

# METODOLOGIA SIMPLIFICADA PARA AVALIAÇÃO GEOTÉCNICA DE UM DEPÓSITO CONTROLADO DE ESTÉRIL (DCE)

*Data de aceite: 01/11/2023*

**Fernando Alves Cantini Cardozo**

Estabilidade

**RESUMO:** O trabalho apresenta uma metodologia simplificada para desenvolvimento de estudo geotécnico e avaliação de estabilidade de um Depósito Controlado de Estéril (DCE) de uma Mina de calcário na cidade de Dom Feliciano/RS. Com base em revisão bibliográfica são feitas considerações a respeito de propriedades geotécnicas de materiais e de geometrias adotadas. Tais parâmetros embasaram a avaliação de estabilidade feita sobre perfis realistas da DCE e sobre uma proposta de ampliação. As conclusões quanto a estabilidade são confrontadas e corroboradas por metodologia quantitativa de classificação de DCE. Os resultados obtidos corroboram pela viabilidade da adoção de uma geometria otimizada, com altura de 25 metros para o primeiro patamar e 15 metros para o segundo. Conclui-se que a metodologia e sequência de passos adotados na avaliação pode ser replicada para outras DCE e até mesmo servir de indicativo para estruturas semelhantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Metodologia, Estéril de Mina, Avaliação Geotécnica, Análise de

## INTRODUÇÃO

Pilhas de Estéril figuram juntamente com Barragens de Rejeito entre as maiores estruturas artificialmente contruídas. Tais estruturas podem facilmente atingir centenas de metros de altura a depender da escala de produção adotada na mineração. Naturalmente é constituída de rejeito proveniente da lavra, sendo principalmente da decapagem e por vezes de processos de beneficiamento. Diferem-se principalmente dos rejeitos destinados a barragens pelo baixo teor de água e viabilidade pelo empilhamento. Assim como demais estruturas de uma mina, os Depósitos de Estéril, podem apresentar riscos geotécnicos e dependendo de suas características podem vir a necessitar de extensos estudos para sua adequada avaliação. Wang et al. (2020) e Ulusay et al. (1995) apresentam exemplo e outros casos onde a ruptura de DCE mobilizaram milhares de metros cúbicos de material.

Neste estudo é apresentada a

proposta de avaliação geotécnica feita para o depósito controlado de estéril (DCE) da Mina Gaspar Simões, localizada no município de Dom Feliciano/RS, teve como objetivo avaliar a estabilidade geotécnica da estrutura citada na situação atual e considerando sua proposta de ampliação de capacidade. O DCE fica localizado na área útil do empreendimento e é constituído do estéril da lavra, constituído predominantemente de rochas encaixantes ao minerio marmore calcítico; sendo, granitos, gnaisses, mamores e saprolito. Nos estudos anteriormente apresentados para o licenciamento ambiental do empreendimento, foi proposta de forma empírica, uma geometria conservadora, e que considerou a época uma reconfiguração do DCE. A proposta original, previa uma configuração de com taludes de 10 metros de alturas, inclinação de 45° e bermas de 4 metros. Esta proposta inicial demandaria uma extensa intervenção na configuração atual e extensos custos decorrestes deste.

Assim, este estudo visa certificar a estabilidade da DCE nas condições atuais de geometria e verificar a viabilidade de execução de sua ampliação e configuração final, considerando a necessidade de avanço de lavra.

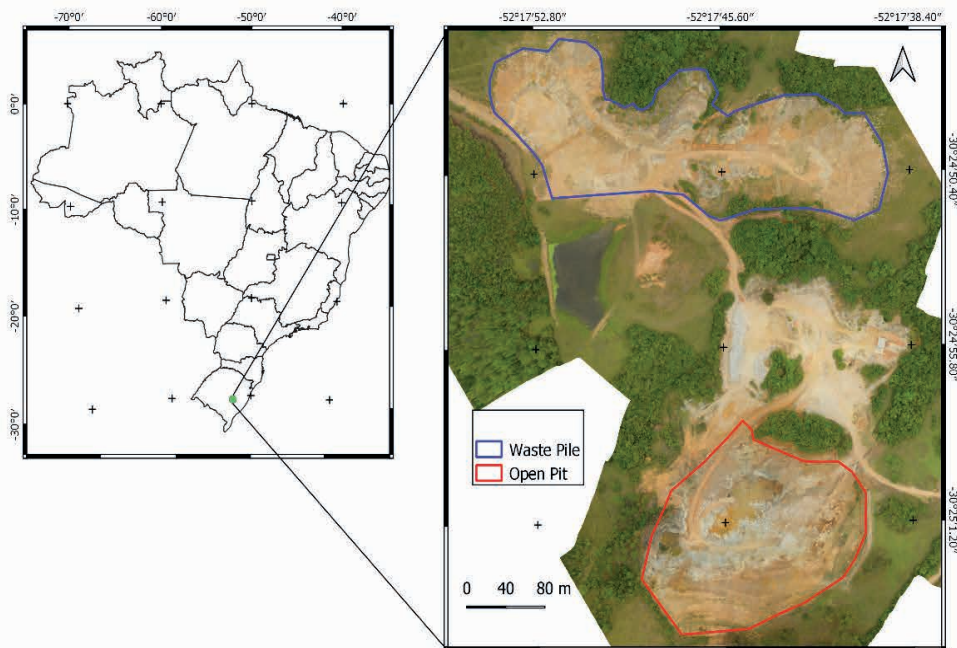


Figura 1 – Localização da Pilha de Estril da Mina Gaspar Simões

## METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da Avaliação da situação atual do DCE e proposição de configuração final, optou-se por seguir a metodologia desenvolvida exposta no fluxograma da Figura 1. A metodologia usa em paralelo a avaliação quantitativa, com determinação

