

# Planejamento e Estabilidade de Pilhas de Estéril com Reaproveitamento de Cava: Estudo de Caso na Mina Capivarita

Fernando Alves Cantini Cardozo

Professor Adjunto, UNIPAMPA, Caçapava do Sul, Brasil, fernandocardozo@unipampa.edu.br

Diogo Peixoto Cordova

Professor Adjunto, UFRGS, Porto Alegre, Brasil, E-mail, diogo.cordova@ufrgs.br

José Waldomiro Jiménez Rojas

Professor Adjunto, UNIPAMPA, Caçapava do Sul, Brasil, joserojas@unipampa.edu.br

**RESUMO:** Este trabalho apresenta o estudo técnico da disposição de estéril na Mina Capivarita, situada em Pantano Grande/RS, com foco na definição de duas estruturas distintas: uma pilha externa ao norte e uma pilha interna, a ser implantada no setor sul da cava após o encerramento da lavra nessa região. A solução foi desenvolvida com base na compatibilização entre a geometria das pilhas, o plano de lavra e diretrizes geotécnicas. A pilha norte, parcialmente sobre estrutura preexistente, foi redimensionada para comportar até 959 mil m<sup>3</sup>, distribuídos em três bancadas com alturas de 25 e 15 metros, taludes a 35° e bermas de 5 metros. O volume excedente de 381 mil m<sup>3</sup> será disposto em cava, em estrutura com geometria semelhante. A análise de estabilidade, realizada no software Slide com o critério de Mohr-Coulomb ( $c = 10$  kPa,  $\phi = 37^\circ$ ), indicou fatores de segurança de 1,470 (seco) e 1,395 (saturado), conforme a NBR 13029. O sistema de drenagem da pilha norte inclui valas perimetrais (até 695 m) e bacia de sedimentação de 390 m<sup>3</sup> para chuvas com tempo de retorno de 10 anos. A estratégia adotada garante estabilidade e otimização do uso do espaço disponível na área minerada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pilha de estéril, Estabilidade de taludes, Disposição em cava, Planejamento de lavra

**ABSTRACT:** This paper presents the technical study of waste rock disposal at the Capivarita Mine, located in Pantano Grande, southern Brazil, focusing on the definition of two distinct structures: an external dump to the north and an internal dump to be implemented in the southern sector of the final pit after mining operations in that area are completed. The solution was developed based on the compatibility between dump geometry, mine planning, and geotechnical guidelines. The northern dump, partially over an existing structure, was resized to accommodate up to 959,000 m<sup>3</sup> of waste, arranged in three benches with heights of 25 and 15 meters, slope angles of 35°, and 5-meter-wide berms. The remaining volume of 381,000 m<sup>3</sup> will be placed in pit, following a similar geometry. The stability analysis was carried out using Slide software with the Mohr-Coulomb failure criterion ( $c = 10$  kPa,  $\phi = 37^\circ$ ), resulting in safety factors of 1.470 (dry) and 1.395 (critical water condition), in accordance with NBR 13029. The drainage system of the northern dump includes perimeter ditches (up to 695 m long) and a 390 m<sup>3</sup> sedimentation basin designed for 10-year return period storms. The proposed strategy ensures slope stability and optimal use of previously mined areas.

**KEYWORDS:** Waste rock dump, Slope stability, In-pit disposal, Mine planning

## 1 INTRODUÇÃO

A disposição adequada do material estéril é um dos principais desafios técnicos em empreendimentos de mineração a céu aberto, especialmente em áreas com espaço operacional restrito e topografia acidentada. Em minas paralisadas por longos períodos, a retomada das atividades exige reavaliações técnicas em diversas frentes, incluindo a adequação dos planos de lavra e das estruturas de suporte, como pilhas de estéril.

No caso da Mina Capivarita, localizada no município de Pantano Grande, RS, foi desenvolvido um novo plano de lavra para viabilizar a retomada da operação. A nova modelagem geológica e planejamento

operacional resultaram em uma nova estimativa de volumes de estéril a serem movimentados, exigindo uma reanálise das alternativas de disposição.

Com base nas características topográficas e operacionais do local, verificou-se que a retomada da pilha existente ao norte não seria suficiente para absorver o volume total de material previsto. Diante disso, foi proposta uma solução combinada, composta por duas estruturas distintas: a ampliação da pilha de estéril ao norte, partindo da estrutura pré-existente, e a implantação de uma nova pilha interna no setor sul da cava, a ser executada após o esgotamento da lavra nesse trecho. Essa estratégia permite compatibilizar a sequência de lavra com a ocupação progressiva dos espaços minerados, otimizando o uso da área disponível e mantendo a estabilidade geotécnica das estruturas envolvidas.

