

Análise de Estabilidade de Taludes em Mineração a Céu Aberto: Estudo de Caso em Vidal Ramos, SC

Thais Lencina

Engenheira de Minas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil,
thais.lencina@ufrgs.br

André Cezar Zingano

Professor Titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, Brasil,
andrezin@ufrgs.br

RESUMO: Este trabalho apresenta a análise de estabilidade dos taludes de uma mina localizada em Santa Catarina, com o objetivo de verificar a segurança operacional e propor ajustes geométricos para a cava final. A metodologia incluiu mapeamento geomecânico de campo, ensaios laboratoriais de resistência de rochas e solos, análise cinemática das descontinuidades e modelagem numérica utilizando softwares específicos. Foram avaliados taludes de bancada e taludes globais, considerando escorregamentos planares, em cunha e tombamentos. As propriedades geomecânicas foram determinadas para calcário, dolomito, arenito, xisto e folhelho. Os resultados mostraram fatores de segurança adequados na cava atual e a necessidade de ajustes nos taludes em solo residual para o projeto final. A estabilidade dos Depósitos de Contenção de Estéril também foi confirmada. Conclui-se que, com pequenas correções geométricas e controle de drenagem, a mina pode manter a estabilidade global com segurança operacional adequada.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, mineração, análise cinemática, modelagem numérica, segurança operacional.

ABSTRACT: This study presents the slope stability analysis of a mine located in Santa Catarina, aiming to verify operational safety and propose geometric adjustments for the final pit design. The methodology included field geomechanical mapping, laboratory testing of rock and soil strength, kinematic analysis of discontinuities, and numerical modeling using specialized software. Bench slopes and overall pit slopes were evaluated, considering planar, wedge, and toppling failures. Geomechanical properties were determined for limestone, dolomite, sandstone, schist, and shale. The results showed adequate safety factors for the current pit and indicated the need for adjustments in the slopes of the residual soil for the final design. The stability of the Waste Containment Deposits was also confirmed. It is concluded that, with minor geometric corrections and drainage control, the mine can maintain overall stability with appropriate operational safety.

KEYWORDS: slope stability, mining, kinematic analysis, numerical modeling, operational safety.

1 INTRODUÇÃO

A Mina do estudo de caso, localizada em Vidal Ramos (SC), dedica-se à extração de calcário para produção de cimento e, embora não apresente problemas recentes de instabilidade em seus taludes (bancadas ou global) ou no Depósito de Estéril (DCE), a empresa solicitou este estudo para validar suas práticas operacionais e geometrias de cava. O objetivo é assegurar conformidade com padrões de segurança internos e normativos, além de otimizar a relação estéril/minério. Ressalta-se que o DCE já registrou instabilidade no passado, solucionada pela empresa, reforçando a necessidade de uma avaliação contínua.

Antes do início dos trabalhos de campo e modelagem, foi realizada uma setorização da mina (Figura 1), dividindo-a em setores representativos com base na orientação dos taludes e características geológico-estruturais predominantes. Essa divisão permitiu uma análise mais direcionada das condições de estabilidade, considerando as particularidades de cada segmento da cava.

O trabalho tem como objetivos: (i) analisar a estabilidade do talude global e das bancadas da cava final, bem como do DCE atual e projetado, considerando propriedades geomecânicas das rochas e do estéril;

(ii) aplicar metodologia integrada envolvendo mapeamento de descontinuidades (*scanlines*), ensaios laboratoriais (uniaxial), análise cinemática setorizada, análises de equilíbrio limite (com os softwares *Slide*, *Swedge*, *Rocplane* e *RocTopple*) e simulação numérica pelo método dos elementos finitos (com o software *RS2*), todos da *Rocscience Inc.* (2023); e (iii) validar os fatores de segurança (FS) adotados (1,3 para cavas; 1,5 para DCE), conforme diretrizes para minerações céu-aberto (Willi e Mah, 2005).