de Fator de Segurança; e Avaliação qualitativa, está com intuito de classificar o DCE e subsidiar o projeto. Para a valiação quantitativa optou-se pela análise por equilíbrio limite para cálculo do Fator de Segurança. Já a análise qualitativa consistiu na aplicação da metodologia adaptada por Aragão (2008).

A metodoliaga em parte se baseia na definição de perfis representativos e avaliação de modelos geotecnicos baseados nestes. Destacando que a utilização de Modelos digitais de Terreno permite extração de perfis com grande detalhamento, e vem sendo empregada em diversos trabalhos de geotecnia. Na metodologia em questão, o levantamento com VANT e geração de MDE também subsidia avaliação qualitativa, ao fornecer um maior detalhamento e confiabilidade a interpretação das feições da estrutura. Assim, complementando as inspeções de campo, implícitas as etapas de identificação e de mapeamento da área. Como referencia ao uso de VANT e metodologia de mapeamento com aplicação em geotecnia podemos citar os trabalhos de Zekkos et al. (2018), Fu-Hsuan et al. (2018).

Por fim, os resultados da avaliação devem ser analisados e definidos, se necessario, aprofundamentos de estudos e/ou alterações de projetos, como alteração de geometria. Destaca-se que a análise qualitativa, conjuntamente com o FS obtido, permite validar sobretudo os parametros utilizados nos modelos. Uma vez, que pode se entender pela necessidade de aprofundamentos de estudos e ou instrumentações. Na Fluxograma da metodologia aplicada, as setas tracejadas indicam fluxos opcionais.