Este artigo apresenta os critérios técnicos adotados no dimensionamento das duas pilhas, os parâmetros de estabilidade utilizados e os resultados obtidos por meio de modelagem numérica, com o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica da solução de disposição proposta para a retomada da Mina Araújo Capivarita.

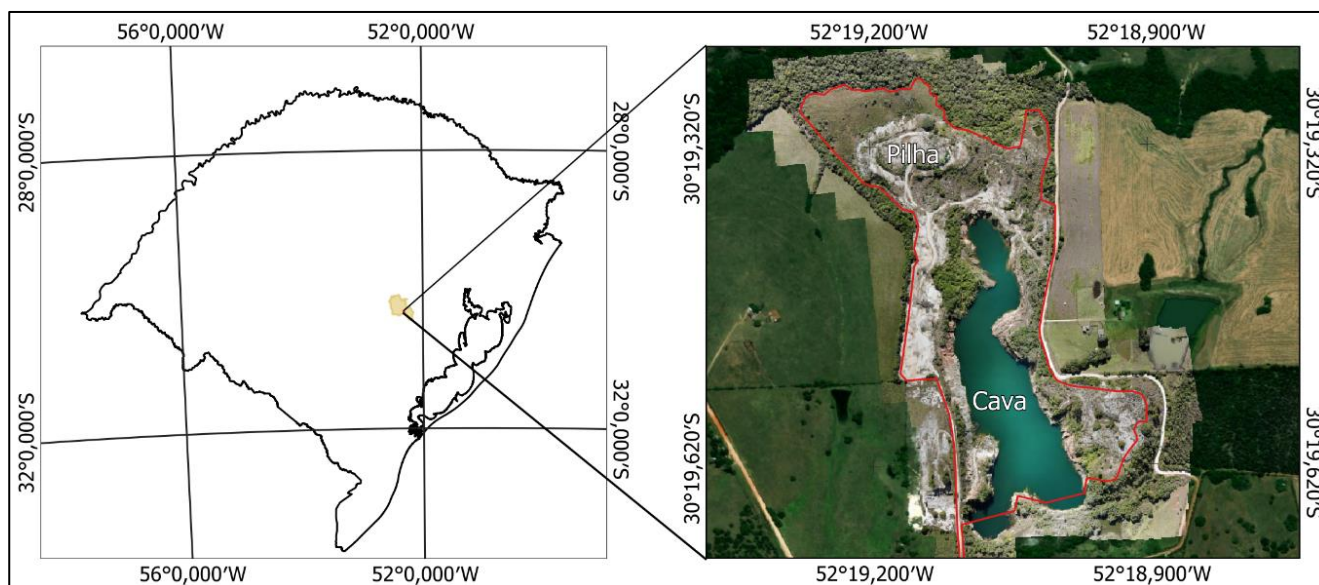


Figura 1 - Localização e Situação da Mina Capivarita

## 2 METODOLOGIA

O planejamento da disposição de estéril para a retomada da Mina Araújo Capivarita teve como ponto de partida a atualização do modelo topográfico e a elaboração de um novo plano de lavra. Para isso, foi utilizado um modelo digital de terreno (MDT) gerado a partir de levantamento topográfico detalhado da área da mina, associado aos dados históricos de sondagens e perfis geológicos existentes, coletados antes da paralisação das atividades.

A partir dessas informações, foi realizado o projeto da cava final, considerando os limites operacionais atualizados e os volumes de minério e estéril a serem movimentados ao longo do ciclo de lavra. A cubagem do estéril foi obtida com base na comparação volumétrica entre o modelo topográfico original e a superfície final da cava planejada. Foram aplicados fatores de empolamento e compactação típicos para este tipo de material, conforme literatura técnica, com o objetivo de estimar o volume efetivo a ser disposto.

Diante da nova cubagem obtida, avaliou-se a capacidade da pilha existente no setor norte da mina, identificando que esta, mesmo com ampliação, não seria suficiente para acomodar todo o estéril gerado. Assim, foi proposta uma solução combinada: ampliação da pilha norte e implantação de uma pilha interna no setor sul da cava, a ser ocupada após o esgotamento da lavra nessa porção.