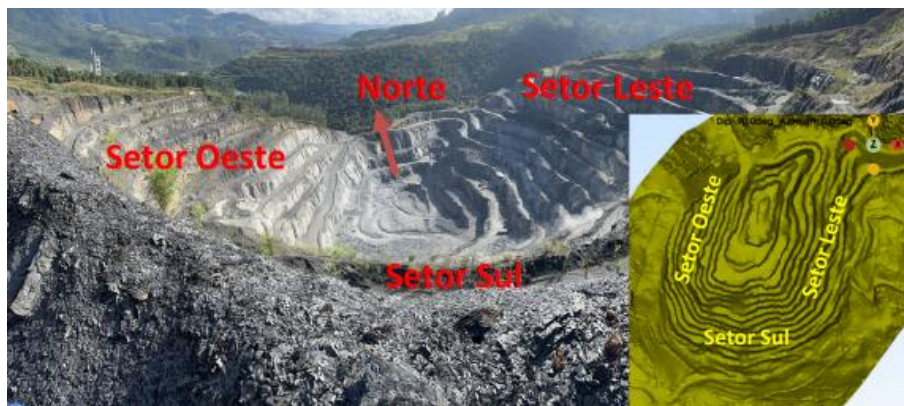


Figura 1. Setorização da mina

2 METODOLOGIA

Em função da revisão das metodologias de análise de estabilidade e cálculo do fator de segurança para os taludes em rocha, a metodologia utilizada para atingir os objetivos deste trabalho foi definida como segue:

- (i) Visita à mina, compilação das informações da mina, principalmente a topografia atual;
- (ii) Mapeamento e caracterização das descontinuidades por meio de scanlines nos taludes em bancadas;
- (iii) Coleta de amostras para ensaios em laboratório para definir as propriedades mecânicas das rochas e descontinuidades;
- (iv) Geração dos estereogramas para as descontinuidades e relação com as altitudes dos taludes;
- (v) Ensaios de laboratório: uniaxial, triaxial, tração e propriedades físicas;
- (vi) Análise cinemática para os diversos setores da cava com objetivo de definir os potenciais tipos ou geometrias de escorregamentos para cada setor das cavas e medir os ângulos dos taludes (global e bancadas);
- (vii) Construir os modelos para análise de estabilidade utilizando duas abordagens complementares: análises de equilíbrio limite (com os softwares *Slide*, *Swedge*, *Rocplane* e *RocTopple*) para a verificação de fatores de segurança, e simulação numérica pelo método dos elementos finitos - MEF (com o software *RS2*) para a análise de distribuição de tensões e deformações, todos da *Rocscience Inc.* (2023);
- (viii) Definição dos fatores de segurança para cada setor das cavas e para os diferentes tipos de taludes;
- (ix) Redesenho da geometria da cava, caso algum setor apresente FS menor que o FS limite.

2.1 Caracterização da área de estudo

A geologia para a mina (Figura 2), de maneira geral, é formada por camadas de calcário sendo, na cota mais inferior da cava uma alternância de calcário calcítico, dolomito e xisto. Acima do xisto há lentes de calcáreo calcítico, dolomítico e xisto, os quais são sobrepostos por uma camada de arenito e outra de folhelho muito sensível a intempérie. No topo da cava tem uma porção espessa de solo residual e folhelho alterado. As janelas de descrição geomecânica foram montadas principalmente nessas faces de forma a definir as principais descontinuidades em relação a essas faces e suas implicações em termos de estabilidades.



Figura 2. Geologia da cava atual

2.2 Levantamento de dados de campo e ensaios

O trabalho de campo foi realizado entre os dias 20 e 24 de março de 2023. Os diferentes tipos de rochas foram descritos de forma a obter as propriedades e orientação das descontinuidades. As descrições utilizaram o método de janelas sendo que a janela considera as famílias de juntas e seu espaçamento entre as juntas de uma mesma família e as propriedades de rugosidade e resistência do enchimento de cada família.

Além das descrições em campo, foi realizado o mapeamento de fraturas utilizando a fotografia tridimensional para obtenção de estereograma mais representativo das descontinuidades. O levantamento fotográfico, por meio de drone, foi realizado nos três setores da cava (sul, leste e oeste). As fotos foram processadas em software de construção de imagem tridimensional, a qual foi a base para as medidas de descontinuidades no software *GEM4D* (BasRock Pty Ltd., 2023). A Figura 3 apresenta um exemplo da última etapa de construção destes modelos, onde é marcada a orientação das descontinuidades mais expressivas.