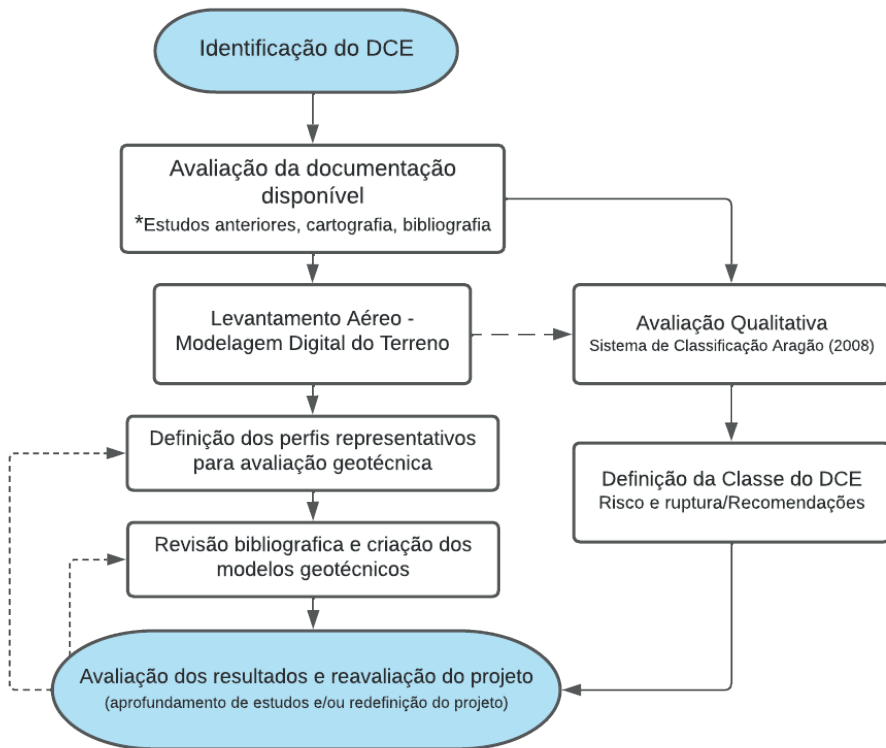


Figura 2 - Metodologia proposta para avaliação do DCE

## Situação da Pilha e Estudos Anteriores

A Pilha de Estéril da Mina Gaspar Simões encontra-se em operação, tendo sido realizados estudos para fins de licenciamento ambiental da atividade no ano de 2021. Tendo sido realizados sondagem e proposição de reconfiguração para uma geometria mais conservadora. Destaca-se que embora tenha sido realizado ensaio de campo (SPT) e utilizado para inferência de parâmetros, este atingiu a profundidade de 0,80 metros na DCE; atingindo como esperado o impenetrável – uma vez que o depósito controlado de estéril (DCE) é composto de blocos de tamanhos variados e de solo compactado. Como proposta de configuração original, o projeto apresentava taludes de 45° e altura máxima de 10 metros subdivididos por bermas de 4 metros. Assim, seria necessária uma extensa reformulação nos perfis do DCE atual com alturas entre 19 e 25 metros. Em tal proposta o FS chegaria a 3.29. Já em 2022 foi realizada nova avaliação com finalidade verificar a estabilidade da situação atual e de nova proposição de perfil final. Como base do estudo, fora feita das documentações disponíveis, caminhamento pela estrutura e mapeamento com VANT. Posteriormente as imagens foram processadas em ambiente GIS para verificação dos perfis e avaliação das geometrias. A Figura 2 apresenta o MDE da Pilha e os principais

perfis identificados.

A DCE apresenta faces com inclinação limitada a 35°, sendo no setor leste de tem altura máxima de 25 e média de 20 metros, com inclinação na ordem de 30°. No setor oeste, a DCE apresenta ângulo de face na ordem de 34° a 38°, sendo sua altura de bancada entre 12-16 metros. Considerando a face da DCE, ela apresenta patamar em formação ainda significativamente afastado da borda, não influenciando na avaliação da situação atual. Destaca-se que para o setor oeste é projetada ampliação, a qual em sua configuração final pretende regularizar a inclinação máxima em até 35°.

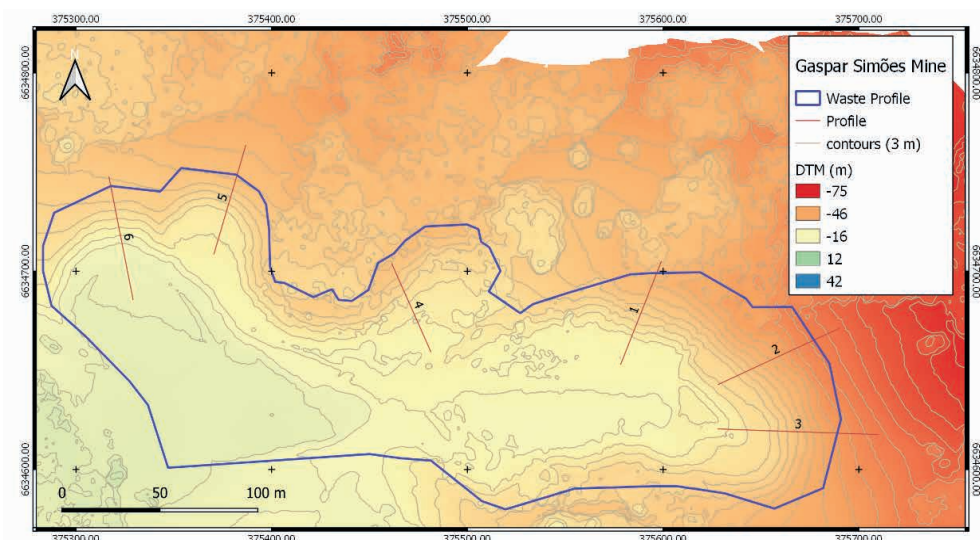


Figura 3 - Vista em planta contendo a localização dos perfis avaliados da DCE.

Com base no Modelo Digital de Elevação (MDE), pode-se estimar a declividade primitiva da área da DCE. Na área de interesse verifica-se uma declividade leve a moderada, na ordem de 10% na porção leste da DCE (área dos perfis 1,2 e 3) e da ordem de 5-7% na porção oeste (área dos perfis 4, 5 e 6). Não se observam surgências ou acúmulos de água ou umidade no entorno da DCE que permitam suportar qualquer grau de saturação interna. Tais informações são relevantes para a avaliação qualitativa e quantitativa.

## AVALIAÇÃO GEOTECNICA

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 aplicada no desmonte do material da decapagem, chegando a granulometria de pedregulho, matacos 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 lançamento do estéril. Todavia, para avaliação geotécnica de estabilidade é pertinente a avaliação dos demais parâmetros como densidade natural, coesão e ângulo de atrito.

Diversas metodologias são apresentadas na literatura, para avaliação de estabilidade de depósitos de estéril. Normalmente esta pode ser realizada por métodos numéricos (de elementos finitos, discretos, entre outros) e principalmente por meio do método de equilíbrio limite, com o critério de falha de Mohr – Coulomb, por exemplo, considerando ruptura por cisalhamento interno do material, em uma superfície circular preferencial.

Referente aos parâmetros do modelo, depósitos de estéril, apresentam grandes limitações quanto a determinação/estimativa direta de suas propriedades de resistência, sendo limitados o acesso a dados e publicações quanto o resultado de ensaios de campo e/ou de laboratório. Portanto, são comuns estimativas de resistência baseadas no ângulo de repouso observado e ou dados teóricos por bibliografia, para materiais de granulometrias semelhantes.