Para a análise de estabilidade das estruturas propostas, foram definidos modelos geotécnicos com base em uma revisão bibliográfica sobre materiais de estéril de mineração. Devido à natureza heterogênea e à granulometria variável do material, que dificulta a execução de ensaios laboratoriais convencionais, adotaram-se parâmetros representativos encontrados na literatura técnica para materiais com comportamento semelhante.



Foram considerados, para fins de modelagem, valores conservadores: coesão de 10 kPa e ângulo de atrito interno de  $37^\circ$ , em condição drenada.

A modelagem de estabilidade foi realizada no software Slide2, com aplicação do critério de resistência de Mohr-Coulomb. As análises contemplaram diferentes cenários de carregamento, incluindo duas condições: normal seca e uma situação crítica com elevação do nível freático. O critério adotado para aceitação dos resultados foi o atendimento ao fator de segurança mínimo de 1,30, conforme a NBR 13029:2017.

Além da modelagem geotécnica, foi projetado um sistema de drenagem para a pilha norte, composto por valas perimetrais e bacia de sedimentação. As estruturas foram dimensionadas para suportar eventos de precipitação com tempo de retorno de 10 anos, minimizando o risco de erosão superficial e garantindo a integridade dos taludes e das bermas durante a operação

### 3 DESCRIÇÃO DO PROJETO

#### 3.1 Geometria e Localização das Pilhas de Estéril

O projeto de disposição de estéril contempla duas estruturas distintas e complementares: uma pilha externa localizada no setor norte da área de lavra e uma pilha interna, projetada para ser implantada no setor sul da cava, após o esgotamento da lavra nesse trecho. Essa configuração permite a ocupação progressiva do espaço minerado, compatibilizando a evolução da cava com a disposição do material estéril.

A pilha norte parte de uma estrutura anteriormente existente, ampliando-se sobre área previamente utilizada, aproveitando a conformação topográfica favorável e a proximidade da frente de lavra inicial. A estrutura foi projetada com três bancadas sucessivas, sendo a primeira com altura de 25 metros e as duas superiores com 15 metros cada, totalizando 45 metros. Os taludes foram definidos com inclinação de  $35^\circ$ , intercalados por bermas horizontais de 5 metros, garantindo estabilidade e segurança nas operações de disposição.

A pilha interna no setor sul da cava foi concebida para receber os volumes excedentes de estéril após a saturação da pilha norte. Sua implantação está condicionada à finalização da lavra na porção sul da cava, viabilizando o uso racional do espaço minerado. Essa pilha foi planejada com cinco bancadas principais, de 10 m, com geometrias compatíveis com a configuração da cava final e os acessos operacionais. A inclinação da pilha também será de  $35^\circ$  com bermas de 5 metros entre os patamares.

O volume total estimado de estéril a ser disposto, considerando empolamento e compactação, é de aproximadamente  $1.300.000 \text{ m}^3$ . A pilha norte tem capacidade estimada de  $959.707 \text{ m}^3$ , enquanto o volume remanescente será acomodado na pilha interna sul.

A Figura 2, apresenta a configuração final da mina e a posição e projeto das pilhas e estéril.



