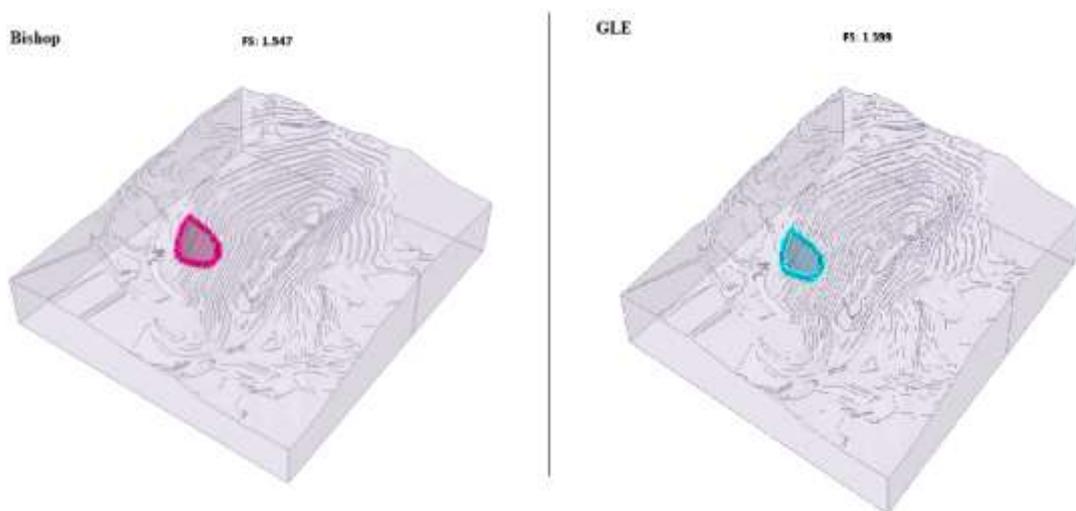
Fonte: O autor (2022)

6.1.4. Análise do modelo com restrição de escala de ruptura (30m) e de região – Parede Sul

Após realização da análise sem restrição de área, decidiu-se por verificar o fator de segurança a ser obtido na Parede Sul, uma vez que a análise inicial apontou uma ruptura hipotética de dimensão interrampa. De tal maneira, utilizou-se novamente os limites utilizados na análise citada no item 5.1.2., restringindo a análise a região da cava.

A análise a partir destes novos limites resultou na obtenção de uma superfície hipotética de ruptura interrampa na região superior da Parede Sul, abrangendo aproximadamente cinco bancos. Entretanto, o fator de segurança obtido se mostrou compatível, com o valor de $\sim 1,60$ para o método GLE e $\sim 1,55$ para o método de Bishop, como pode ser visto na Figura 45:

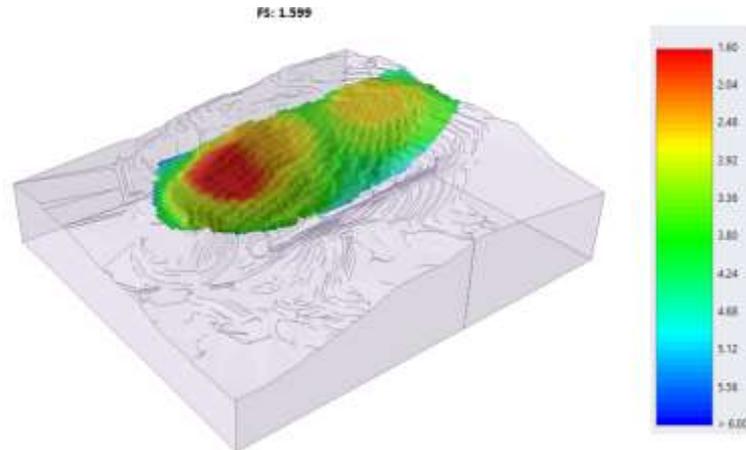
Figura 45 - Áreas de ruptura indicada na Parede Sul, sem restrições de profundidade



Fonte: O autor (2022)

No mapa de segurança (Figura 46), pode-se notar as áreas excluídas das análises e também a distribuição dos fatores de segurança ao longo da Parede Sul. Nota-se que a região possui fatores de segurança considerados altos, com apenas tal região com valores próximos a 1.6. Entretanto, tal valor não foi identificado na região quando verificamos o mapa de segurança da análise apresentada no item 6.1.3. Tal resultado pode ocorrer devido a maior concentração de buscas do software na região com menor fator de segurança detectado.

Figura 46 - Mapa de Segurança - GLE, com foco na Parede Sul da cava



Fonte: O autor (2022)

6.1.5. Análise do modelo com restrição de escala de ruptura (30 metros) com todos os métodos disponíveis

Após a finalização das análises, decidiu-se por repetir a análise livre com restrição de 30 metros de profundidade de ruptura utilizando-se dos quatro métodos disponíveis no software. O número de iterações e nests não foi alterado, possibilitando também a comparação da coerência entre os novos resultados e os previamente obtidos dos métodos GLE e Bishop.

Os fatores de segurança obtidos podem ser vistos na Tabela 10. Nota-se que os valores obtidos para os métodos GLE e Spencer são iguais (após arredondamento), se tratando de dois métodos que consideram todas as condições de equilíbrio estático. Já para os métodos de Bishop e Janbu, nota-se uma leve diminuição nos valores encontrados, com diferença máxima inferior a 7% entre os métodos (GLE e Janbu).

Tabela 10 - Fatores de segurança obtidos em comparativo de métodos

Método	Fator de Segurança obtido
Bishop	1,38
GLE	1,43
Janbu	1,34
Spencer	1,43

Fonte: O autor (2022)

Nota-se que além dos fatores de segurança, as geometrias de rupturas hipotéticas se localizam na mesma região, a porção superior central da Parede Norte, englobando aproximadamente seis bancos, região de material mais friável da parede. Apesar da

similaridade, os métodos apresentam leves diferenças de geometria, como a menor região considerada pelo método de Janbu. Os resultados podem ser verificados na Figura 47.