Cabe salientar que ocorre divergência quanto ao valor considerado para a coesão, cuja ocorrência se relaciona com características da matriz onde se encaixam os fragmentos maiores; e/ou a escala das estruturas. A Tabela 1 abaixo apresenta levantamento de parâmetros de resistência considerados em bibliografia pelo critério de Mohr-Coulomb.

| <b>Autor</b>   | <b>Peso específico (kN/m³)</b> | <b>Coesão (kPa)</b> | <b>Ângulo de atrito (°)</b> |
|--|--------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Saliba et al. (2016)                                     | 22                             | 8                   | 28                          |
| Gomez, Garcia e Romanel (2016)                           | -                              | 0                   | 34                          |
| Castro (2022)  | 19                             | 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)               | -                              | -                   | + de 34                     |
| Das (2002) apud Stormont e Farfan (2005)                 | -                              | -                   | 34-48                       |
| McDaniel and Blair, (1987) apud Stormont e Farfan (2005) | -                              | -                   | 34                          |
| Mariani (2017)   | 26,29                          | 18,7                | 37,4                        |
| Cruz (1996)**  | -                              | 0 - 2               | 33 – 55                     |

\*Material estéril de rocha calcária. \*\*Enrocamento em geral.

Tabela 1 - Parametros de resistencia para estéril de mina enrocamento.

Destaca-se os parâmetros médio de ângulo de atrito superior a 35° e sendo recorrente o valor de 37°. Quanto a coesão, está apresenta maior variação sendo nula nos materiais puramente granulares, mas usualmente referenciada com o valor de 10 kPa nos trabalhos que consideram variação de granulometria, com destaque para o trabalho

de Stormont e Farfan (2005); também de Mariani (2017) que avaliou material visualmente parecido com a composição da matriz do estéril.

Quanto ao peso específico ou densidade natural, se observa uma tendência a escala da ordem de  $20 \text{ kN/m}^3$ , valor que é condizente com densidade de rochas ( $25\text{-}27 \text{ kN/m}^3$ ) combinadas com espaços vazios e solo/rocha intemperizada preenchendo os espaços vazios. Vale destacar que o estudo anterior considerado, com estimativa de parâmetros a partir do valor de SPT, utilizou o valor de  $75 \text{ kPa}$  de coesão e  $40,7^\circ$  de ângulo de atrito interno; onde se observa que principalmente a coesão, apresenta um valor extremamente alto. Sendo assim, a reconsideração dos parâmetros geotécnicos da DCE, para a avaliação de estabilidade foi feita de forma a aproximá-los da realidade, tornando a avaliação atual mais conservadora em relação à anterior, porém mais próxima da realidade. Foi considerado Peso específico de  $20 \text{ kN/m}^3$ , Coesão de  $10 \text{ kPa}$  e Ângulo de atrito:  $37^\circ$

## Análise de Estabilidade

Para as análises, utilizou-se o software Slide 6, estruturando modelos geotécnicos que evitassem efeitos de borda. Para a análise de estabilidade, definiu-se a subdivisão das superfícies de ruptura em 25 lamelas. Para modelagem da linha piezométrica, considerou-se duas hipóteses conforme preconização da NBR 13029, com cenário real (seco/drenado) sem ocorrência de nível d'água na DCE e como cenário hipotético com ocorrência de nível d'água. Como critério de ruptura, utilizou-se o critério de Mohr-Coulomb.

Os fatores de segurança foram calculados pelos **Métodos de Bishop Simplificado**, considerando superfícies circulares, considerando ser o modelo de ruptura de larga utilização na bibliografia consultada. Como critério de linha freática crítica, considerou-se saturação a meia altura de aterro, destacando-se ser uma avaliação conservadora, uma vez que, sua ocorrência é improvável dada a drenagem externa da DCE e da mesma ser parcialmente alto drenante dada a variação granulométrica de sua constituição. Assim afasta-se a hipótese de saturação na DCE, embora por normativa esta deva ser considerada em caso hipotético. Nos resultados dos modelos, estão expostas a superfície de ruptura crítica e a linha piezométrica considerada para situação crítica. A seguir estão expostos os resultados, com as geometrias da PDE atual e projeção; e modelos geotécnicos considerados.

Referente a recomendações de Fator de Segurança a NBR 13029:2017, apresenta, conforme Quadro 1 abaixo, os Fatores de Segurança recomendados para pilhas de estéril de mineração. A altura é limitada a 200 metros, não especificando valores de inclinação e/ou alturas de bancadas. Todavia, destaca-se que estes devem ser observados quanto a FS da estrutura, operacionalidade e otimização; no intuito minimizar danos ambientais.

|                                |                            |                  |
|--------------------------------|----------------------------|------------------|
| <b>Ruptura do Talude Geral</b> | <b>Superfície</b>          | <b>FS mínimo</b> |
|                                | Freática normal            | 1,5              |
|                                | Freática crítica           | 1,3              |
| <b>Ruptura do Talude Geral</b> | <b>Face</b>                | <b>FS mínimo</b> |
|                                | Predominantemente de solo  | 1,5              |
|                                | Predominantemente de rocha | 1,3              |

Quadro 1 - Fatores de segurança da ruptura do talude geral e do talude entre bermas (modificado de ABNT 13029:2017)

Cabe destacar que Peck (1969), comenta que estudos geotécnicos podem ser divididos quanto ao detalhamento da investigação em três níveis:

- 1- Baseados em investigações geotécnicas limitadas e adotando abordagens de projeto conservadoras e altos fatores de segurança;
- 2- Baseados em investigações geotécnicas limitadas e avaliando recomendações baseadas em práticas regionais;
- 3- Executando investigações detalhadas.