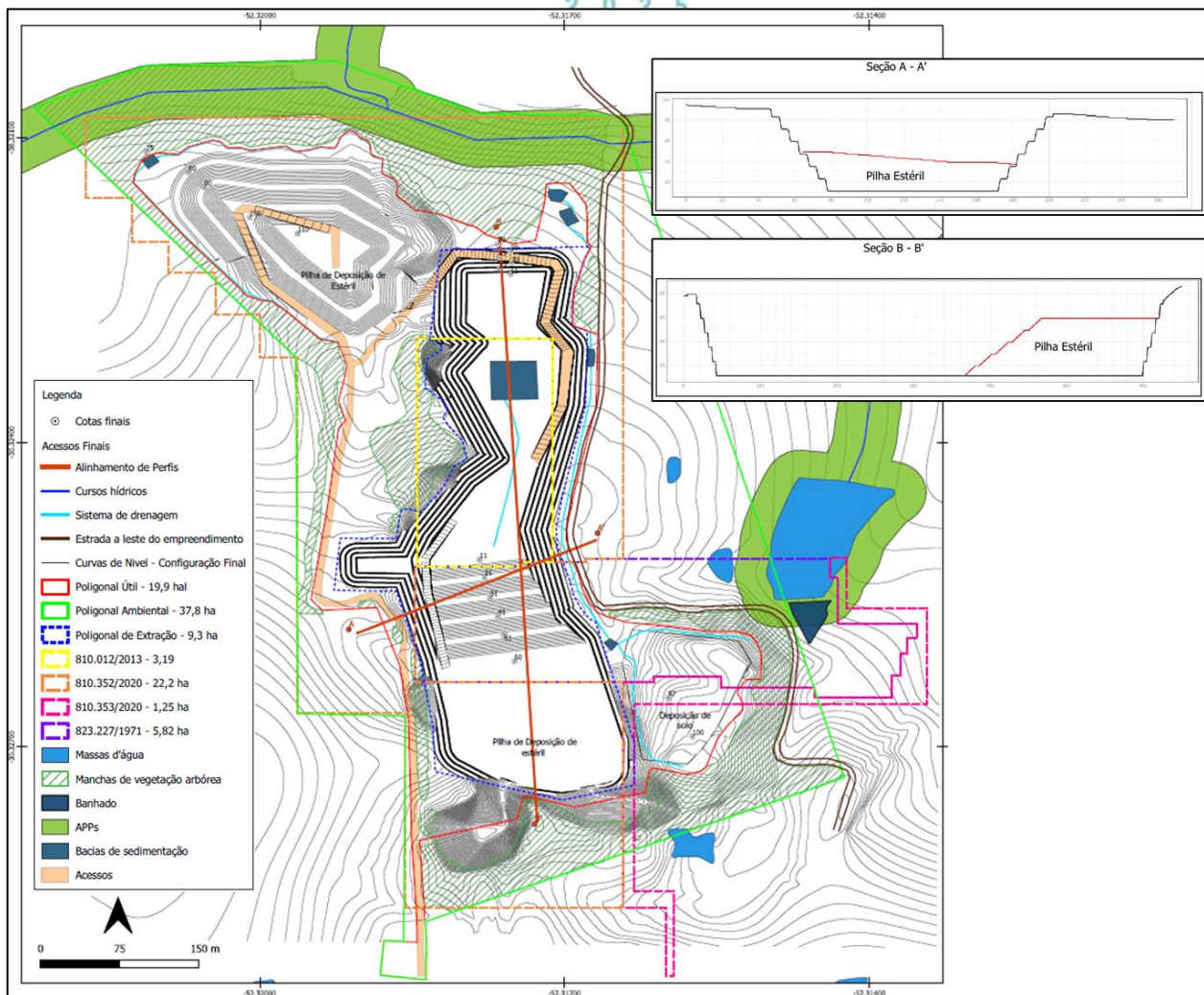


Figura 2 - Configuração Final Mina Capivarita.

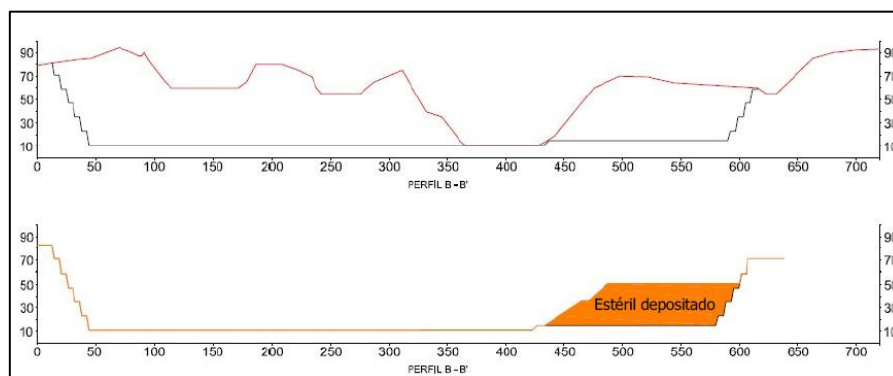


Figura 3 - Perfil projetado para configuração final, com e sem deposição do estéril da cava.

### 3.2 Propriedades Geotécnicas

O estéril de mineração por natureza é constituído da decapagem do minério sendo constituído majoritariamente por fragmentos rochosos em meio a matriz de saprólito. É característica típica a alta granulometria do estéril, devido a economicidade tipicamente aplicada no desmonte do material da decapagem. Este material possui então tipicamente a granulometria tamanho pedregulho, matacão e blocos. Dada a alta



granulometria é comum a consideração para projetos o próprio ângulo de repouso dos materiais, uma vez que a deposição se dá pelo simples lançamento do estéril. Todavia, para avaliação geotécnica de estabilidade é pertinente a avaliação dos demais parâmetros como densidade natural, coesão e ângulo de atrito.