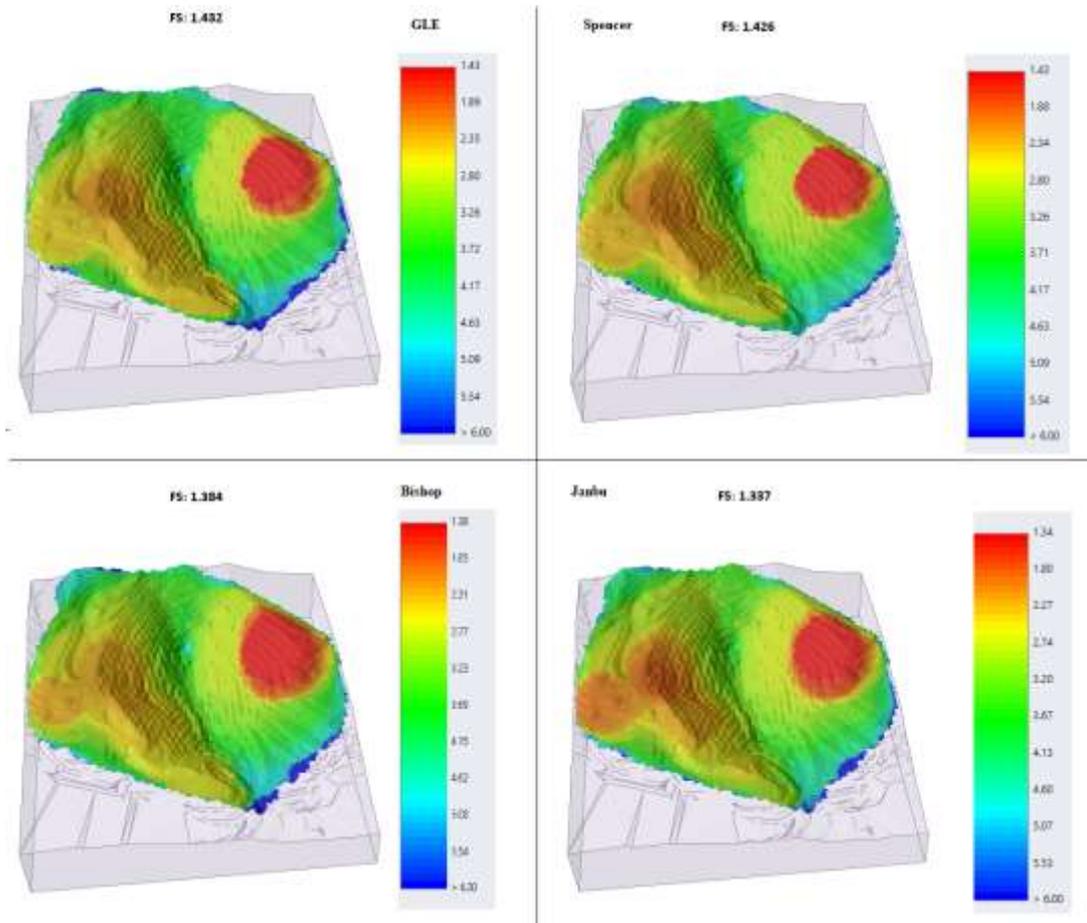
Figura 47 - Resultados de análise tridimensional comparativa entre os métodos



Fonte: O autor (2022)

Tal similaridade entre os métodos pode ser comprovada verificando os mapas de segurança de cada método, que identifica principalmente a região superior central da Parede Norte e também a região central da Parede Sul, conforme foi verificado durante as análises prévias. Os resultados podem ser vistos na Figura 48.

Figura 48 - Mapas de segurança dos diferentes métodos utilizados na comparação



Fonte: O autor (2022)

De maneira a verificar a precisão entre análises análogas, comparou-se os valores obtidos pelos métodos de Bishop e GLE nesta análise com os resultados obtidos no item 5.1.1. Analisando os resultados, percebe-se a efetividade das análises realizadas, com uma diferença ínfima entre os resultados obtidos nas análises efetuadas. O resultado pode ser visto na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparativo de resultados obtidos em diferentes análises com mesmos parâmetros

Método	Análise 1	Análise 2	Diferença
Bishop	1,371	1,384	0,013
GLE	1,431	1,432	0,001

Fonte: O autor (2022)

6.2 Análise Bidimensional

Foram analisadas três seções previamente definidas, sendo divididas em Parede Sul e Parede Norte, com três cenários diferentes de restrição de profundidade de ruptura (0, 10 e 30 metros), com utilização de dois métodos diferentes (Bishop e GLE).

Além disso, foram realizadas análises bidimensionais circulares e não circulares. Os resultados obtidos são similares, apresentando na maior parte dos casos leves variações nos fatores de segurança encontrados. De tal maneira, optou-se por apresentar os resultados advindos das análises circulares.

Como referencial para as análises e figuras neste texto, método de GLE – Morgenstern-Price foi utilizado.

6.2.1 Análise sem restrição

As análises iniciais foram realizadas sem a utilização de restrições de profundidade, buscando desta forma os menores Fatores de Segurança locais, provavelmente oriundos de rupturas de bancada.

Os resultados obtidos para as análises sem restrição de profundidade podem ser vistos na Tabela 12.

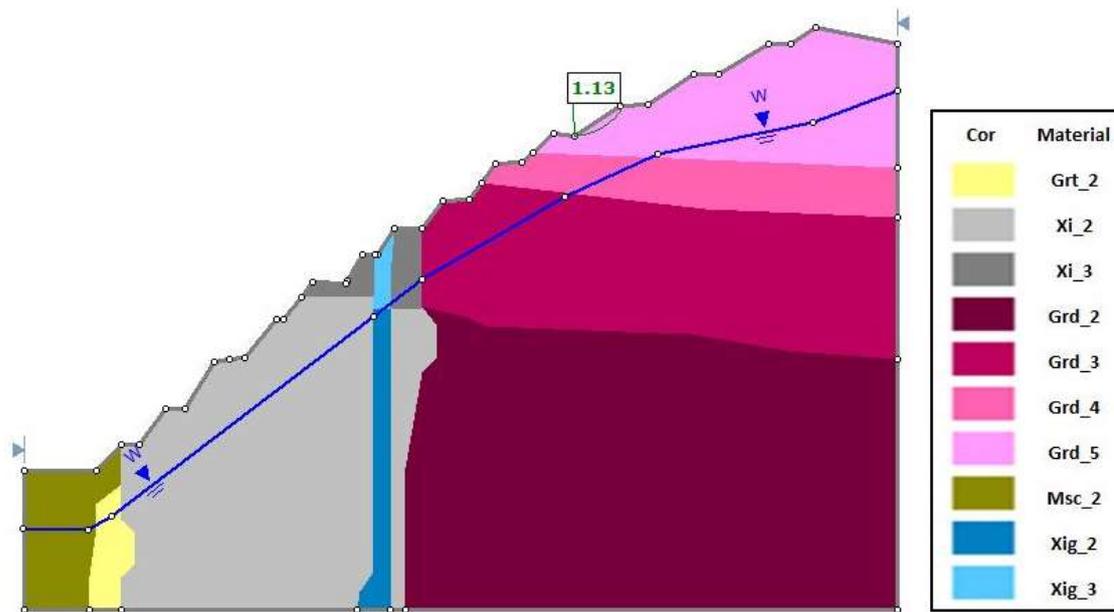
Tabela 12 - Fatores de Segurança obtidos na análise bidimensional sem restrição de profundidade de ruptura

Seção analisada	FS Bancada (sem restrição)	
	GLE	Bishop
A - Parede Sul	1,41	1,41
A - Parede Norte	1,13	1,14
B - Parede Sul	1,39	1,41
B - Parede Norte	2,22	2,23
C - Parede Sul	1,41	1,41
C - Parede Norte	1,29	1,3

Fonte: O autor (2022)

Analisando a tabela podemos perceber que o menor Fator de Segurança encontrado se localiza na Seção A – Parede Norte, com 1,13. Entretanto, os resultados obtidos são referentes a rupturas de bancada. Tal análise pode ser verificada na Figura 49.

Figura 49 - Resultado de análise de estabilidade sem restrição de profundidade de ruptura.
Seção A - Parede Norte



Fonte: O autor (2022)

6.2.2 Análise com restrição (10 metros)

Posteriormente, as análises realizadas buscaram rupturas com maiores magnitudes, com profundidades mínimas de 10 metros. Tal procedimento resulta em maiores superfícies de ruptura e também em maiores Fatores de Segurança, como pode ser observado na Tabela 13.