Compreende-se que o estudo em questão se apoia nos níveis 1 e 2, apresentando investigações limitadas e práticas regionais - dadas as investigações feitas - e sendo baseados em práticas regionais (quanto a geometria e profundidades de solo), tanto na inferência de valores, quanto na observância da estabilidade da estrutura em questão já existente e de outras em situação semelhante.

## Resultados Situação

Conforme perfis numerados na figura 2, extraídos do MDE.

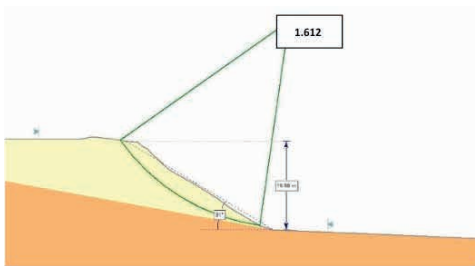


Figura 4 – Perfil 1 - situação normal

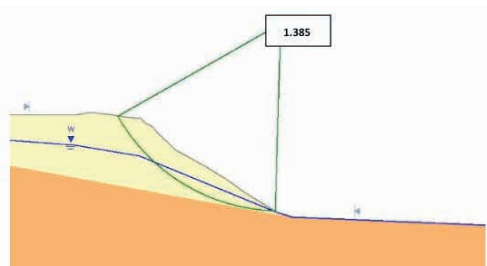


Figura 5 – Perfil 1 - situação com freática crítica



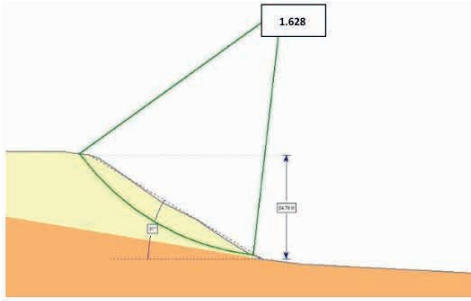


Figura 6 – Perfil 2 - situação normal

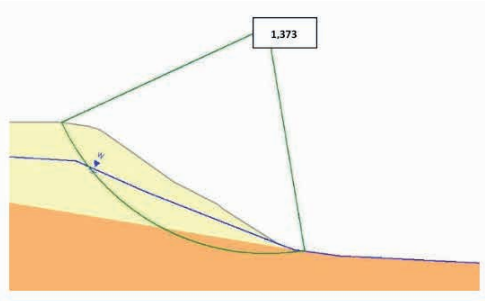


Figura 7 – Perfil 2 - situação com freática crítica

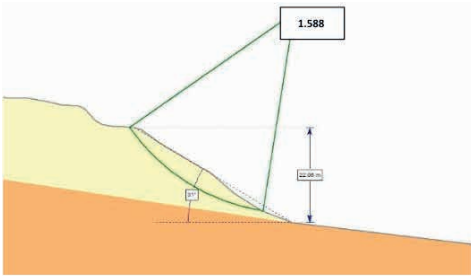


Figura 8 – Perfil 3 - situação normal

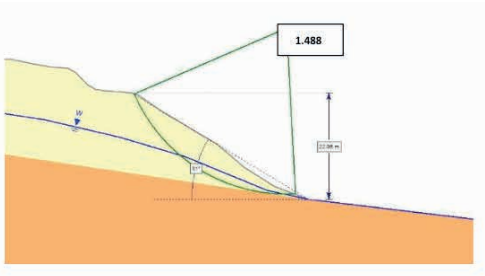


Figura 9 – Perfil 3 - situação com freática crítica

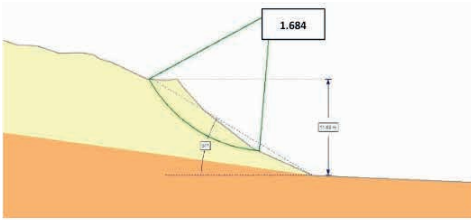


Figura 10 – Perfil 4 - situação normal

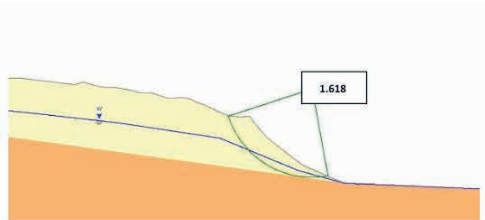


Figura 11 – Perfil 4 - situação com freática crítica

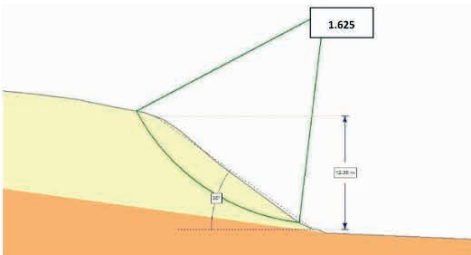


Figura 12 – Perfil 5 - situação normal

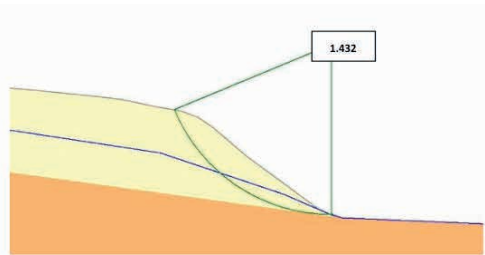


Figura 13 – Perfil 5 - situação com freática crítica

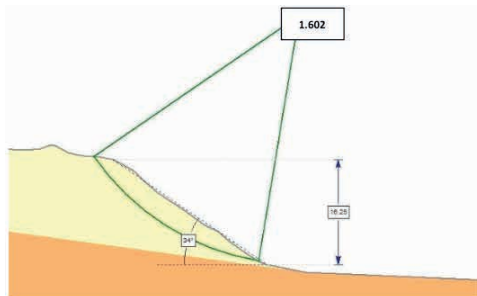


Figura 14 – Perfil 6 - situação normal

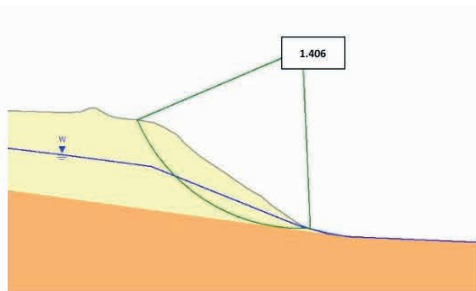


Figura 15 – Perfil 6 - situação com freática crítica

A tabela abaixo apresenta os fatores de segurança obtidos nas condições de avaliação.