Diversos autores apresentam metodologias variadas para avaliação de estabilidade de pilhas de estéril, por métodos numéricos (por meio de elementos finitos, discretos, entre outros) e principalmente por equilíbrio limite, utilizando-se do critério de ruptura de Mohr-Coulomb. Referente aos parâmetros do modelo, pilhas de estéril, apresentam grandes limitações para a determinação/estimativa direta de suas propriedades resistivas, sendo limitados os relatos os ensaios de campo e/ou laboratório. São comuns estimativas de resistência baseadas no ângulo de repouso observado e ou inferências por bibliografia, para materiais de granulometrias semelhantes. Cabe considerar que ocorre divergência quanto a consideração da coesão, cuja ocorrência se relaciona com características da matriz onde se encaixam os fragmentos maiores; e/ou a escala das estruturas. A tabela a seguir apresenta levantamento de parâmetros considerados em bibliografia acerca de parâmetros de resistência aplicáveis ao modelo de Mohr-Coulomb.

Tabela 1 – Propriedade geotécnicas para PDE's.

<b>Autores</b>	<b>Peso específico (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Coesão (kPa)</b>	<b>Ângulo de atrito (°)</b>
Saliba et al. (2016)	22,0	8	28
Gomez, Garcia e Romanel (2016)	-	0	34
Castro (2022)	19,0	10	32
Zou et al. (2018)	22,1	35	35
Stormont e Farfan (2005)*	16,5	4,8	37
Huang (1983) apud Stormont e Farfan (2005)	-	-	>34
Das (2002) apud Stormont e Farfan (2005)	-	-	34 - 48
McDaniel e Blair (1987) apud Stormont e Farfan (2005)	-	-	34
Mariani (2017)	26,3	18,7	37
Cruz (1996)**	-	0 - 2	33 - 55

\*Estéril de Calcário. \*\*Enrocamento em Geral.

Conforme observado na literatura, os valores médios do ângulo de atrito para materiais de estéril são, em geral, próximos de 35°, sendo comum a adoção de 37° em diversos estudos. A coesão, por sua vez, apresenta maior variabilidade: tende a ser nula em materiais puramente granulares, enquanto valores iguais ou superiores a 10 kPa são recorrentes em estudos que abordam materiais com variação granulométrica. No trabalho de Mariani (2017), os maiores valores de coesão foram obtidos devido ao uso de corpos de prova moldados em laboratório. Destacam-se, ainda, os estudos de Stormont e Farfan (2005) e do próprio Mariani (2017), que avaliaram materiais visualmente semelhantes à matriz observada no estéril em questão.

No que se refere à massa específica aparente ou densidade natural, observa-se tendência a valores da ordem de 20 kN/m<sup>3</sup>, compatíveis com a densidade média de rochas (25 a 27 kN/m<sup>3</sup>), considerando a presença de vazios e o preenchimento parcial por solo ou rocha intemperizada. Cabe destacar que o intercepto coesivo é o parâmetro com maior variação, podendo assumir valores nulos em materiais predominantemente granulares, e atingir níveis significativamente mais altos em materiais mais argilosos ou com algum grau de compactação.

### 3.3 Drenagem Superficial e Controle de Erosão

A pilha de estéril localizada ao norte da área de lavra foi equipada com um sistema de drenagem superficial composto por valas perimetrais e uma bacia de sedimentação. As valas foram projetadas para coletar e conduzir as águas pluviais ao redor da pilha, reduzindo o risco de erosão dos taludes e o carreamento de partículas finas para o entorno.

A bacia de sedimentação possui dimensões de 10 x 13 x 3 metros, resultando em um volume útil de aproximadamente 390 m<sup>3</sup>. Essa estrutura foi dimensionada para conter os fluxos gerados em eventos de precipitação com tempo de retorno de 10 anos. A localização da bacia foi escolhida de forma a permitir fácil

acesso para manutenção e desassoreamento, além de estar posicionada em cota inferior aos pontos de saída do sistema de valas. A pilha sul, por se tratar de disposição em cava, conta com contenção natural e será monitorada durante sua implantação quanto à necessidade de medidas complementares de drenagem.

