

**AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DE TALUDES ROCHOSOS DE UMA  
CAVA EM PROCESSO DE FECHAMENTO**

Ian Kanji Nunes Yonezawa <sup>1</sup>; Ediellen Fidelis de Souza Silva <sup>2</sup>; Orlando Faria Prado <sup>3</sup>; Ariel Henrique Pozzobon <sup>4</sup>; Matheus Moutinho Marques<sup>5</sup>; Jomane Casagrande <sup>6</sup>

**Resumo** – Após os acidentes de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, a preocupação com empreendimentos minerários no Brasil tem crescido, não apenas com relação a disposição de rejeitos, mas também com um planejamento adequado para o término das atividades da mina como um todo. Nesse contexto, a maioria das operações minerárias existentes e planejadas requerem um plano de fechamento direcionado a um uso sustentável do local, após o encerramento das atividades (de Graaf et al. 2024). Desse modo, esse artigo analisa a estabilidade dos taludes de uma cava exaurida, em uma mina de ouro no norte do Brasil, através dos dados adquiridos durante o mapeamento geomecânico e os ensaios de laboratório realizados em testemunhos de rocha, visando fornecer um laudo de segurança geotécnica.

**Abstract** – After the accidents of Mariana in 2015 and Brumadinho in 2019, concerns about mining ventures in Brazil have grown, not only regarding the disposal of tailings but also about adequate planning for all mining activities. In this context, most existing and planned mining operations require a closure plan aimed at sustainable use of the site after the cessation of activities (de Graaf et al. 2024). Thus, this article analyzes the slope stability of an exhausted open pit in a gold mine in northern Brazil through data acquired during geomechanical mapping and laboratory tests carried out on rock cores to provide a geotechnical safety report.

**Palavras-Chave** – Estabilidade de taludes rochosos, análise cinemática; equilíbrio limite; mapeamento geomecânico.

---

<sup>1</sup> Geó, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (14) 99790-8743, [ian.yonezawa@dam.com.br](mailto:ian.yonezawa@dam.com.br)

<sup>2</sup> Eng, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (38) 98814-3403, [ediellen.silva@dam.com.br](mailto:ediellen.silva@dam.com.br)

<sup>3</sup> Geó, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (48) 99601-4222, [orlando.prado@dam.com.br](mailto:orlando.prado@dam.com.br)

<sup>4</sup> Geó, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (48) 99137-2043, [ariel.pozzobon@dam.com.br](mailto:ariel.pozzobon@dam.com.br)

<sup>5</sup> Geó, HIDROBR: Belo Horizonte – MG, (31) 99600-6580, [mateusmoutinhom@gmail.com](mailto:mateusmoutinhom@gmail.com)

<sup>6</sup> Eng, Prefeitura Municipal de Contagem: Contagem – MG, (31) 97353-5382, [jomanecasagrande@gmail.com](mailto:jomanecasagrande@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

A maioria das operações minerárias existentes e planejadas requerem um plano de fechamento direcionado a um uso sustentável do local, após o encerramento das atividades (de Graaf et al. 2024). Desse modo, após o exaurimento de uma cava em uma mina de ouro, localizada no norte do Brasil, a empresa responsável pelo empreendimento contratou um estudo de estabilidade do local, visando obter, primeiramente, um laudo de segurança geotécnica.

Portanto, esse trabalho visa analisar a estabilidade dos taludes da cava, através dos dados adquiridos durante o mapeamento geomecânico e os ensaios de laboratório realizados nos testemunhos de rochas do local, que foram obtidos durante a campanha de sondagem do estudo de viabilidade.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO GEOLÓGICA

A mineralização onde a cava foi implantada é constituída por brechas vulcânicas máficas alteradas, correspondente a principal zona de minérios, além das máficas hidrotermais e brechadas, cujo comportamento geomecânico é de uma massa de rocha maciça, devido à silicificação. Ademais, também ocorre um dique de gabro, que intruiu o sul da mineralização, e litologias com intenso fraturamento e alteração de sílica-albita.

Por fim, devido a intensa pluviometria do local, todas essas rochas são cobertas por uma fina camada de solo, com cerca de 2 a 3,0 m de espessura, sobreposto ao horizonte saprolítico, que varia de cerca de 10 a 30,0 m.

## 3. CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA

### 3.1. Mapeamento Geomecânico

De acordo com os dados obtidos durante o mapeamento, foi constatado que:

- O maciço rochoso é bem homogêneo, com três padrões de fraturamento mais evidentes e discrepantes, o primeiro, mais abundante, possui grau baixo (F2/F1), exibindo 2 a 6 fraturas por metro e espaçamento médio superior 20 cm, além de valores de RQD variando entre 80% e 95%; o segundo, mais raro, tem grau (F2/F3), espaçamento médio entre 15 cm e 30 cm, além de valores de RQD variando entre 60% a 70%; por fim, um terceiro é visível de forma muito localizada, com grau mais elevado (F4), valores de RQD próximos de 40%, espaçamento médio entre fraturas menor que 10 cm e ocorrendo em regiões muito perturbadas do maciço rochoso, como zonas de falhas e cisalhamentos;
- O horizonte de intemperismo, composto por solo residual e saprolito, é identificado na faixa superficial de 10 m a 30 m, mas com profundidade média em torno de 15 m;
- Praticamente toda cava é composta por uma brecha hidrotermal, intrudida por diques de gabro em alguns locais e com grau de alteração e fraturamento aumentando em direção a superfície;
- Devido a baixíssima permeabilidade da rocha intacta, sua presença abaixo do horizonte de intemperismo, é pouco frequente e restrita as estruturas geológicas, como as zonas de cisalhamento e de falhas;
- As fraturas são normalmente rugosas ou estriadas, unidirecionais e planares, geralmente fechadas e sem preenchimento, além de raramente evidenciarem fluxo de água.