Tabela 13 - Fatores de segurança obtidos na análise bidimensional com restrição de profundidade de ruptura de 10 metros

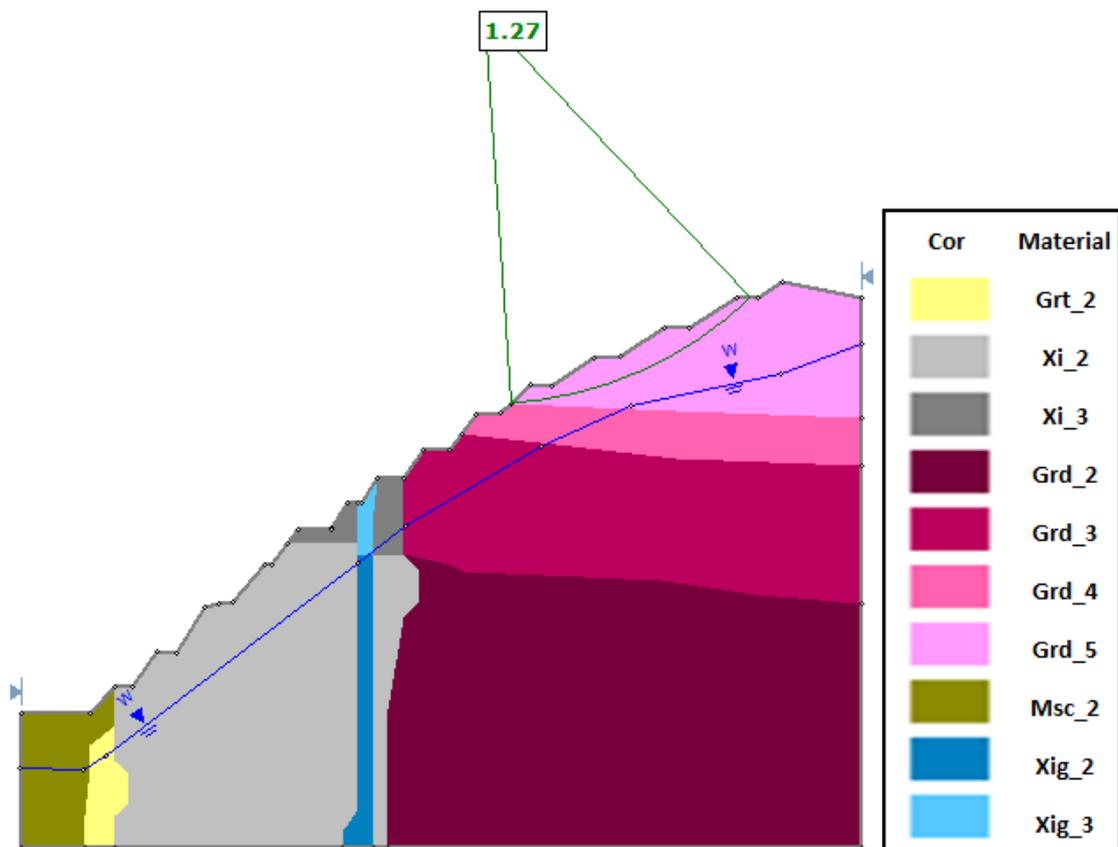
Seção analisada	FS Interrampa (> 10m)	
	GLE	Bishop
A - Parede Sul	2,38	2,38
A - Parede Norte	1,27	1,27
B - Parede Sul	1,44	1,44
B - Parede Norte	2,65	2,65
C - Parede Sul	1,41	1,41
C - Parede Norte	2,5	2,5

Fonte: O autor (2022)

Nota-se que novamente a seção A – Parede Norte entrega o menor FS local. Entretanto, as Seções B e C da Parede Sul também possuem Fatores de Segurança inferiores a 1.5, indicados no caso de rupturas interrampa/globais.

Para a Seção A – Parede Norte, nota-se que a ruptura indicada se localiza na parte superior da cava, acima do nível de água local, ou seja, com material não saturado. Tal parede se configura pela presença de granodioritos, e na região de ruptura especificamente, Granodioritos com baixo RMR – Classe V, conseqüentemente com parâmetros geomecânicos inferiores a outras feições geológicas. Tal efeito pode ser verificado na Figura 50.

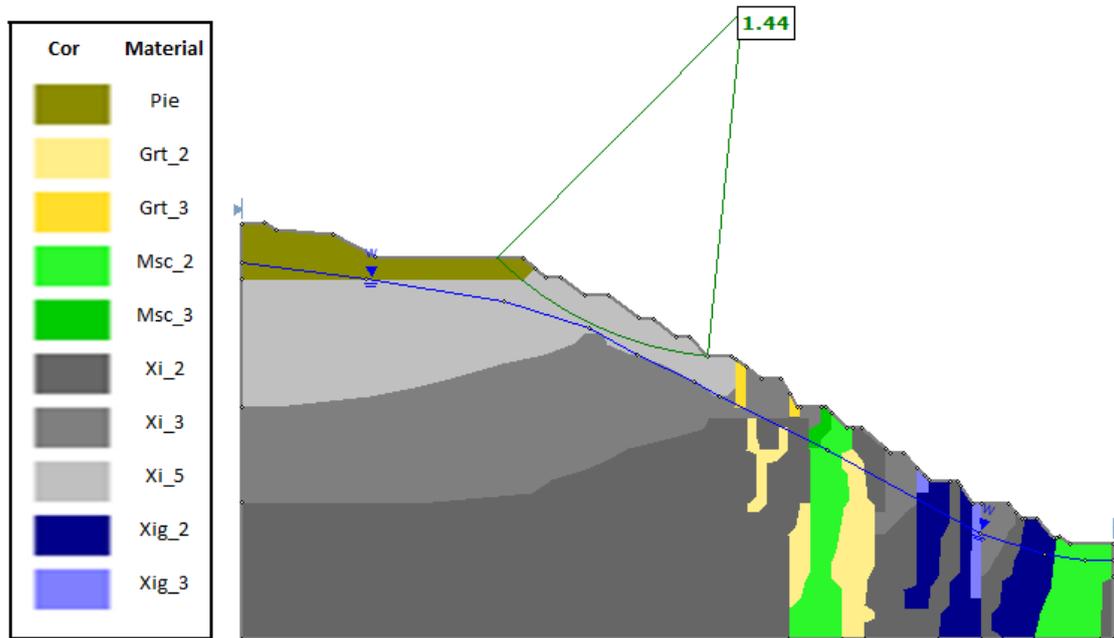
Figura 50 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 10m. Seção A – Norte



Fonte: O autor (2022)

A seção B da parede Sul apresenta Fator de Segurança de 1.44 para rupturas com mínimo de 10 metros de profundidade. Neste caso, a ruptura é localizada na parte superior da cava, e intercede uma pequena parte da pilha de estéril, com a maior parte da ruptura na camada de xisto com classe RMR V, como pode ser visto na Figura 51.