#### 4 AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE

A estabilidade das estruturas projetadas foi avaliada com base em modelagem numérica realizada no software Slide2, utilizando o critério de resistência de Mohr-Coulomb. Como parâmetros geotécnicos, adotaram-se valores conservadores compatíveis com estéril heterogêneo de mina, dada a dificuldade de caracterização laboratorial direta. O valor da coesão utilizado para a PDE foi de 10 kPa e o ângulo de atrito interno de 37°, em condição drenada considerando nova disposição. Para a PDE preexistente e estabilizada foi considerada uma maior coesão e densidade (12 kPa e 21 kN/m<sup>3</sup>), vide maior compactação/coesão aparente pelo tempo de acomodação. As simulações contemplaram dois cenários, incluindo uma condição operacional com o material não saturado (condição seca) e um cenário crítico com presença de lençol freático elevado. Os fatores de segurança obtidos para os principais perfis transversais da pilha Norte foram de 1,470 em condição normal (Figura 4) e 1,395 em situação crítica (Figura 5), atendendo aos requisitos mínimos de segurança definidos na NBR 13029:2017.

Referente a pilha interna da cava, esta naturalmente por ter projeto mais conservador (maior inclinação global), apresenta maior Fator de Segurança. Para os perfis transversais da pilha foram obtidos FS's de 1,697 em condição normal (Figura 6) e 1,695 em situação nível freático (Figura 7).

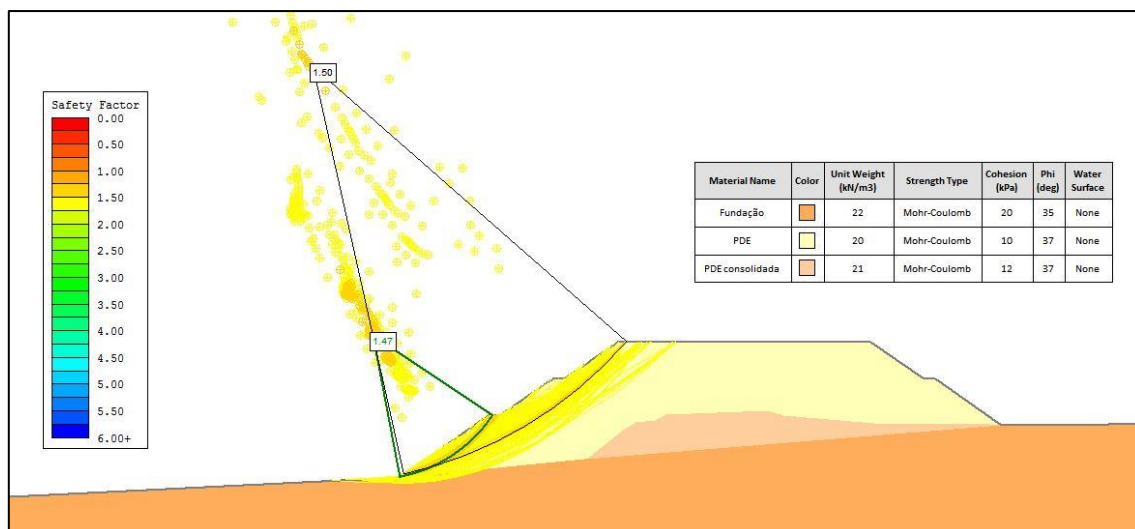


Figura 4 – Avaliação de estabilidade para PDE na configuração final situação normal.