### 3.2. Domínios Geotécnicos

Por meio das classificações geomecânicas obtidas durante o mapeamento e dos resultados dos ensaios de laboratório, foram definidos 04 (quatro) principais domínios geotécnicos para o maciço da cava. Os ensaios foram realizados nas litologias mais representativas, como brechas e

rochas máficas, que resultaram em um valor médio de resistência a compressão uniaxial de 170 Mpa,  $\mu$  igual a 20, módulo de Young de 80 Mpa e coeficiente de Poisson de 0,2.

O primeiro domínio está situado na porção mais superficial do maciço, com profundidades máximas de cerca de 30,0 m, até os dois primeiros bancos, cujo intenso intemperismo o caracteriza como solo residual e saprólito, tornando esse horizonte sujeito apenas a rupturas do tipo circulares e com os seguintes parâmetros geotécnicos:

- Coesão – 0,3 MPa
- Angulo de Atrito – 28°

O segundo domínio, situado abaixo do primeiro, apresenta um padrão de alteração moderado, grau de fraturamento elevado, com pelo menos 03 (três) famílias de fraturas, com características abertas, rugosas e oxidadas, preenchidas por materiais ligeiramente alterados, espaçamento médio inferior a 10 cm, RQD de aproximadamente 40%. Apesar do grau de alteração mais elevado, as rupturas nos taludes já deverão ser mais estruturalmente controladas, com o maciço apresentando os seguintes parâmetros geotécnicos:

- RMR (*Rock Mass Rating*) – 45
- GSI (*Geological Strength Index*) - 40
- Resistencia a Compressão Uniaxial (UCS) – 170 Mpa
- Modulo de Deformação (E) – 17.667MPa

Com relação ao terceiro domínio, localizado abaixo do segundo e de ocorrência mais localizada, possui um padrão de alteração quase nulo, grau de fraturamento moderado, também com pelo menos 03 (três) famílias de fraturas, com características rugosas e geralmente seladas, estruturas preservadas, espaçamento médio entre 10 cm e 20 cm e RQD de aproximadamente 70%. O baixo intemperismo nessa porção do maciço, torna-o sujeito apenas a rupturas estruturalmente controladas, com os seguintes parâmetros geotécnicos:

- RMR (*Rock Mass Rating*) – 70
- GSI (*Geological Strength Index*) – 65
- Resistencia a Compressão Uniaxial (UCS) – 170 Mpa
- Modulo de Deformação (E) – 43.927 MPa

Por fim, o quarto domínio é caracterizado pelo baixíssimo grau de alteração e fraturamento, com 03 (três) famílias de fraturas, com características seladas, secas, unidirecionais, ligeiramente onduladas, rugosas e/ou estriadas, com espaçamento superior a 30 cm e valores de RQD superiores a 90%, em alguns lugares alcançando até 95%. Assim como nos domínios dois e três, as rupturas também devem ser estruturalmente controladas, mas muito localizadas e restritas a um banco nos taludes. Para esse domínio foram definidos os seguintes parâmetros geotécnicos:

- RMR (*Rock Mass Rating*) – 85
- GSI (*Geological Strength Index*) – 80
- Resistencia a Compressão Uniaxial (UCS) – 170 MPa
- Modulo de Deformação (E) – 72.063 Mpa

#### 4. ANÁLISE CINEMÁTICA

Para uma melhor análise da cava foram definidos 09 (nove) setores, baseados na direção dos taludes, com o objetivo de tratar cada mecanismo de ruptura nas áreas com riscos maiores. A setorização é evidenciada na Figura 1 e o rumo de mergulho, de cada uma dessas zonas, na Tabela 1.