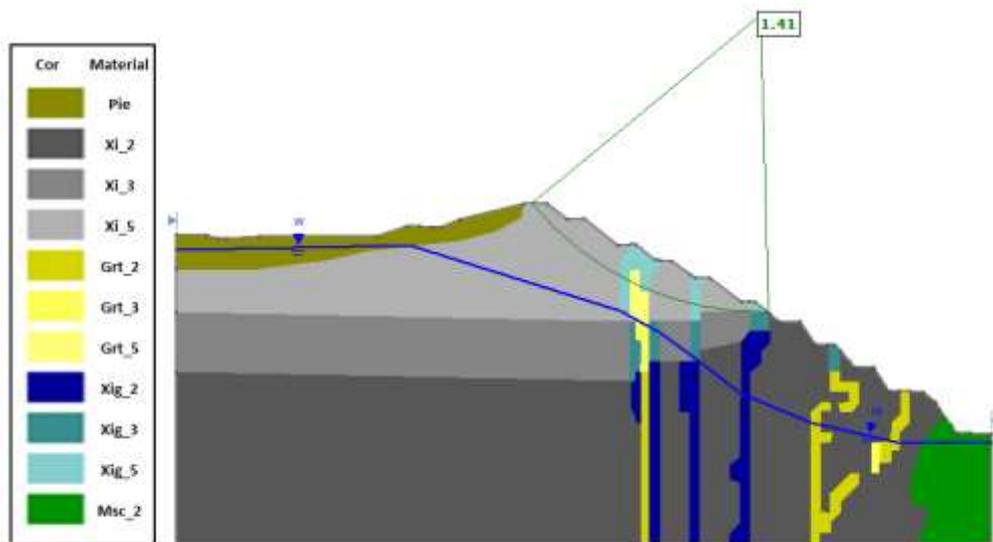
Figura 51 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 10 metros. Seção B - Parede Sul.



Fonte: O autor (2022)

Também na parede Sul, a seção C apresenta Fator de Segurança igual 1.41, com ruptura semelhante a apresentada na seção B, interceptando a camada superior de xisto classe V e não saturada. Entretanto, esta ruptura se desenvolve também entre o granodiorito (classe V) e o xisto grafitoso (classe V). Tal ruptura pode ser vista na Figura 52.

Figura 52 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 10 metros. Seção C - Parede Sul



Fonte: O autor (2022)

6.2.3 Análise com restrição (30 metros)

As análises desenvolvidas com restrição de profundidade de 30 metros buscam rupturas de maior magnitude, rupturas de escala global. Desta forma, a tendência é o aumento dos fatores de segurança associados. Todas as seções analisadas apresentam $FS > 1.5$, como pode se constatar na Tabela 14.

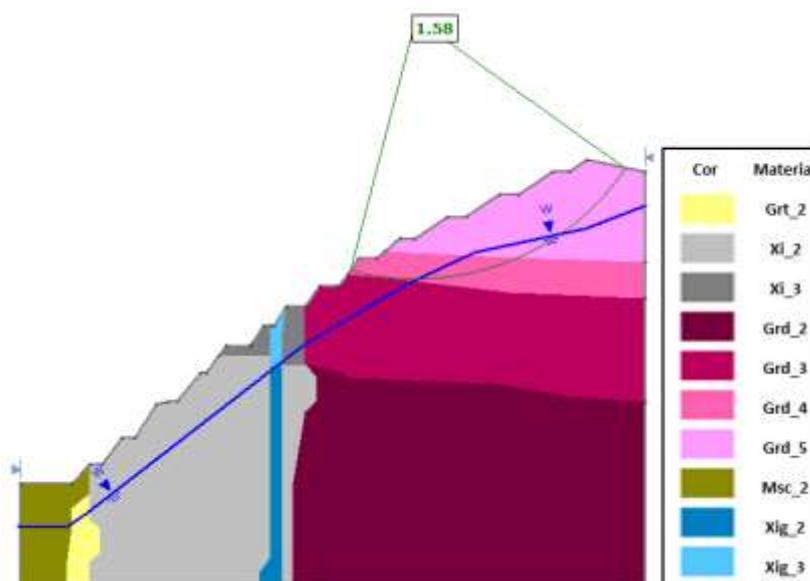
Tabela 14 - Fatores de Segurança obtidos na análise bidimensional com restrição de profundidade de ruptura de 30 metros

Seção analisada	FS Interrampa (> 30 m)	
	GLE	Bishop
A - Parede Sul	3,94	3,82
A - Parede Norte	1,58	1,58
B - Parede Sul	1,87	1,86
B - Parede Norte	2,68	2,65
C - Parede Sul	1,54	1,54
C - Parede Norte	2,81	2,8

Fonte: O autor (2022)

Destacam-se os fatores de segurança obtidos para as seções A – Parede Norte (1.58) e C – Parede Sul (1.54), sendo estes os únicos valores próximos do mínimo desejável para tal análises (1.5). A Figura 53 explicita a superfície de ruptura pertencente a seção A.

Figura 53 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 30 metros. Seção A - Parede Norte



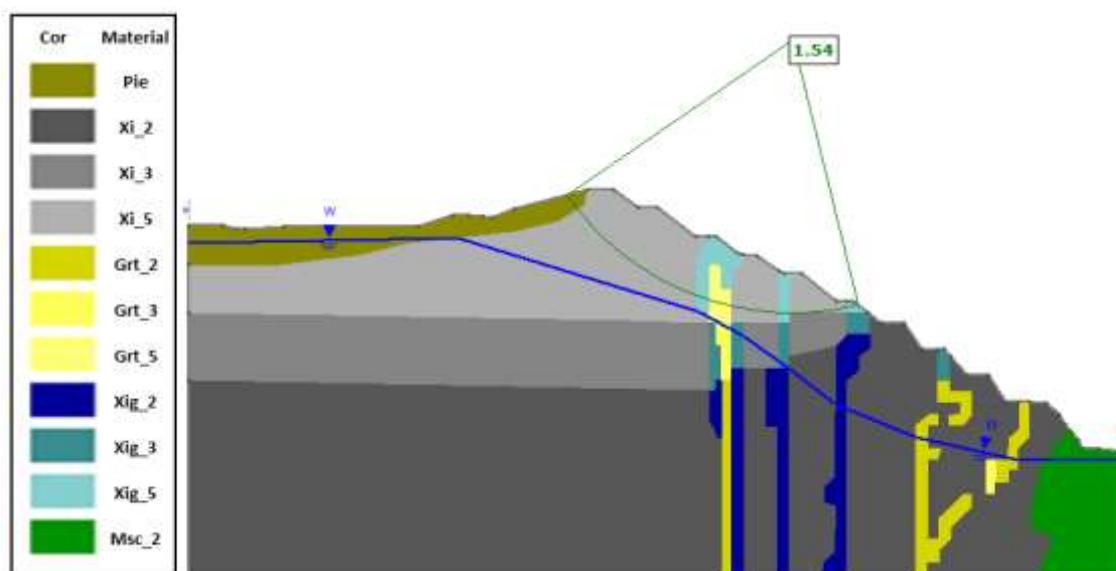
Fonte: O autor (2022)

Analisando-se a ruptura hipotética gerada para a seção A – Parede Norte, nota-se a semelhança de localização e forma entre esta e as outras previamente analisadas. Neste caso,

porém, a ruptura se estende entre os materiais Xisto classe RMR V e IV, com parte da ruptura em material saturado.

Já na Seção C – Parede Sul, notamos o mesmo modo de ruptura, localização e litologias envolvidas, porém com uma profundidade maior e um maior Fator de Segurança envolvidos, conforme Figura 54.

Figura 54 - Resultado de análise de estabilidade com restrição de profundidade de ruptura de 30 metros. Seção C - Parede Sul



Fonte: O autor (2022)

6.3 Comparativo entre análises

A fim de verificar a usabilidade e precisão das análises, pode-se verificar a convergência de resultados entre as análises bidimensional e tridimensional.

Deve-se salientar que as seções definidas para a análise bidimensional foram selecionadas de maneira prévia a análise tridimensional, de maneira a verificar as diferenças e similaridades obtidas em análises independentes, utilizando o mesmo modelo geomecânico de blocos como base.

Além disso, deve-se destacar que o processo de confecção manual das seções bidimensionais pode trazer leve alterações nas mesmas, como ajustes de limites de litologia e topografia.