| F.S. \ Perfil   | Perfil 1 | Perfil 2 | Perfil 3 | Perfil 4 | Perfil 5 | Perfil 6 |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Obtido          | 1.612    | 1.628    | 1.588    | 1.684    | 1.625    | 1.602    |
| Cenário Crítico | 1.385    | 1.412    | 1.488    | 1.655    | 1.432    | 1.406    |

Tabela 2 - Resumo dos Fatores de Segurança para os Perfis Atuais

## Resultados para Ampliação e Configuração Final da PDE

Para a ampliação do setor leste do DCE atual, foi considerada execução de patamar adicional com altura de 15 metros e inclinação de 35°, com berma mínima de 5 metros (espaço para eventuais manutenções), dividindo o talude frente ao primeiro patamar. A avaliação de estabilidade apresentou FS de 1,5 para talude global na situação normal e 1,3 para situação hipotética com ocorrência de nível freático. As Figuras abaixo se referem aos perfis 1 e 2.

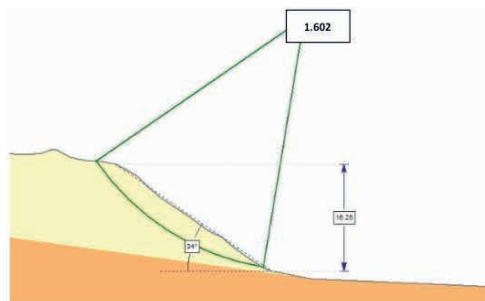


Figura 16 – Perfil 1 Ampliação - situação normal

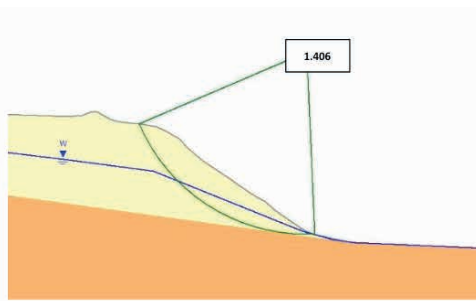


Figura 17 – Perfil 1 Ampliação - situação crítica

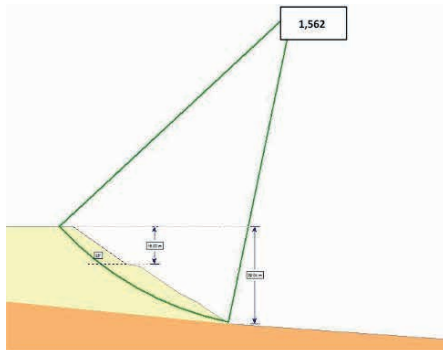


Figura 18 – Perfil 2 Ampliação - situação normal

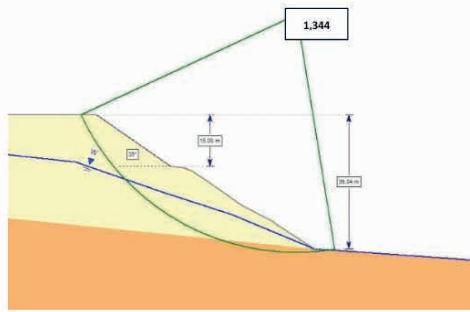


Figura 19 – Perfil 2 Ampliação - situação crítica

Para as áreas do DCE atual onde fora demarcado avanço vertical e para execução do novo DCE no setor norte foi considerado a configuração de primeiro patamar com talude de 25 metros e 35° de inclinação, e segundo patamar com talude de 15 metros e inclinação de 35°; utilizando berma de 5 metros.