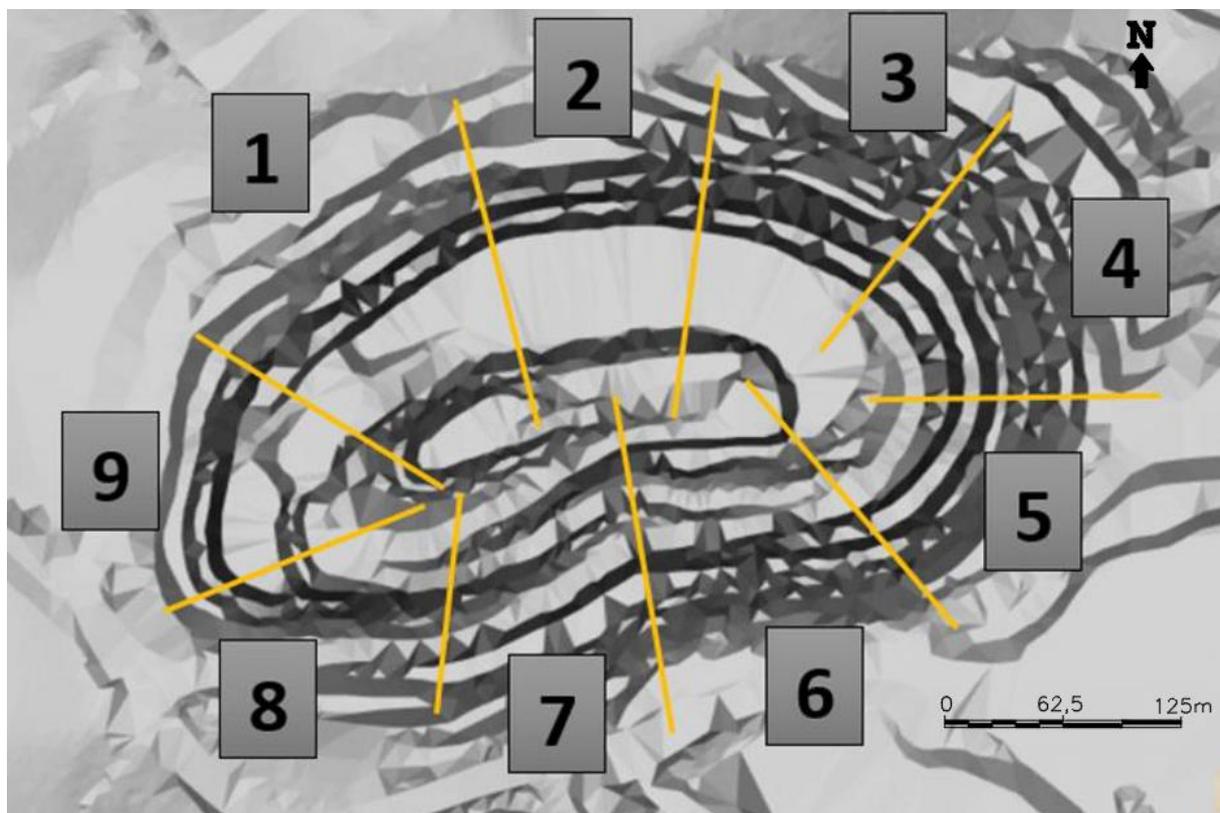


Figura 1. Setorização da cava, com sentido norte para cima.

Tabela 1. Direção do mergulho por setor.

Setor	Direção do Mergulho	Setor	Direção do Mergulho	Setor	Direção do Mergulho
1	145	4	265	7	345
2	190	5	305	8	025
3	225	6	360	9	100

Devido a elevada coesão das rochas, suas rupturas ocorrem pelas descontinuidades, estruturas muito pouco ou nada coesas, em que a resistência ao cisalhamento se dá pelo ângulo de atrito Wyllie (2017). Portanto, primeiramente foram realizadas análises cinemáticas, a fim de averiguar os modos de falha nos taludes entre bermas, utilizando o *software* Stereonet versão 11.5.4, produzido por Rick Allmendinger, que exhibe as estruturas a partir do hemisfério inferior do estereograma.

Foram identificadas 04 (quatro) famílias principais de descontinuidades, cujas medidas em clar (rumo do mergulho) são: F1 (306/05), F2 (06/82), F3 (162/81), F4 (132/88). Além disso, também foram evidenciadas outras 03 (três) secundárias, utilizadas apenas nas análises planares: F1P (10/35), F2P (45/30) e F3P (195/40).

Em razão do ângulo dos taludes entre bermas variar, geralmente, de 75 a 80 °, foi decidido utilizar o maior valor para verificar o pior cenário possível. Ademais, em razão das rochas, possuírem granulometria mais grosseira, baixo grau de alteração e suas fraturas serem, predominantemente rugosas, foi decidido utilizar 35° como ângulo de atrito nas análises cinemáticas, número considerado bem conservador, levando em conta a descrição do maciço rochoso.

Por fim, os círculos representam os polos dos planos das famílias de discontinuidades, utilizados para verificar as rupturas planares e em tombamento, enquanto os losangos, os polos das interseções desses planos, usados para averiguar as falhas em cunha. Portanto, como a região laranja é utilizada para analisar a possibilidade de rupturas planares e em cunha, mas a vermelha, apenas para tombamento, caso um losango (cunha) esteja posicionado na segunda, ele não representará uma possibilidade desse tipo de quebra. Vale destacar que, conforme mencionado anteriormente, as 03 (três) famílias secundárias, representadas pelos quadrados verdes, foram utilizadas apenas para análise de ruptura planar (área alaranjada).

Os estereogramas com os resultados das análises são apresentados nas Figuras 2 e 3.