As análises previamente realizadas se mostram condizentes com os resultados esperados para as mesmas. Devido a característica mais friável dos materiais na região superior das paredes, espera-se que as superfícies hipotéticas de ruptura ali se localizassem.

Durante a realização da análise bidimensional, percebe-se que as análises sem restrição de profundidade de ruptura nos trazem - em sua maioria - resultados de superfícies de rupturas de bancada. Tal efeito não é notado na análise tridimensional, que durante as análises já apresenta volumes de rupturas de maior dimensão mesmo sem a utilização de filtros. É possível restringir profundidade, áreas ou volumes de ruptura, ou ainda aumentar o número de iterações do software, de maneira a obter resultados tridimensionais de volumes rupturas de bancada. Irão ser detalhados dois comparativos entre as análises:

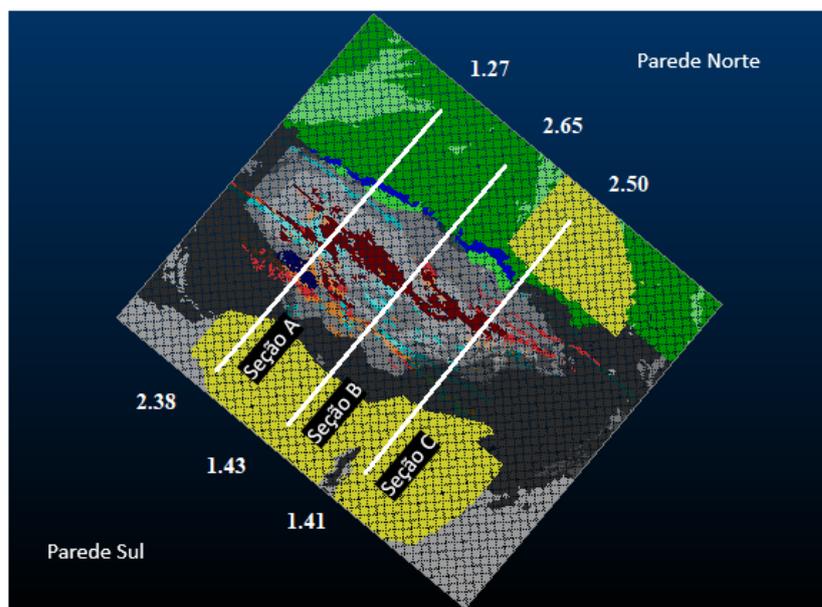
1. Comparativo entre análises tridimensionais sem restrições (resultado interrampa) e análise bidimensional com restrição de 10 metros;
2. Comparativo entre análises com restrição de 30 metros de profundidade.

6.3.1 Comparativo entre análises tridimensionais sem restrições (resultado interrampa) e análise bidimensional com restrição de 10 metros

A intenção deste comparativo é verificar resultados de superfícies e volumes de rupturas interrampa sem a necessidade da restrição de mínimo de 30 metros de profundidade. Desta forma, podemos verificar a convergência destas análises do modelo.

A Figura 55 traz os fatores de segurança obtidos durante as análises bidimensionais, de maneira a facilitar a visualização dos locais das seções e seus resultados.

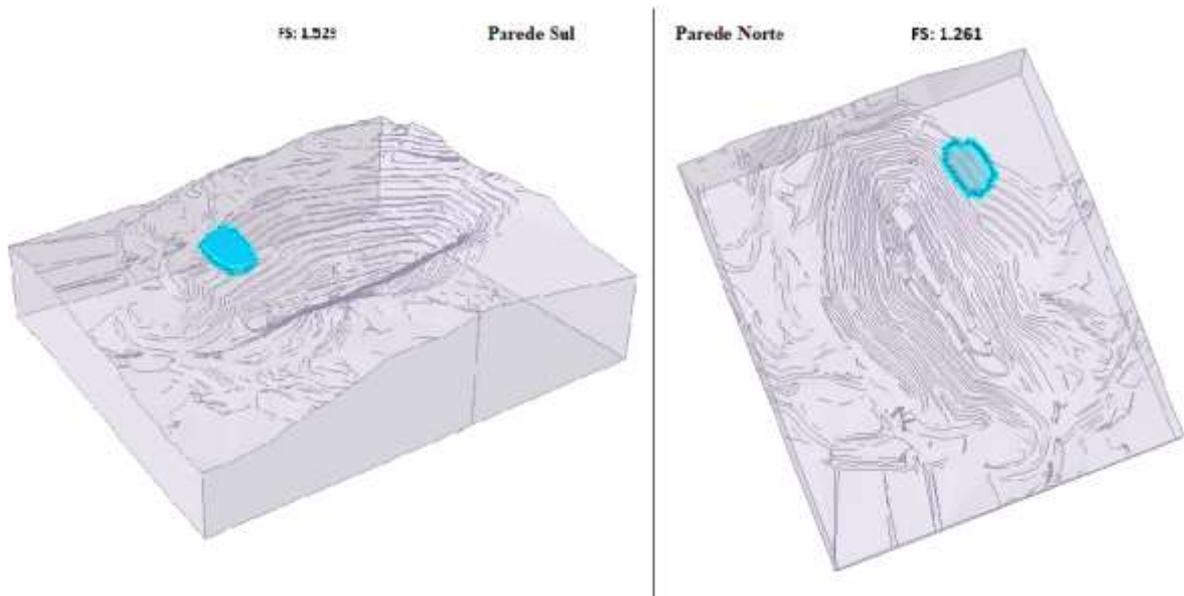
Figura 55 - Fatores de segurança obtidos em análises bidimensionais por seção, com restrição de 10 metros de profundidade de ruptura



Fonte: O autor (2022)

A Figura 56 traz as superfícies hipotéticas de ruptura obtidas para as paredes Sul e Norte, com os fatores de segurança associados:

Figura 56 - Superfícies de ruptura obtidas em análises tridimensionais para as Paredes Norte e Sul da cava em análises tridimensionais sem limitação de profundidade de ruptura



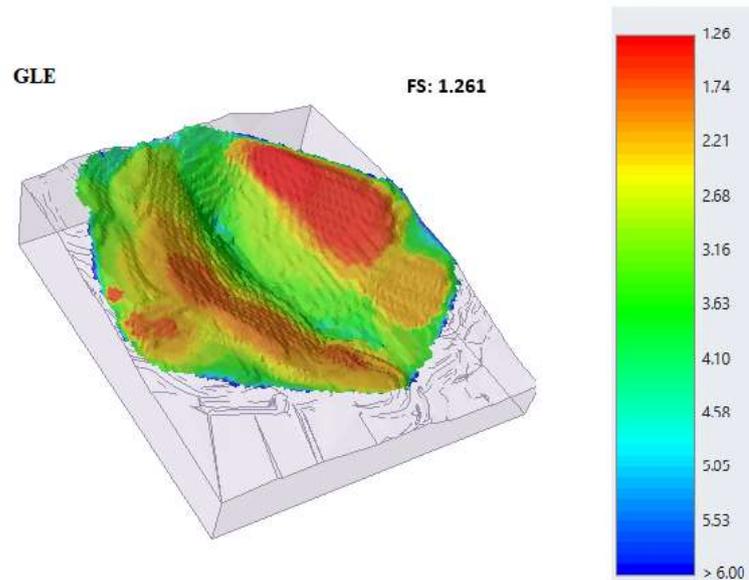
Fonte: O autor (2022)

Analisando as imagens e os fatores de segurança obtidos, percebe-se que a seção bidimensional C é a mais próxima a ruptura explicitada na análise tridimensional. Percebe-se que o valor do FS está levemente acima do que o obtido na análise 2D, porém dentro da variação considerada normal (8%). Na prática operacional, considera-se como variação normal uma estimativa de 10% acima para as análises tridimensionais em relação as bidimensionais.