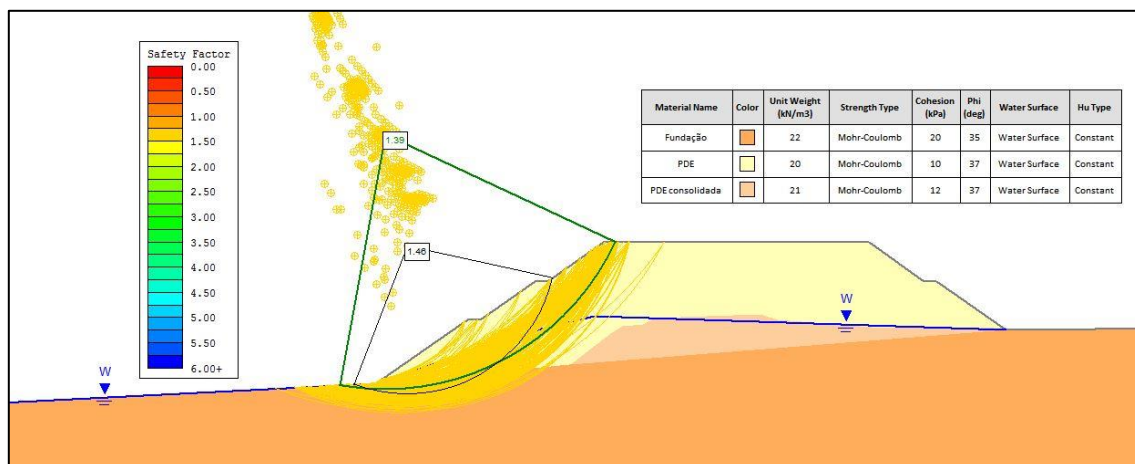


Figura 1 - Avaliação de estabilidade para PDE na configuração final situação crítica com nível freático.



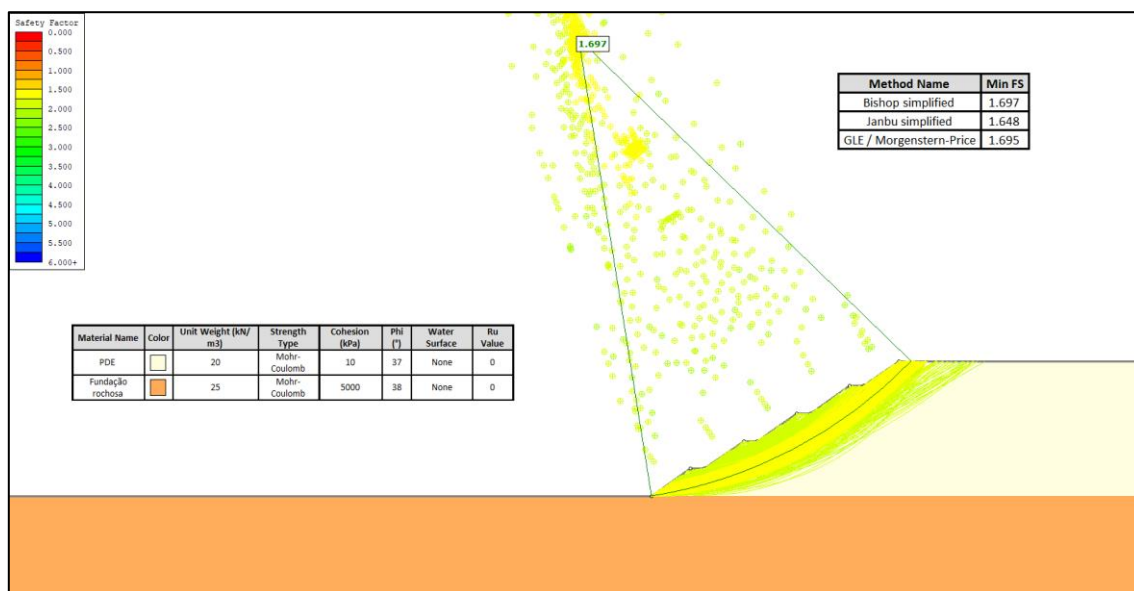


Figura 6 - Avaliação de estabilidade para PDE da cava na configuração final situação normal.