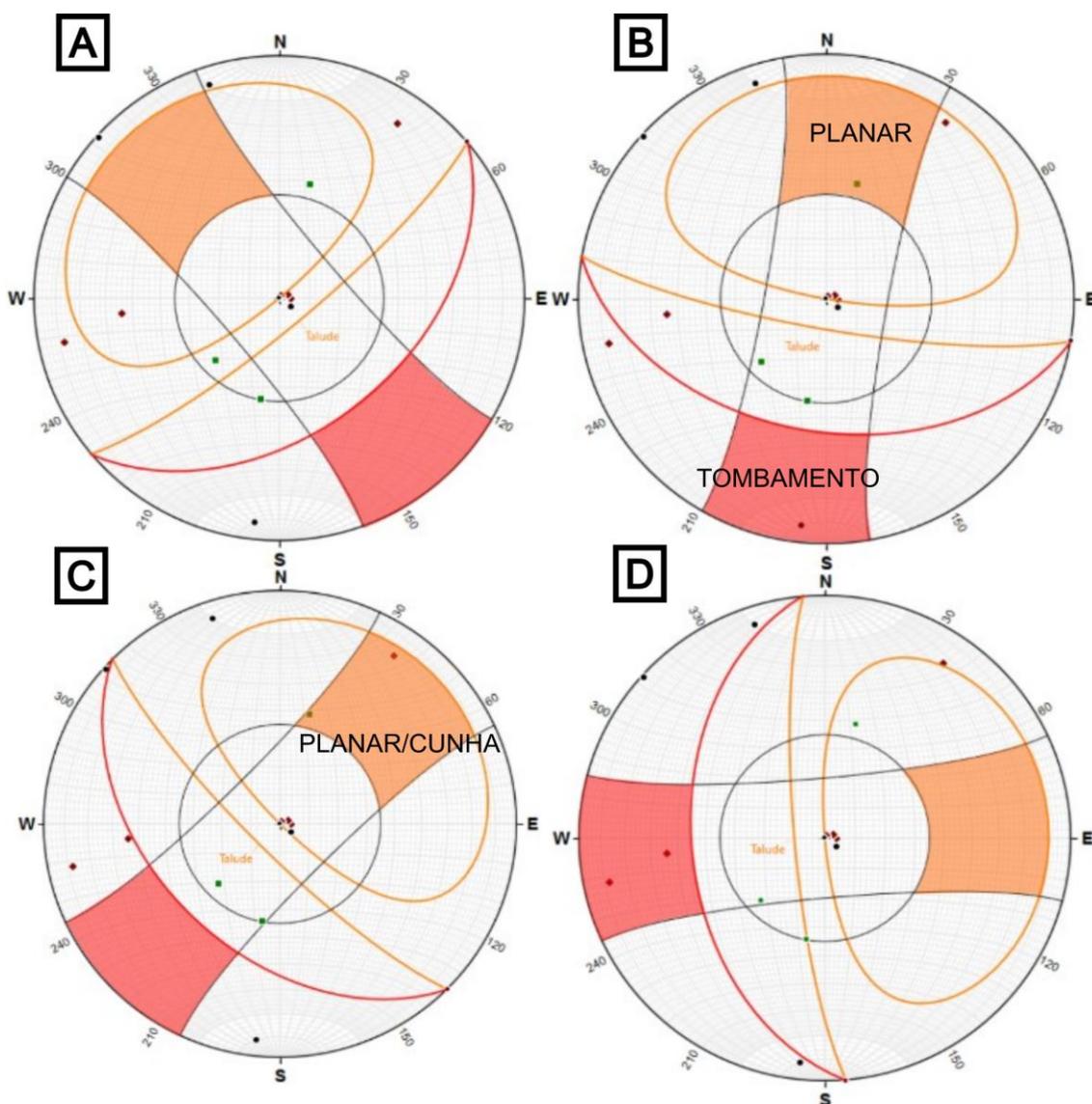


Figura 2. Estereogramas das análises cinemáticas: (A) - setor 1 (sem risco), (B) - setor 2 (risco de tombamento e ruptura planar), (C) - setor 3 (risco de ruptura em cunha e planar) e (D) - setor 4 (sem risco, losangos na área vermelha).