Já na Parede Norte, podemos verificar uma similaridade grande entre os fatores obtidos na análise, sendo $FS=1,27$ para a seção A, enquanto a análise 3D resulta num $FS=1,26$ em região análoga. Percebe-se assim as análises convergiram para resultados muito próximos neste ponto.

Outra maneira de verificar a compatibilidade das análises é realizando a verificação do mapa de segurança fornecido na análise tridimensional. Tal mapa está disponível na Figura 57.

Figura 57 - Mapa de segurança obtido para análises sem restrição de profundidade de rupturas



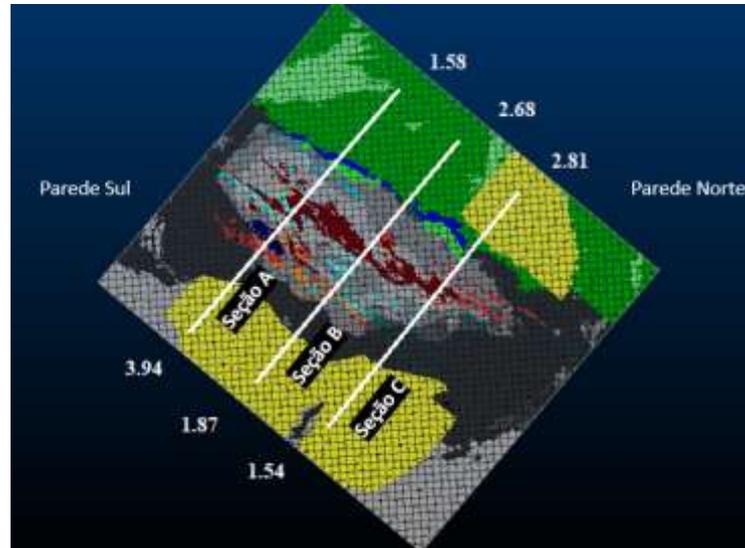
Fonte: O autor (2022)

Com o auxílio do mapa de segurança, podemos verificar mais claramente a tendência de áreas de menores fatores de segurança do maciço nas suas regiões superiores, tanto na Parede Sul quanto na Parede Norte. A presença de materiais com predominância de parâmetros geomecânicos inferiores somados a geometria local resultam em maior susceptibilidade de ruptura. Deve-se notar, entretanto, que não houve restrição de profundidade de ruptura nesta análise, possibilitando então que o mapa de segurança seja influenciado por rupturas de menor expressão.

6.3.2 Comparativo entre análises com restrição de 30 metros de profundidade.

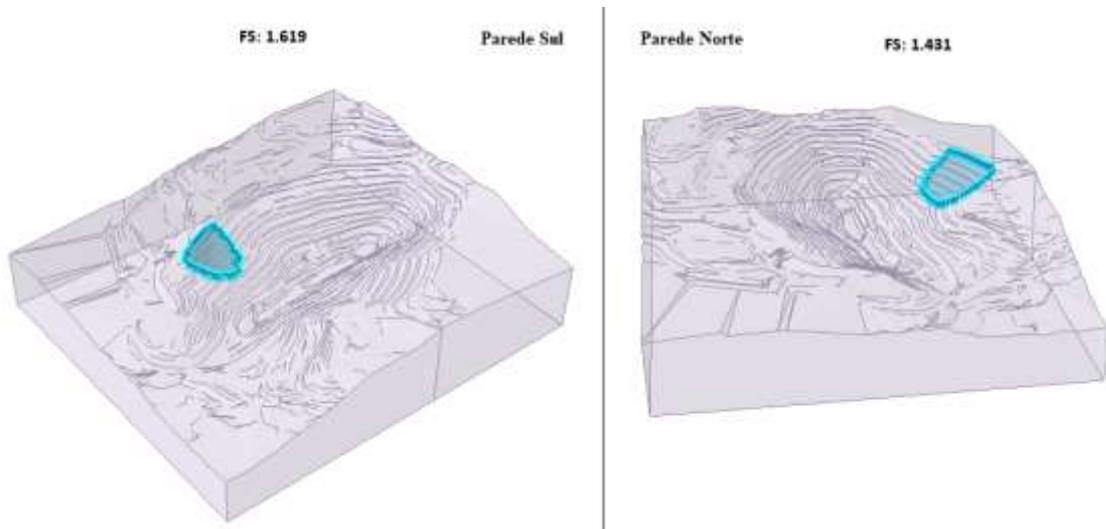
Posteriormente, as análises com restrições demonstram grande similaridade nos resultados apresentados. A Figura 58 traz os fatores de segurança obtidos para rupturas acima de 30 metros de profundidade na análise bidimensional, enquanto a Figura 59 nos mostra as superfícies obtidas com a mesma restrição para a análise tridimensional. Ambas as análises foram baseadas no método GLE.

Figura 58 - Fatores de segurança obtidos por seção em análise bidimensional com restrição de profundidade de 30 metros



Fonte: O autor (2022)

Figura 59 - Superfícies de ruptura obtidas em análises tridimensionais para as Paredes Norte e Sul da cava em análises tridimensionais com limitação de 30 metros de profundidade de ruptura



Fonte: O autor (2022)

Analisando os resultados e localizações dele, algumas questões podem ser verificadas. A análise bidimensional na Parede Sul indica o fator de segurança levemente inferior ao obtido na análise tridimensional, de 1.54, na ordem de 5,2% de diferença.

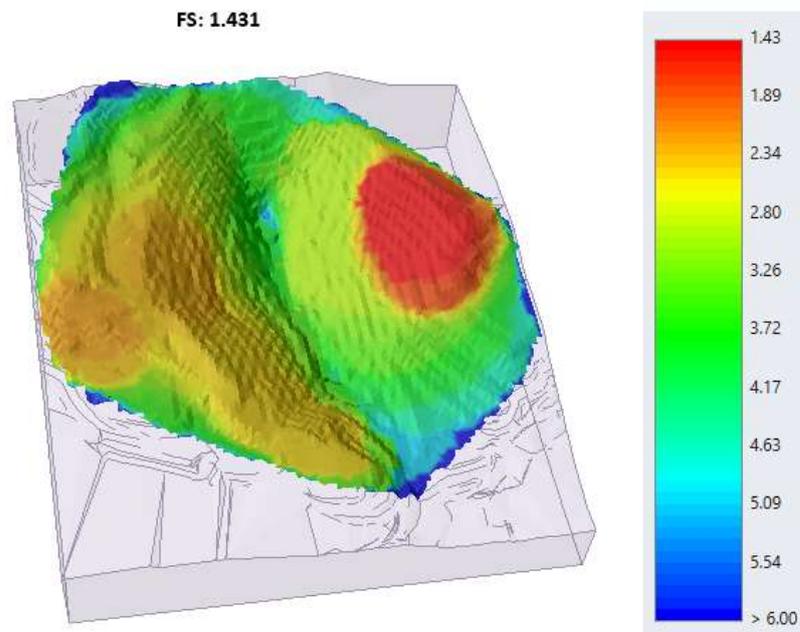
Já na Parede Norte, percebemos que a análise tridimensional busca uma superfície com fator de segurança inferior aos verificados bidimensionalmente. Pode-se concluir que as seções bidimensionais definidas não interceptam diretamente a região central da ruptura apontada tridimensionalmente, sendo a seção A a mais próxima. Tal questão explicita uma importante característica da análise tridimensional – a extensão lateral das rupturas.