## AVALIAÇÃO QUALITATIVA

Para a avaliação de estabilidade do DCE em caráter qualitativo, baseado em informações visuais, feições geomorfológicas, geometrias do DCE e terreno, drenagem, hidrologia, hidrografia local e regional. Aragão (2008) e Aragão e Oliveira Filho (2011), apresentam metodologia baseada sistema de classificação de pilhas desenvolvido para o governo canadense com base na estabilidade física de uma pilha de estéril (BC MINE WASTE ROCK PILE RESEARCH COMMITTEE, 1991). Tal metodologia é recomendada para a avaliação da estabilidade do DCE, por ser útil e de fácil aplicação permitindo a classificação e enquadramento do DCE. Adicionalmente o sistema também apresenta conforme a classificação sugestão de medidas de monitoramento. As tabelas completas podem ser encontradas em Aragão (2008).

As Tabelas a seguir apresentam a aplicação da metodologia para o DCE da Mina Gaspar Simões, considerando a situação atual, ampliação projetada e execução da nova pilha projetadas para a área norte.

| <b>Critério</b>                      | <b>Condição/Descrição</b>  | <b>Pontuação<br/>Mina GS</b> |
|--------------------------------------|--|------------------------------|
| Altura                               | < 50 m   | 0                            |
| Volume da Pilha                      | < 1*10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /banco  | 0                            |
| Inclinação do Talude                 | 26°-35°  | 50                           |
| Inclinação Fundação                  | 10°  | 0                            |
| Confinamento                         | - Bancos ou terraços naturais nos taludes;<br>- Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural diversificada;<br>- Empilhamento de estêreis em encostas, em vales abertos, ou transversais a vales.   | 50                           |
| Fundação                             | - Materiais de Fundação tão ou mais resistentes que os da pilha;<br>- Não sujeita a efeitos adversos da poropressão;<br>- Sem estruturas geológicas desfavoráveis.   | 0                            |
| Qualidade do material da pilha       | - Moderadamente resistente, durabilidade variável;<br>- 10 a 25% de finos  | 100                          |
| Método construtivo                   | - Bancos ou camadas não muito espessos (<25m de espessura), plataformas largas; - Disposição ao longo das curvas de nível - Construção ascendente - Wrap-arounds ou terraços   | 0                            |
| Taxa de disposição                   | - < 25m <sup>3</sup> /banco por metro linear de crista por dia;<br>- Taxa de avanço da crista <0.1 m por dia   | 0                            |
| Sismicidade                          | Baixa  | 0                            |
| Condições piezométricas e climáticas | - Baixas pressões piezométricas, nenhuma surgência na fundação;<br>- Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha;<br>- Precipitação limitada;<br>- Infiltração mínima dentro da pilha;<br>- Nenhuma camada de neve ou gelo na pilha ou fundação | 0                            |
| Somatório                            |  | 200                          |

Tabela 3 - Pontuação para DCE Mina Gaspar Simões

| <b>Classificação da estabilidade</b> | <b>Potencial de Ruptura</b> | <b>Nível de Esforço Recomendado para Investigação, Projeto e Construção</b>  | <b>Faixa de pontuação</b> | <b>Classificação da PDE</b>                 |
|--------------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------|---|
| <b>I</b>                             | Desprezível                 | - Reconhecimento básico do local, documentação de referência;<br>- Programa mínimo de ensaios de laboratório;<br>- Rotina de checagem de estabilidade, possivelmente usando ábacos;<br>- Restrições mínimas na construção;<br>- Monitoramento apenas visual. | < 300                     | <b>Mina Gaspar Simões</b><br><br><b>200</b> |

Tabela 4 - Classificação da PDE

| Classe da Pilha | Monitoramento Instrumental                            | Descrição  | Frequência | Relatório        |
|-----------------|---|--|------------|------------------|
| I               | - Inspeção visual;<br>- Piezômetros onde é aplicável. | Encarregado de turno faz a inspeção                | 4 horas    | Relatório Diário |
|                 |   | Inspeção periódica detalhada feita pelo Engenheiro | Anual      | Relatório Anual  |

Tabela 5 - Recomendações monitoramento PDE

Verifica-se que o DCE atual se enquadra como Classe I e risco de ruptura desprezível segundo a metodologia. Mesmo considerando as ampliações e configuração final do DCE, o mesmo mantém-se na Classe I, destacando que até Classe II, o risco atribuído a potencial de ruptura é baixo. Sendo recomendável nestas Classes o monitoramento visual, avaliações quantificadas por ábacos e instrumentações quando cabível. Mesmo na situação de ampliação e configuração final o DCE tende a manter seu enquadramento, considerando a geometria.