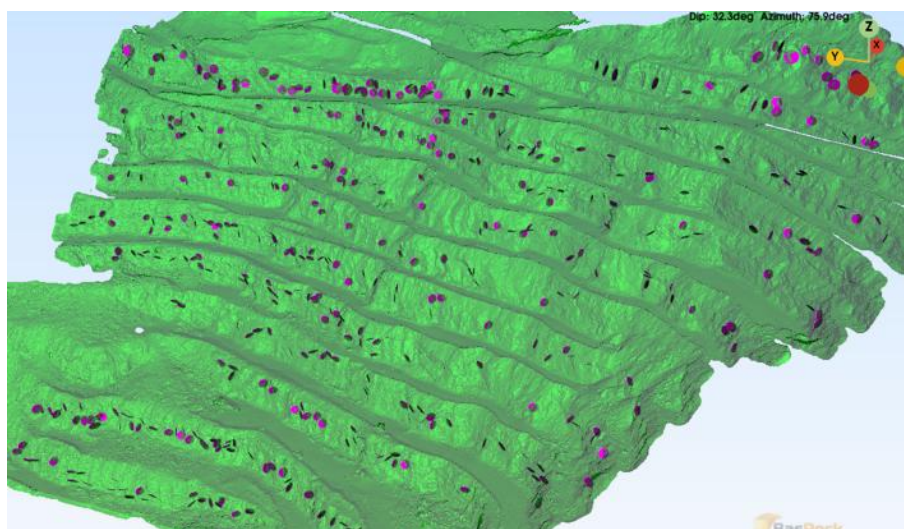


Figura 3. Modelo 3D face leste com as orientações das descontinuidades

Por último, foram recolhidos blocos para a extração de amostras para ensaios de compressão uniaxial – realizados de acordo com a norma D7012 da ASTM (2014). Estes ensaios tiveram como objetivos determinar a resistência à compressão da rocha intacta e suas propriedades deformacionais, representadas pelo módulo de Young e coeficiente de Poisson. A resistência do maciço rochoso foi subsequentemente estimada através de critérios geomecânicos que incorporam tanto a resistência da rocha intacta quanto as características das descontinuidades do maciço.

A partir das observações e descrição de campo se pode concluir que o maciço é muito fraturado com rochas de resistência média a baixa. Essa resistência baixa é devido ao folhelho no topo da cava. Esse fraturamento é salientado pelo desmonte de rochas que deixa as fraturas abertas nas paredes dos taludes.

Foram realizados ensaios de laboratório para definir a resistência das rochas, principalmente das rochas encaixantes, porque são as rochas encontradas nos taludes e nas discontinuidades. A Tabela 1 abaixo resume os valores das propriedades de resistência de cada material.

Tabela 1. Propriedades mecânicas das rochas e solos

Parâmetro	Calcário	Dolomítico	Xisto	Arenito	Folhelho	Solo
GSI	100	100	100	100	-	-
Resistência intacta (MPa)	110	93	54	63	-	-
Módulo intacto (MPa)	6500	8000	5000	7000	-	-
mi (critério <i>Hoek-Brown</i>)	12	10	10	17	-	-
Coesão – c (MPa)	21,3	20,7	10,9	11,5	2,3	0,1
Ângulo de atrito interno (°)	45,0	41,8	43,0	48,4	35,0	30,0

Com os resultados, foram estimados os parâmetros para o maciço rochoso e para as discontinuidades. Esse processo de definição das características tem como etapa intermediária a classificação geomecânica. No caso em estudo foi utilizada a classificação geomecânica GSI – *Geological Strength Index* (Hoek e Brown, 1997; Willi e Mah, 2005).