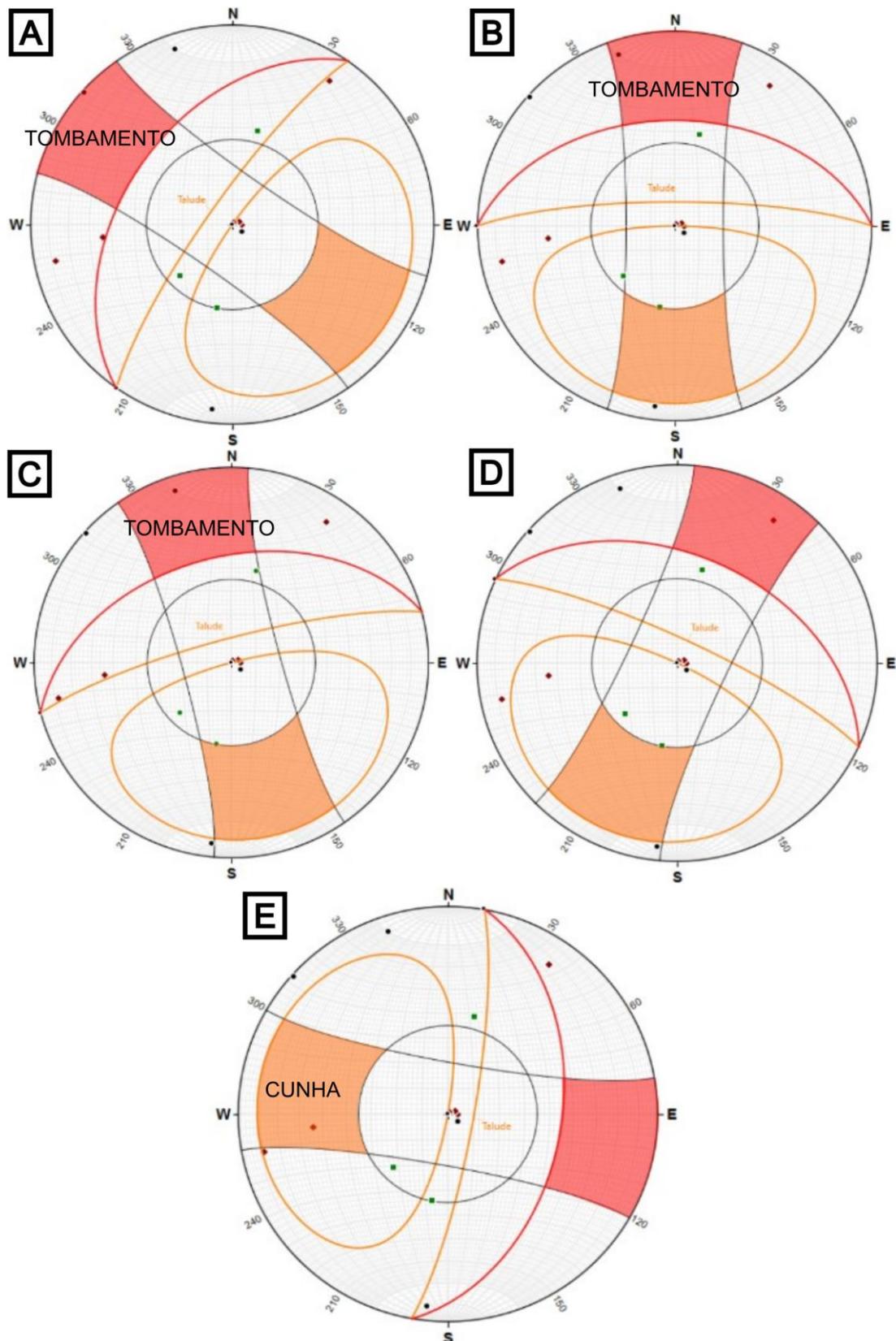


Figura 3. Estereogramas das análises cinemáticas: (A) - setor 5 (risco de tombamento), (B) - setor 6 (risco de tombamento), (C) - setor 7 (risco de tombamento), (D) - setor 8 (sem risco, losangos na área vermelha) e (E) - setor 9 (risco de ruptura em cunha).

Conforme pode ser observado nos estereogramas, apenas o setor 3 apresenta mais de um tipo de ruptura e os setores 1, 4 e 8 não demonstram nenhum tipo de falha estruturalmente controlada.

## 5. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

Tendo em vista a ausência de estruturas que proporcionem uma anisotropia significativa, como grandes planos de falhas ou foliações muito marcantes e penetrativas, como xistosidade, foram realizadas análises de estabilidade, em duas seções evidenciadas na Figura 4, a fim de verificar a possibilidade de ruptura global não circular nas encostas, por meio de equilíbrio limite, utilizando o *software* Slide versão 2.0, desenvolvido pela Rocscience, com a metodologia de Spencer, que satisfaz todas as condições de equilíbrio estático, correspondendo a paridade de forças nas direções vertical e horizontal, além de momentos em qualquer ponto (Duncan et al. 2014).