### Configuração geométrica

A tabela abaixo, apresenta a configuração geométrica proposta com base na avaliação realizada. Tal configuração considerou as verificações qualitativas e quantitativas, as quais indicam viabilidade pela execução nas configurações propostas. Destaca-se que a proposição da geometria além da viabilidade geotécnica, se sustenta na otimização de espaço e minimização de impactos, reduzindo movimentações de terra e impactos em área planejada; uma vez que se entende que na configuração proposta atualizada a estabilidade é garantida (se enquadrando em norma).

| DCE atual + ampliação | Altura bancada | Inclinação banca |
|-----------------------|----------------|------------------|
| Primeira bancada      | Até 25 metros  | Até 35°          |
| Segunda bancada       | Até 15 metros  | Até 35°          |

Tabela 6 - Configuração dos DCEs.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia adotada se mostrou adequada para o caso em questão. Os resultados das avaliações realizadas corroboraram pelo entendimento de estabilidade do DCE na situação atual e de sua ampliação proposta. A avaliação de equilíbrio limite, feita sobre os perfis, apresentou FS condizentes com o sugerido na NBR 13029:2017. Tal entendimento é reforçado pela avaliação qualitativa, que em função de características da Pilha/Depósito apontou para sua estabilidade – classificando de baixo risco. Sendo sugerida inspeções

visuais rotineiras e inspeções de maior detalhamento anualmente.

Considerando que avaliação geotécnica aponta para estabilidade e baixo risco da situação atual e da ampliação proposta, podemos concluir que a adoção de geometria mais conservador do projeto original se configuraria em um custo financeiro e ambiental desnecessário. Sendo que a configuração atual já cumpre as necessidades de estabilidade e operacionais.

Referente a metodologia adotada, identifica-se potencial para aplicações na estabilidade de outros depósitos ou mesmo outras situações, como em taludes escavados e barragens. Desde que observadas as necessárias adaptações quanto a avaliação qualitativa. Ao exemplo deste estudo, a avaliações geotécnica de estabilidade pode validar ou apontar para configurações que sejam mais econômicas ao empreendimento e menos impactantes ao meio ambiente, ao se evitar estruturas superdimensionadas.

## REFERENCIAS

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. Mestrado em Engenharia Mineral—[s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

ARAGÃO, G. A. S.; OLIVEIRA FILHO, W. L. DE. Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, p. 193–198, 2011.

BC MINE WASTE ROCK PILE RESEARCH COMMITTEE. **Mined Rock and Overburden Piles: Investigation & Design Manual**. , 1991.

CASTRO, J. N. **Dimensionamento e Classificação de Pilha de Estéril: Estudo de Caso em uma Mina de Fosfato – Tapira (MG)**. Monografia—Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.

DA CRUZ, P. T. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. [s.l.] Oficina de Textos, 1996.

FERNANDO PORTUGAL MAIA SALIBA et al. **Determinação de densidade natural em pilhas de estéril em operação**. . Em: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. Belo Horizonte, MG, Brasil: 2016. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/proceedings/paper/?P=CB-06-0039>>. Acesso em: 12 ago. 2022

FU-HSUAN, Y. et al. Modeling Slope Topography Using Unmanned Aerial Vehicle Image Technique. **MATEC Web of Conferences**, p. 6, 2018.

GÓMEZ, J.; GARCIA, D. M.; ROMANEL, C. **Análise numérica 3D da estabilidade de taludes de grande altura em minas a céu aberto**. Proceedings. **Anais...** Em: XXXVII IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING. Brasília: 2016.

MARIANI, G. F. **Estudo de Características Geomecânicas de Estéreis de Mineração do Projeto de Mina de Caçapava do Sul**. Monografia—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017.

PECK, R. B. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. **Geotechnique**, v. 19, n. 2, p. 171–187, 1969.

STORMONT, J. C. Stability Evaluation of a Mine Waste Pile. **Environmental and Engineering Geoscience**, v. 11, n. 1, p. 43–52, 1 fev. 2005.

ULUSAY, R.; ARLKAN, F.; YOLERI, M. F. Engineering geological characterization of coal mine waste material and an evaluation in the context of back-analysis of spoil pile instabilities in a strip mine, SW Turkey. p. 25, 1995.

WANG, H. et al. Evolution mechanism study of flow slide catastrophes in large waste dumps at the Nanfen iron mine. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 79, n. 9, p. 4733–4747, nov. 2020.

ZEKKOS, D. et al. Lessons Learned from The Application of UAV-Enabled Structure-From-Motion Photogrammetry in Geotechnical Engineering. v. 4, p. 254, 14 nov. 2018.

ZOU, P. et al. Sample Rocks Tests and Slope Stability Analysis of a Mine Waste Dump. **Advances in Civil Engineering**, v. 2018, p. 1–17, 27 dez. 2018.