2.3 Modelagem e análise de estabilidade dos taludes

A Figura 4 abaixo mostra os setores da cava e estereogramas de representação das discontinuidades mapeadas em campo para a mina. Esses estereogramas são correspondentes aos setores leste e oeste; o setor sul não apresentou estereograma devido a problemas nas fotos. Baseado nas medidas, as orientações das principais famílias de fraturas e tipos de fraturas foram definidas da seguinte forma: F1 (76° dip – 65° dip direction), F2 (53° dip – 87° dip direction), F3 (58° dip – 147° dip direction) e F4 (49° dip – 197° dip direction). Essas discontinuidades foram medidas nas camadas de calcáreo, xisto e arenito. No folhelho não foi considerado porque os escorregamentos não devem ocorrer nas discontinuidades devido à baixa resistência da rocha.

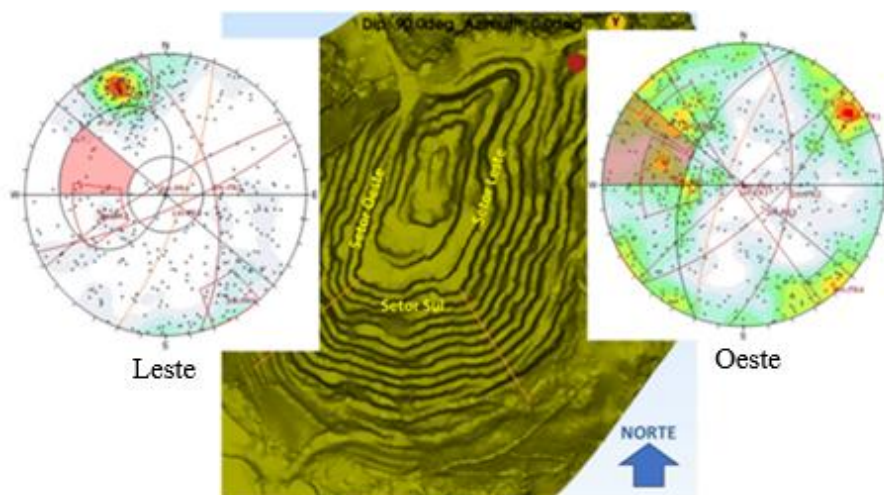


Figura 4. Estereogramas do setor leste e oeste

Para as bancadas, foram identificadas possibilidades de escorregamento planares para o setor oeste e tombamento para o setor leste da mina. A frente de lavra ativa na face norte, por estar em contínuo avanço e apresentar uma geometria temporária, não apresenta risco imediato de ruptura. No entanto, a análise cinemática voltada para a geometria consolidada do talude norte – assim como dos taludes sul, noroeste e oeste – indicou que o risco de tombamento e ruptura planar se faz presente. Isso ocorre porque, uma vez

estabilizada, a orientação desse talude em relação às famílias de descontinuidades (principalmente F2 e F3) torna-o susceptível a esses mecanismos de queda. Partindo dessa análise cinemática foram construídos os modelos para análise de estabilidade e cálculo do fator de segurança de cada uma das seções e de cada talude (global e bancada).

A análise de estabilidade dos taludes levou em consideração os seguintes dados de entrada: (i) cava atual e global; (ii) geometria e orientação (*dip - dip direction*) dos taludes de cada setor; (iii) orientação (*dip - dip direction*) das descontinuidades; (iv) propriedades mecânicas das descontinuidades e do maciço rochoso. Esses fatores foram utilizados para análise de estabilidade pra o talude global e talude de bancada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados para a cava da mina

As cavas foram divididas em três partes: solo residual, folhelho e rocha maciça. Desta forma, as propriedades desses três materiais foram consideradas na estabilidade global. O talude global foi analisado por meio de métodos de equilíbrio limite e método numérico por meio de métodos dos elementos finitos. A análise global (Figura 5) foi realizada por meio de modelos tridimensionais com seleção em cada setor da cava. Foi possível observar que os fatores de segurança estão acima dos FS mínimos sugeridos pela bibliografia, o qual seria 1,5. Também, que os taludes nos três tipos de materiais apresentam FS compatíveis.