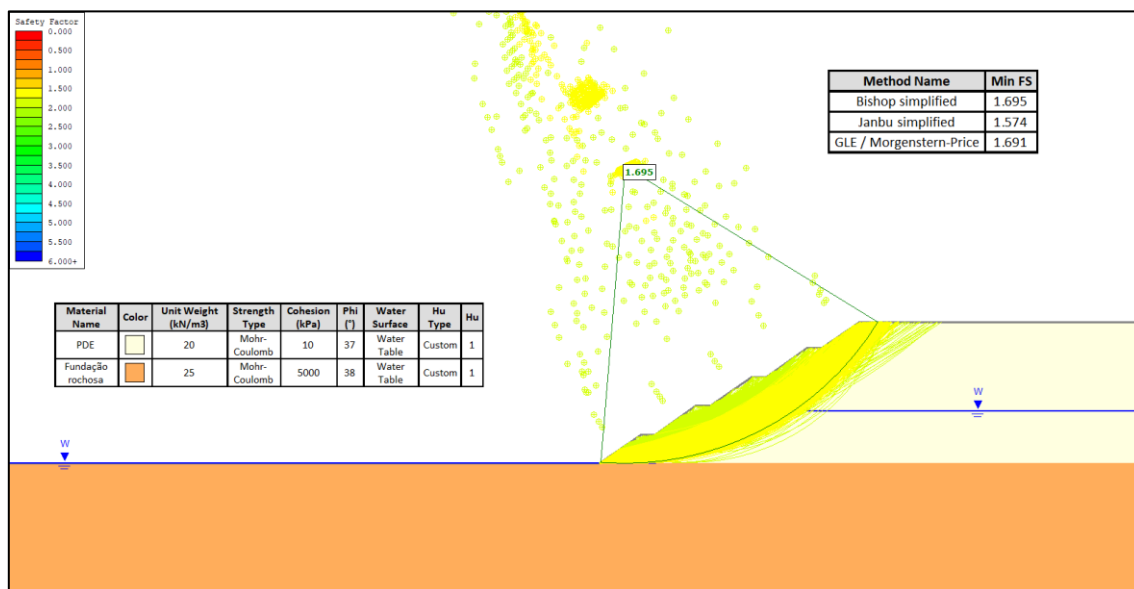


Figura 7 - Avaliação de estabilidade para PDE da cava configuração final situação crítica com nível freático.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A retomada das atividades da Mina Capivarita exigiu a revisão completa do plano de lavra, incluindo a atualização do modelo topográfico, o reprojeto da cava final e a reavaliação da estratégia de disposição do material estéril. Com base na nova cubagem de estéril gerado, verificou-se que a estrutura existente ao norte da mina não seria suficiente para acomodar todo o volume estimado, mesmo com sua ampliação.

Dessa forma, foi concebida uma solução técnica integrada que contempla a ampliação da pilha norte e a implantação de uma pilha interna na cava, no setor sul, a ser executada de forma sequencial à lavra da região. Essa abordagem permitiu compatibilizar a evolução operacional do projeto com a ocupação ordenada do espaço, aproveitando áreas previamente mineradas e mantendo a funcionalidade e estabilidade das estruturas ao longo do tempo.



A análise de estabilidade demonstrou que as geometrias propostas são adequadas, com fatores de segurança satisfatórios para as condições de carga e hidráulicas simuladas. Além disso, o projeto do sistema de drenagem superficial da pilha norte, com valas e bacia de sedimentação, garante controle eficiente do escoamento pluvial e da erosão superficial.

A solução adotada atende aos requisitos técnicos e operacionais para a retomada da lavra, servindo como referência para empreendimentos de características semelhantes que necessitam readequar suas estruturas de suporte à luz de novas condições de produção e topografia. O planejamento integrado entre lavra e disposição de estéril mostrou-se fundamental para a viabilidade da reativação da operação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Empresa de Mineração Araujo pela disponibilização dos dados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Castro, J. N. (2022). *Dimensionamento e Classificação de Pilha de Estéril: Estudo de Caso em uma Mina de Fosfato – Tapira (MG)* [Monografia]. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Cruz, P. T. (1996). *100 barragens brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto*. Oficina de Textos.
- Fernando Portugal Maia Saliba, Aloysio Portugal Maia Saliba, Rodrigo Cristiano Barbosa, Enicarlos Pereira Gonçalves, Bruno Silveira Conceição, José Mateus de Vasconcelos Araujo, Wilson Gandini Lugão, & João Paulo Santos. (2016). *Determinação de densidade natural em pilhas de estéril em operação*. XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Belo Horizonte, MG, Brasil. <https://doi.org/10.20906/CPS/CB-06-0039>
- Gómez, J., Garcia, D. M., & Romanel, C. (2016). Análise numérica 3D da estabilidade de taludes de grande altura em minas a céu aberto. *Proceedings*, 15.
- Mariani, G. F. (2017). *Estudo de Características Geomecânicas de Estéreis de Mineração do Projeto de Mina de Caçapava do Sul* [Monografia]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Stormont, J. C., Farfan, E. (2005). Stability Evaluation of a Mine Waste Pile. *Environmental and Engineering Geoscience*, 11(1), 43–52. <https://doi.org/10.2113/11.1.43>
- Zou, P., Zhao, X., Meng, Z., Li, A., Liu, Z., & Hu, W. (2018). Sample Rocks Tests and Slope Stability Analysis of a Mine Waste Dump. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 1–17. <https://doi.org/10.1155/2018/6835709>