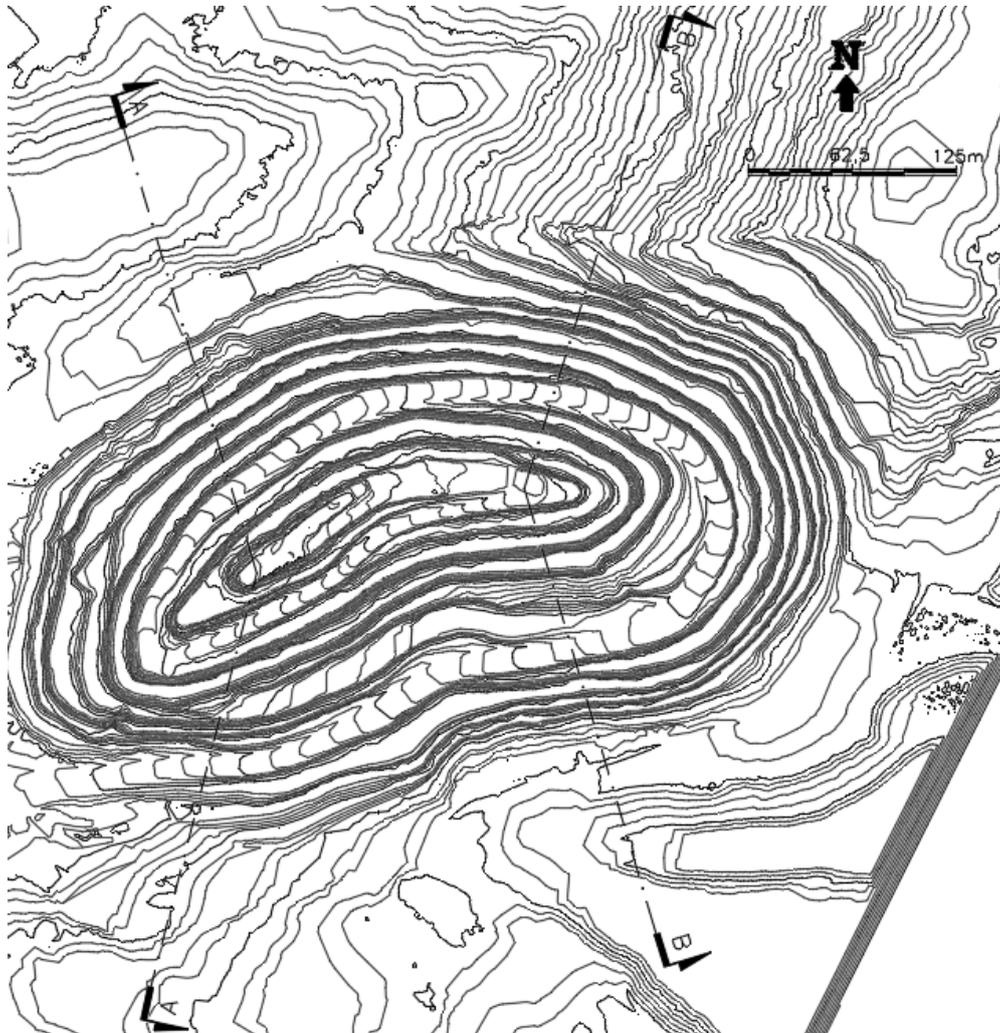


Figura 4. Localização das seções analisadas.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados para os materiais foram definidos com base nas descrições evidenciadas nos domínios geotécnicos. Para as rochas foram utilizados os parâmetros de Generalized Hoek-Brown, onde a litologia é considerada um meio isotrópico e sua resistência, na presença de discontinuidades, é penalizada pelo GSI (*Geological Strength Index*) Hoek (1994), tendo em vista que a rocha é um material com resistência heterogênea, em razão das suas estruturas, como foliações e fraturas, além do dano de detonações, não sendo recomendado o uso da metodologia de Mohr-Coulomb, como nas camadas mais superficiais compostas por solos e saprolitos. Devido a ausência de piezômetros no local, as poropressões foram estimadas por meio do coeficiente  $R_u$ , que modela a pressão neutra como uma fração da tensão vertical (Bishop & Morgenstern, 1960). Desse modo, de forma conservadora, foi utilizado o valor de 0.3, indicando que 30% do peso da coluna de rocha exerce uma poropressão no local. A Tabela 2 exibe um resumo dos dados e as Figuras 5 e 6 os resultados das análises de estabilidade em duas seções.

Tabela 2. Parâmetros de resistência utilizados nas análises de estabilidade.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\Phi'$ (°)	UCS (Mpa)	$m_i$	D	GSI	Ru
Primeiro Domínio Geotécnico	20,0	300	28,0	-	-	-	-	0
Segundo Domínio Geotécnico	28,0	-	-	170	20	1	40	0,6
Terceiro Domínio Geotécnico	28,0	-	-	170	20	1	65	0,6
Quarto Domínio Geotécnico	28,0	-	-	170	20	1	80	0,6

Onde:  $\gamma$  – peso específico seco;  $c'$  – coesão efetiva;  $\Phi'$  – ângulo de atrito efetivo; UCS – resistência a compressão uniaxial;  $m_i$  – constante da rocha intacta; D – fator de perturbação; GSI – *geological strenght index*; Ru – coeficiente de poropressão.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	UCS (kPa)	GSI	$m_i$	D	Ru
Primeiro Domínio Geotécnico		20	300	28					0
Segundo Domínio Geotécnico		28			170000	40	20	1	0.3
Terceiro Domínio Geotécnico		28			170000	65	20	1	0.3
Quarto Domínio Geotécnico		28			170000	80	20	1	0.3