No entanto, as cavas final e decenal apresentaram fatores de segurança 1,0 na porção do solo residual porque as bancadas foram projetadas igual às bancadas em rocha. Isso pode ocorrer devido à automação do software de planejamento de lavra ou descuido na definição da geometria das bancadas nesse setor.

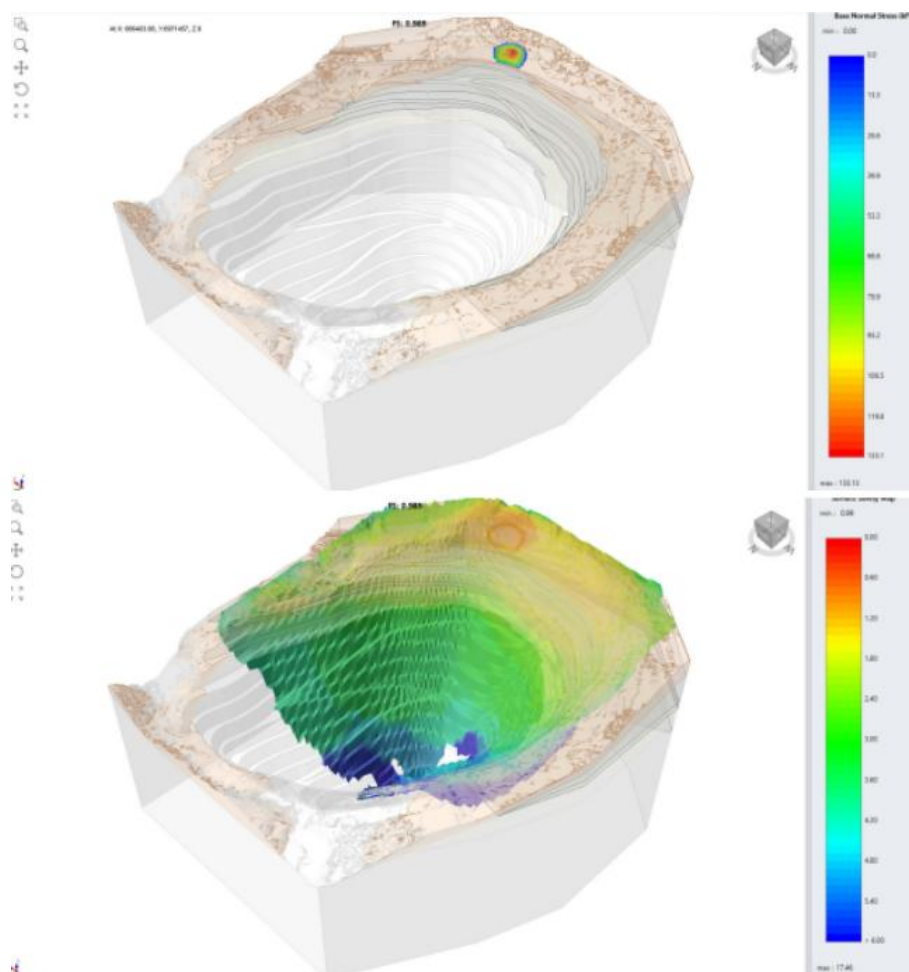


Figura 5. Resultado análise de estabilidade global

Com base na análise de estabilidade das bancadas, identificou-se que os setores oeste e sul apresentam risco crítico de escorregamento associado à família de descontinuidades F2 (orientação paralela aos taludes), enquanto o setor leste sofre maior influência de tombamento. A família F3, apesar de potencialmente crítica, não representa risco significativo de escorregamento devido ao seu alto mergulho (80°), superior à inclinação das bancadas ($70^\circ - 75^\circ$). Já a família F2 (mergulho médio de 55°) demonstra comportamento distinto por material: na porção rochosa, o alto FS (1,9) indica estabilidade com taludes de $70^\circ - 75^\circ$, mas no folhelho, o FS reduz para 1,3 – abaixo do mínimo recomendado – devido à menor resistência e rugosidade das descontinuidades, exigindo taludes de cerca de 60° para mitigar riscos.