A extensão lateral das rupturas se destaca como uma das principais vantagens da análise tridimensional, pois a mesma possibilita a melhor visualização e contabilização de possíveis danos da ruptura. Além disso, o software permite estimar o volume/peso da região afetada, algo impossível na análise bidimensional.

As seções bidimensionais por si só podem subestimar rupturas, a depender da seção alocada. Com as análises tridimensionais, as seções podem ser mais facilmente definidas e garantir maior segurança para a realização de análises bidimensionais em determinada cava ou região da mesma.

Verificando o mapa de segurança da cava, também é possível notar similaridades entre as zonas de aumento e diminuição dos fatores de segurança obtidos bidimensionalmente, ver Figura 60.

Figura 60 - Mapa de segurança obtido para análises com rupturas acima de 30 metros



Fonte: O autor (2022)

6.3.3 Comparativo entre a utilização dos softwares

Para a realização das análises bidimensionais e tridimensionais, utilizou-se os softwares Slide 2 (2021) e Slide 3 (2021). Nota-se que apesar de ambos possuírem a base teórica semelhante, a utilização deles se mostra diversa.

O Slide 2 se mostra um software considerado leve, não exigindo grandes esforços computacionais para o seu uso. A realização da análise bidimensional em geral é rápida, podendo se realizar diversas análises em um curto espaço de tempo. Além disso, o software possui uma boa usabilidade, sendo bastante intuitivo.

Tal software conta com inputs mais simples quando comparado ao Slide3, sendo apenas seções bidimensionais discretizadas com seus parâmetros geomecânicos.

O Slide3 se mostra um software mais robusto, necessitando de maior capacidade de processamento computacional para sua utilização. A depender do número de iterações e *nests* utilizados, além da capacidade da própria máquina, as análises tridimensionais podem levar grandes períodos para serem concluídas, tornando o processo de realizar diversas análises diferente mais complexo.

Uma vantagem associada ao Slide3 é a possibilidade de inserção de possíveis *weak layers* (planos de fraqueza), descontinuidades e nível de água local no modelo, possibilitando relatar mais fidedignamente a região de estudo. Entretanto, o software necessita de dados mais refinados para o seu funcionamento. A elaboração de um modelo geomecânico completo, com possíveis *weak layers*, descontinuidades e nível d'água podem demandar um longo período. Apesar disso, tal modelo pode ser utilizado e aperfeiçoado posteriormente, garantindo a realização de análises subsequentes.

O Slide3 se mostra de mais complexa utilização, necessitando de mais afinidade do usuário para a realização das análises. Além disso, o software apresenta uma limitação na visualização do modelo de blocos após a inserção da topografia, não permitindo a visualização dos resultados com as classes imputadas.

Outra limitação verificada é a impossibilidade de exportar seções 2D a partir do modelo utilizado. O software dispõe de tal função, porém a mesma é ineficiente quando o modelo utilizado é de blocos.

A Tabela 15 resume as observações acerca dos softwares utilizados:

Tabela 15 - Comparativo entre as análises bidimensional e tridimensional

Análise	Bidimensional	Tridimensional
Esforço computacional	Baixo	Alto
Velocidade da análise	Alta	Baixa
Desenvolvimento de <i>inputs</i>	Regular	Complexo
Necessidade de conhecimento do usuário	Regular	Alto
Usabilidade	Boa	Regular

Fonte: O autor (2022)

De toda forma, mostra-se interessante a utilização de ambas as análises simultaneamente. A análise tridimensional pode balizar as regiões e refinar o número de seções bidimensionais a serem realizadas, diminuindo assim o tempo gasto nestas análises.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

7.1 Conclusões

Esta dissertação buscou apresentar e analisar a metodologia de análise de estabilidade tridimensional via Teoria do Equilíbrio Limite, realizando tal análise em uma região de cava a céu aberto de manganês, com uso de modelo de blocos geomecânico. Foram analisadas também diversas aplicações distintas da análise de estabilidade tridimensional via equilíbrio limite dentro da literatura existente.

Além da análise tridimensional, foram realizadas análises bidimensionais de maneira a balizar os resultados e verificar eficácia.

A análise bidimensional se mostra mais viável do ponto de vista executivo, com resultados coerentes e viabilidade computacional menor, exigindo menor tempo de processamento e menor expertise do usuário.

A análise tridimensional demanda um maior conhecimento específico em ferramentas computacionais que permitam a elaboração de um modelo geomecânico para o mesmo, além de demandar mais tempo de elaboração e processamento. Entretanto, se mostra uma ferramenta extremamente interessante para suceder as análises bidimensionais padrão.

Para a elaboração das análises 3D apresentadas, utilizou-se o software Slide3 (2021) da Rocscience, e alguns pontos devem ser destacados: a precisão da análise tridimensional depende diretamente da qualidade de informações ali inseridas. Portanto, se mostra essencial a utilização de um modelo geomecânico bem desenvolvido, por profissionais que possuam conhecimento profundo da região em estudo. Além disso, a topografia, os parâmetros geomecânicos dos materiais, nível d'água local e possíveis descontinuidades/anisotropias devem ser mapeados e inseridos – quando possível – no modelo, de maneira a reaproximar o modelo da realidade.

Destaca-se também que o conhecimento em campo da região pode se mostrar um diferencial quanto a realização de análises de estabilidade, pois o histórico local pode trazer informações valiosas que podem ajudar na calibração do modelo. Após analisar o histórico disponível da mina em estudo e os resultados obtidos, percebemos que as análises são coerentes, apresentam pequena variação em fatores de segurança e recomenda-se a utilização dos dois métodos em conjunto.

Para o estudo de caso em questão, percebe-se pelos resultados que a cava nesta análise se encontra estável. Entretanto, a mesma possui histórico de rupturas de diferentes magnitudes.

Os resultados apontam para regiões indicadas como historicamente instáveis pela empresa proprietária. Tal similaridade sugere que os parâmetros de resistência do maciço devam ser calibrados. Outra possibilidade é a conjugação de descontinuidades com zonas de enfraquecimento do maciço rochoso, tendo as descontinuidades como “iniciadoras” das rupturas.

Destaca-se como o maior benefício da análise tridimensional a possibilidade de visualizar em 3D a superfície de ruptura hipotética, avaliar sua extensão lateral e até seu peso/volume.

Atualmente, não há norma que regule as análises de estabilidade tridimensionais, desta forma, pode-se considerar as análises tridimensionais como um balizamento para a busca de áreas a se realizar análises bidimensionais, podendo diminuir desta forma o número de seções a serem realizadas e conseqüentemente o tempo de análise.

Destaca-se que a utilização do modelo geomecânico de blocos se mostra uma opção interessante para a indústria mineral, visto que se utiliza em sua rotina o modelo de blocos devido a atividades de planejamento de lavra. Desta forma, pode-se usar um modelo inicial de blocos e atualizar periodicamente outros dados, como topografia e nível d’água. Quando houver modificação relevante do modelo geomecânico de blocos, outra análise deve ser iniciada.

De toda forma, as análises bidimensionais e tridimensionais se mostraram válidas e úteis a analisar a região em questão. As análises tridimensionais tendem a evoluir e facilitar a realização de tais análises, trazendo assim mais uma importante ferramenta para as análises geotécnicas.