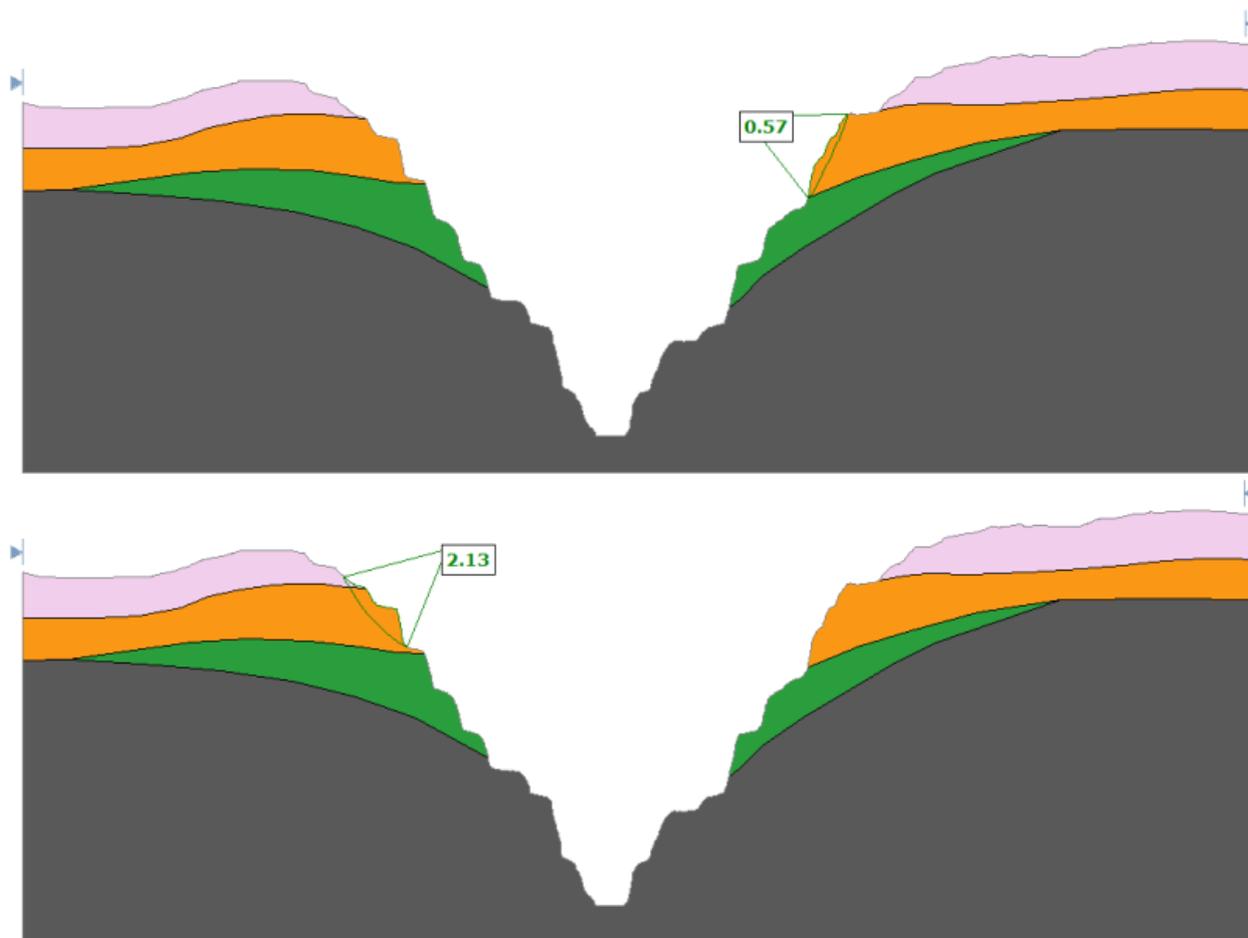


Figura 5. Resultado da análise de estabilidade na primeira seção (AA): talude noroeste na imagem em cima e sudoeste na de baixo.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	UCS (kPa)	GSI	mi	D	Ru
Primeiro Domínio Geotécnico		20	300	28					0
Segundo Domínio Geotécnico		28			170000	40	20	1	0.3
Terceiro Domínio Geotécnico		28			170000	65	20	1	0.3
Quarto Domínio Geotécnico		28			170000	80	20	1	0.3