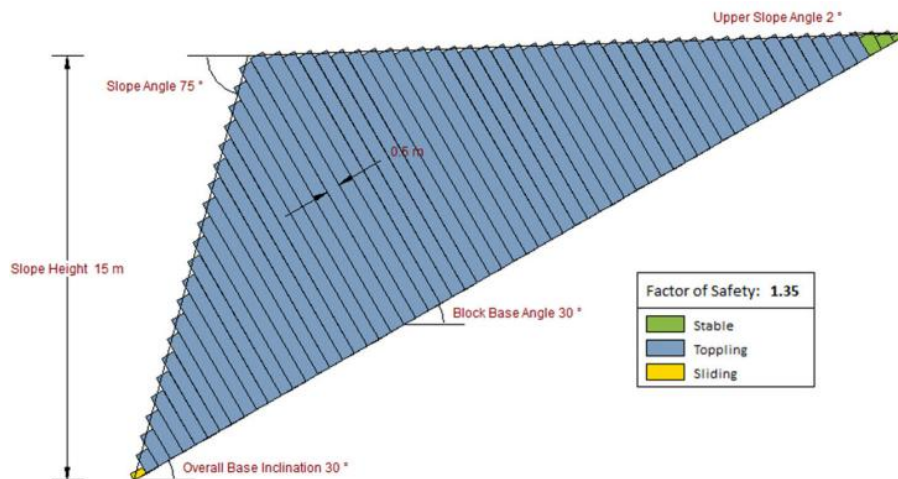


Figura 6. Análise de bancada para o setor leste da cava

A Figura 6 acima apresenta a análise de bancada para o setor leste, a família F2 mergulha para dentro do maciço, não causando escorregamento. Entretanto, essa família junto com a família F3 apresentam pequenos blocos por tombamento e queda. Esse tipo de fenômeno é devido ao desmonte que solta esses blocos devido à vibração. O fator de segurança para o setor leste está em 1,35 para o tombamento do talude das bancadas na porção da rocha e considerando o talude com ângulo de 75° . Para o setor sul, a análise cinemática não mostrou a influência de alguma família específica.

Os taludes globais por estarem acima do FS mínimo poderiam ser redesenhados de forma a aumentar a recuperação da jazida e ainda manter os patamares de segurança acima dos limites mínimos. Sugere-se um talude global com $60 - 65^\circ$ de ângulo global com bancadas de 5 e 7 m de largura para a rocha, folhelho e solo, respectivamente, e 15 m de altura. O fator de segurança para essa proposta está em 1,65, ainda acima do fator de segurança mínimo requerido pela bibliografia.

Com base nos fatores de segurança obtidos, foram estabelecidas configurações geométricas específicas para a fase operacional e para a cava final. Para a fase operacional, em maciços rochosos, recomenda-se taludes com ângulo de 70° a 75° , com bancadas de 15 m de altura e bermas de 12 a 15 m de largura. Para os taludes em folhelho, um ângulo de 60° é adequado, mantendo-se a mesma altura de bancada e largura de berma. Para a cava final, é viável projetar alturas de bancada ampliadas, de 30 m na porção rochosa e 15 m no solo residual, associadas a bermas mais estreitas de 5 a 7 m de largura. A inclinação dos taludes em folhelho na cava final pode variar entre 50° e 60° , dependendo da resistência específica do material confirmada em campo.

3.2 Resultados para o DCE

Os DCEs projetados – localizados ao norte e sul da cava – apresentaram estabilidade adequada conforme análises 3D e seções 2D derivadas. O material estéril, caracterizado por granulometria ampla (areia fina a blocos de 50 cm), atendeu aos critérios normativos, com fatores de segurança (FS) superiores ao mínimo de 1,5. Para o DCE norte (Figura 7), o FS médio global foi de 1,7, enquanto a bancada mais elevada registrou 1,6; um ponto isolado com FS reduzido foi atribuído à inconsistência no desenho da pilha, sem comprometer a segurança geral. No DCE sul, as seções (direção NE) alcançaram FS acima de 1,8 para

bancadas e superior a 2,0 para o talude global, confirmando robustez geotécnica em toda a extensão. Esses resultados validam a geometria proposta para ambos os depósitos.