7.2 Sugestões de pesquisas futuras

Como sugestão para pesquisas futuras, apresentam-se:

- I. Avaliação de análise de estabilidade tridimensional da região com inserção de descontinuidades principais e possíveis zonas de fraquezas (*weak layers*).
- II. Revisão dos parâmetros geomecânicos do modelo utilizado e posterior análise tridimensional.
- III. Utilização de análise de estabilidade tridimensional para verificação de influência de desmonte de rochas na estabilidade do local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, C. (2009). Aplicação de métodos de análise de estabilidade de taludes de grande altura. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

AQUINO, I. B. de M., Modelo de blocos para dimensionamento prévio de reforço e suporte para escavações subterrâneas. Teste (Doutorado em Engenharia Mineral) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

BIENIAWSKI, Z. (1989). Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons, New York. p. 251.

BISHOP, A. (1955). The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes. *Géotechnique*, London, v.10, n. 4. p. 7-17.

BRADY, B.H.G. and BROWN, E.T. (2004) *Rock Mechanics for Underground Mining*. 3rd Edition, Springer Science and Business Media, Dordrecht.

CHENG, Y., & YIP, C. (2007). Three-dimensional asymmetrical slope stability analysis extension of Bishop's, Janbu's, and Morgenstern–Price's techniques. *J. Geotech. Geoenviron.* 133 (12). p. 1544-1555.

COATES, D. F. 1977. Pit Slope Manual Chapter 5 □ Design. CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), CANMET REPORT 77-5.

COATES, D. F. 1981. *Rock Mechanics Principles*. CANMET, Energy, Mines and Resources, Canada.

CONTRERAS, L. F. An Economic risk evaluation approach for pit slope optimization. In *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. Vol 115. África do Sul, 2015.

DATAMINE STUDIO MAPPER, Versão 1.10.69.0, Datamine Corporate Limited, 2021.

HOEK, E., & BRAY, J. (2005). Rock Slope Engineering. Institute of Mining and Metallurgy. 4th ed.

HOEK, E., & BROWN, E. (2018). The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. p. 445-463.

HOEK, E.; BRAY, J. D. Rock Slope Engineering. 3ª edição. London: CRC Press, 1981, 368 p.

HOEK E, CARRANZA-TORRES CT, CORKUM B.: Hoek–Brown failure criterion—2002 edition. Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, vol. 1, 2002, pp. 267 – 273.

HUANG, Da; CEN, Duofeng; MA, Guowei; HUANG, Runqiu. Step-path failure of rock slopes with intermittent joints. Landslides, vol. 12, no. 5, p. 911–926, 2015.

HUANG, C., TSAI, C., & CHEN, Y. (2002). Generalized method for three-dimensional slope stability analysis. J. Geotech. Geoenviron. 128 (10). p. 836-848.

JANBU, N. (1973). Slope stability computations. Embankment dam - engineering. In: HIRSCH FIELDE.; POULOS, S. (Ed.) Casa grande memorial, New York: Wiley, 1973.. v.E. p. 47-86.

LABUZ, J. F., ZANG, A. (2012) Mohr–Coulomb Failure Criterion. Rock Mech Rock Eng (2012) V:45: p. 975–979

LANNA, et al. Aplicabilidade de Análises de Estabilidade Tridimensionais em Taludes de Mina a Céu Aberto a partir de Modelo de Blocos Geotécnico. COBRAMSEG, Agosto de 2022.

LEAPFROG Geo, 2021.2.4, Seequent, 2021.

MCQUILLAN, et al. Three-dimensional slope stability modelling and its interoperability with interferometric radar data to improve geotechnical design. Slope Stability 2020. Perth, Austrália. 2020.

MORGENSTERN, N. R., & PRICE, V. E. (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces. *Geotechnique*, London, v.15, n.1. p. 79-83.

MOROTE, C. H. S. (2006). Estabilidade e Deformação de Taludes de Solo sob Carregamento Sísmico. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

OLIVEIRA, D. M. A. de. (2019). Análise de estabilidade tridimensional e estudo de sensibilidade dos parâmetros condicionantes da ruptura de um talude de cava. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

READ, J., & STACEY, P. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design. Published November 18, 2009. p. 510.

ROCSCIENCE. (2019). Slide3 – 3D Limit Equilibrium Slope Stability Overview. p. 9.

ROCSCIENCE. (2020). Surface Altering: Rocscience's Homegrown Optimization Algorithm. Disponível em: Surface Altering: Rocscience's Homegrown Optimization Algorithm Acesso em: Abril, 2022.

ROCSCIENCE. (2022). Cuckoo Search. Disponível em: <https://www.rocscience.com/help/slide3/documentation/slip-surfaces/slip-surface-options/cuckoo-search>. Acesso em: Abril, 2022.

SALA, L. A. (2022) Metodologia de Construção de Modelo Geotécnico com uso de Geoestatística. Dissertação. (Mestrado em Geotecnia). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

SLIDE 2 Modeller. 2D limit equilibrium analysis for slopes. Versão 9.016. Rocscience Inc, 2021.

SLIDE 3, 3D slope stability analysis, versão 3.016. Rocscience Inc, 2021.

SJÖBERG, J. (1999). Analysis of Large Scale Rock Slopes. Doctoral Thesis, Division of Rock Mechanics. Luleå University of Technology, Sweden.

SPENCER, E. E. (1967). A method of the analysis of the stability of em-bankments assuming parallel interslice forces. *Géotechnique*, London, v.17. p. 11-26.

ANEXOS

Tabela de definição do Grau de Perturbação (D)		
Aparência do maciço rochoso	Descrição do maciço rochoso	Valor sugerido de D
	Desmorte com explosivos com excelente controle e qualidade ou escavação realizada por tunnel boring machine (TBM) que resulta em perturbações mínimas do maciço rochoso confinado em torno do túnel.	D = 0
	Escavação manual ou mecânica em maciços rochosos de má qualidade, gerando perturbações mínimas do maciço rochoso do entorno. Onde problemas de esmagamento resultam em levantamentos significativos do fundo, a perturbação pode ser alta, a menos que um aterro provisório seja colocado, como mostra a figura.	D = 0
		D = 0,5 (sem aterro)
	Alinhamento de perfuração de baixa qualidade, projeto de carga e sequência de detonação que resultam em desmontes de baixa qualidade e geram graves danos em um túnel de rocha dura, estendendo de 2 a 3 metros no maciço rochoso circundante.	D = 1,0 com diminuição linear até D= 0 a \pm 0,2 metros no maciço rochoso circundante.
	Desmontes com explosivos de pequena escala em encostas resultam em danos modestos ao maciço rochoso quando o controle de desmorte é utilizada, como mostrado no lado esquerdo da fotografia. O desmorte não controlado pode resultar em danos significativos à face da rocha.	D = 0,5 para desmorte controlado
		D = 1,0 para desmontes de produção
	Em alguns maciços rochosos fracos, a escavação pode ser realizada por "ripping and dozing". Os danos aos taludes se devem primariamente ao alívio de tensões. Os taludes de minas à céu aberto de grande porte sofrem perturbação devido a detonação de produção e ao alívio de tensões devido a remoção de sobrecarga.	D = 0,7 para efeitos de redução de tensões provocados por escavações mecânicas
		D = 1,0 para desmontes de produção. Um valor transicional de D relacionado aos efeitos do relaxamento de tensões pode ser derivado do Grau de Perturbação (D).