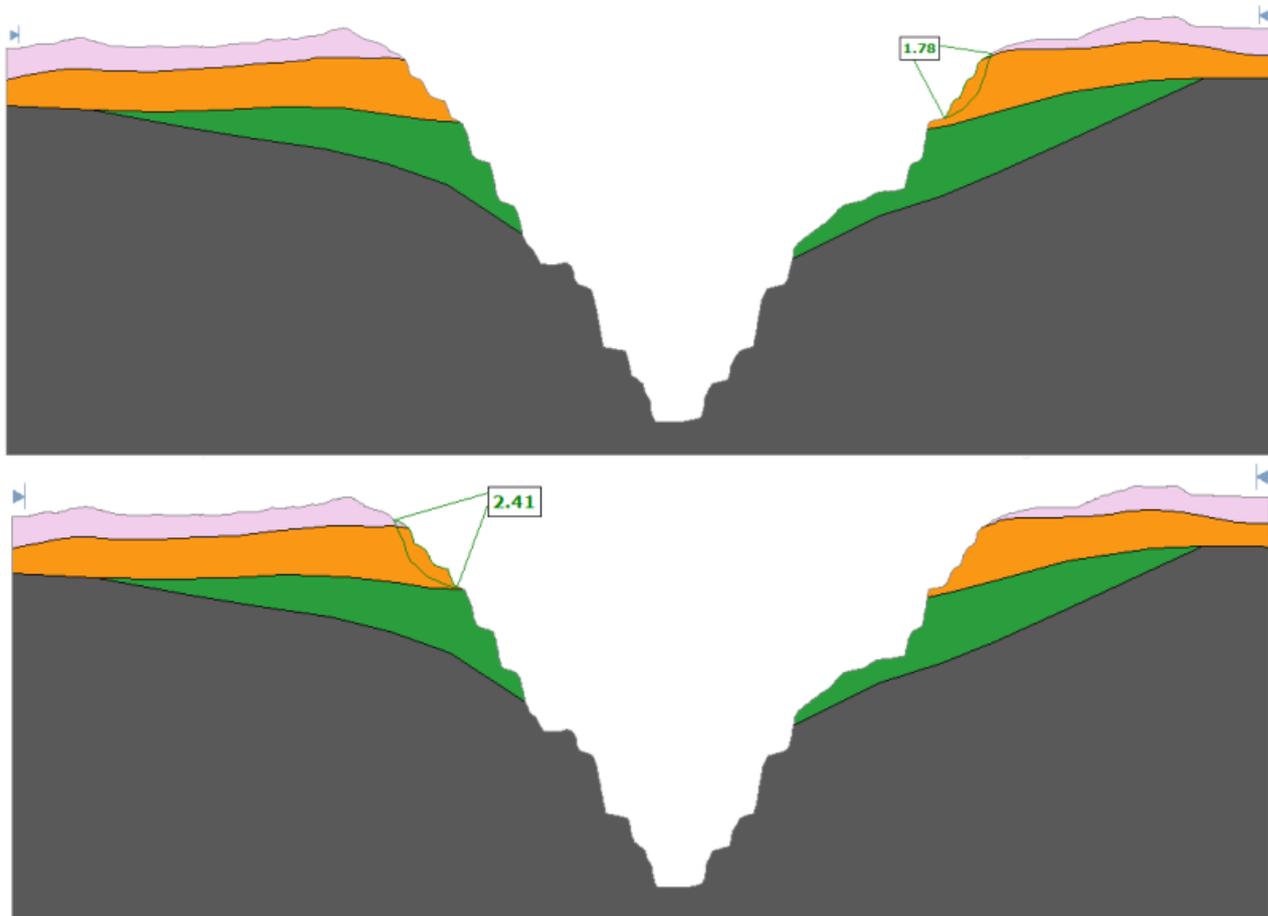


Figura 6. Resultado da análise de estabilidade na segunda seção (BB): talude nordeste na imagem em cima e sudeste na de baixo.

Conforme pode ser observado, o talude noroeste evidencia uma possível ruptura superficial no segundo domínio geotécnico, caso esteja sujeito a poropressões mais elevadas ( $Ru=03$ ), provavelmente devido a sua alta inclinação, enquanto todos os outros exibem fatores de segurança muito altos, bem superiores aos 1.3-1.5 recomendados por Read & Stacey (2009) para taludes de cavas com consequência graves de ruptura, o que não é o caso dessa, tendo em vista a sua desativação.

## 6. CONCLUSÕES

O mapeamento geomecânico providenciou dados cruciais para a classificação de diferentes domínios geotécnicos, que juntamente com os resultados dos ensaios de laboratório e levantamento topográfico da estrutura, foram utilizados para a realização de análises de estabilidade, que confirmaram elevados fatores de segurança para uma possível ruptura global dos taludes da estrutura, mesmo com uma alta poropressão estimada, em razão da elevada

resistência do maciço rochoso. Todavia, o talude noroeste demonstra uma possível ruptura superficial, no segundo domínio geotécnico, e as análises cinemáticas evidenciaram que 6 dos 9 setores definidos para o pit possuem risco de falhamento estruturalmente controlado, principalmente o 3, que está sujeito a rupturas do tipo planar e em cunha.

Portanto, caso a utilização da estrutura envolva o trânsito constante de pessoas, ou até mesmo sua ocupação para instalação de alguma edificação, é prudente avaliar a possibilidade de redução da inclinação do talude noroeste na porção do segundo domínio geotécnico, ou instalação de DHPs (dreno horizontais perfurantes) para despressurização do local, tendo em vista que a ruptura superficial parece ser condicionada pela alta inclinação, aliada a elevada poropressão ( $R_u=0,3$ ), que pode ser gerada devido ao grande índice pluviométrico da região. Além disso, os setores sujeitos a rupturas estruturalmente controladas devem ser monitorados e, caso necessário, devidamente tratados por soluções como tirantes ou barreiras dinâmicas, para impedir a queda de blocos de rochas. Vale destacar que caso o plano de fechamento da cava não contemple a permanência de indivíduos no local, como disposição de rejeitos, deve ser necessária apenas uma análise mais aprofundada dos setores 5, 6 e 7, que estão situados sobre a rampa de acesso.

## 7. REFERÊNCIAS

BISHOP, Alan W.; MORGENSTERN, Norbert. *Stability coefficients for earth slopes*. Geotechnique, v. 10, n. 4, p. 129-153, 1960.

DE GRAAF, Phil JH; BEALE, Geoff; CARTER, Trevor G. *Guidelines for Open Pit and Waste Dump Closure*. Proc. Slope Stability, 2024.

DUNCAN, J. Michael; WRIGHT, Stephen G.; BRANDON, Thomas L. *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons, 2014.

HOEK, E. *Strength of rock and rock masses*. 1994.

READ, John; STACEY, Peter. *Guidelines for open pit slope design*. 2009.

WYLLIE, Duncan C. *Civil engineering applications*. In: *Rock slope engineering*. CRC Press, 2017. p. 463-492.