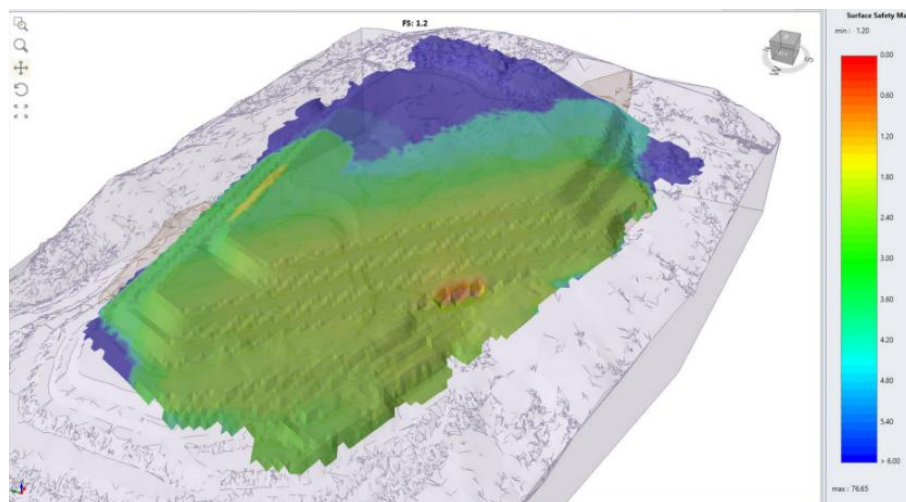


Figura 7. Mapa de FS para o DCE norte

4 CONCLUSÕES

Os objetivos deste projeto foram alcançados, uma vez que as análises de estabilidade realizadas para o estudo de caso demonstraram consistência com o comportamento observado *in situ*. O trabalho de campo, conduzido em março de 2023, foi fundamental para a coleta de dados e identificação de pontos críticos, validando as modelagens subsequentes. Os resultados confirmam a viabilidade das geometrias propostas, com fatores de segurança globais e por bancadas superiores ao mínimo normativo de 1,5, atingindo médias de 1,7 para taludes em maciço rochoso. Essa correlação entre modelos teóricos e condições reais reforça a confiabilidade das diretrizes adotadas.

Para garantir a estabilidade a longo prazo, as recomendações incluem o ajuste das inclinações dos taludes de acordo com as resistências dos materiais, a implementação de medidas de proteção superficial para controle de erosão e um rigoroso controle hidrológico por meio de sistemas de drenagem. As configurações geométricas operacionais e para a cava final foram definidas com base na análise de estabilidade realizada, assegurando o atendimento aos fatores de segurança recomendados.

Por fim, o estudo assegurou condições operacionais e finais seguras, alinhadas às normas técnicas e às particularidades geomecânicas da mina. A observação contínua de blocos soltos em setores rochosos e a implementação rigorosa das medidas de drenagem e proteção superficial são críticas para a sustentabilidade da lavra. Futuros trabalhos poderão explorar a otimização de bermas em setores de geometria final precoce, visando equilíbrio entre segurança e eficiência operacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor. Os autores também agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que por meio do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro (LPM) tornou possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM International (2014). ASTM D7012: *Standard test methods for compressive strength and elastic moduli of intact rock core specimens under uniaxial stress*. West Conshohocken, PA, USA.

BasRock Pty Ltd. (2023) *GEM4D – Geotechnical Mapping and Modelling in 3D*. Disponível em: <<https://www.basrock.net/gem4d>>. Acesso em: 02 jun. 2023.



Hoek, E. and Brown, E.T. (1997). *Practical Estimates of Rock Mass Strength*. International Journal Rock Mechanics Mining Science, 34, 1165-1186.

Rocscience Inc. (2023). *Rocscience Software Suite – Slide, RS2, Swedge, RocPlane, RocTopple, Dips, RocData*. Toronto, ON, Canada. Disponível em: <<https://www.rocscience.com>>. Acesso em: 10 jun. 2023.

Wyllian e Mah (2005), *Rock Slope Engineering*, 4th Edition, Taylor & Francis Group, 456pag.