

# A Influência da Vegetação no Fechamento da Pilha de Estéril PDE Unificadas Conceição

Marina Júlia Ferreira

Engenheira Geotécnica, Belo Horizonte, MG, Brasil, marina.ferreira1@vale.com

Marcio Fernandes Leão

Tractebel/UFV, Belo Horizonte, MG, Brasil, marciotriton@hotmail.com

**RESUMO:** Estudos voltados às pilhas de estéril vêm ganhando notoriedade as soluções de disposição no ambiente da mineração. Apesar do conhecimento sobre aspectos construtivos dessas estruturas, questões relacionadas a performance a longo prazo em ambientes tropicais, ainda carecem de compreensão. Nesse âmbito, durante os processos de fechamento são implantadas soluções de vegetação para cobertura dos taludes. Entretanto, a influência da vegetação, em especial de grande porte na estabilidade dos taludes, carece de estudos específicos principalmente em pilhas de estéreis antigas e que não possuem *As Built*. O objetivo do artigo é avaliar a estabilidade da PDE Unificadas Conceição sob a influência da sobrecarga da vegetação de médio e grande porte e seus impactos positivos e negativos para o fechamento de uma pilha de estéril. A metodologia baseou-se em uma pesquisa quantitativa, em dados de estudos ambientais e plano de intervenção ambiental. Todas essas informações foram incorporadas em análises de estabilidade da pilha, buscando a verificação da estabilidade sob aspecto de sobrecarga da vegetação nos fatores de segurança. Os resultados demonstraram a permanência da estabilidade dos taludes da pilha com áreas vegetadas mitigando impactos erosivos se comparado com áreas não vegetadas. Assim, o estudo buscou subsidiar questões relacionadas à inspeção geotécnica dessas estruturas, sendo oportuna a consideração da vegetação para a estabilidade geotécnica de pilhas a longo prazo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade, Empilhamento de Estéril, Vegetação.

**ABSTRACT:** Studies focused on waste rock piles have gained notoriety regarding disposal solutions in the mining environment. Despite knowledge about the construction aspects of these structures, issues related to long-term performance in tropical environments still lack understanding. In this context, during the closing processes, vegetation solutions are implemented to cover the slopes. However, the influence of vegetation, especially large vegetation on the stability of slopes, requires specific studies, especially in old waste piles that do not have *As Built*. The objective of the article is to evaluate the stability of PDE Unificadas Conceição under the influence of medium and large vegetation overload and its positive and negative impacts on the closure of a waste pile. The methodology was based on quantitative research, data from environmental studies and an environmental intervention plan. All this information was incorporated into pile stability analyses, seeking to verify stability under the aspect of vegetation overload on safety factors. The results demonstrated the continued stability of the pile slopes with vegetated areas mitigating erosive impacts compared to non-vegetated areas. Thus, the study sought to support issues related to the geotechnical inspection of these structures, making it appropriate to consider vegetation for the long-term geotechnical stability of piles.

**KEYWORDS:** Stability, Stacking of waste, Vegetation.

## 1. INTRODUÇÃO

A operação das PDE's, durante muito tempo, era desenvolvida com projetos simples sob a ótica da possibilidade dessas pilhas serem alteadas ou mesmo receber rejeitos. Além disso, os projetos de engenharia devem contemplar o plano de fechamento. O planejamento de fechamento de uma mina, seja para um novo projeto ainda em elaboração, seja de uma mina já em funcionamento, é tema cada vez mais presente na pauta

de discussão das empresas de mineração, dos órgãos reguladores e do meio acadêmico (SÁNCHEZ *et al*, 2013). A terminologia desativação de mina é empregada por diversos autores como fechamento de mina. Para esse processo, caracterizam ações que compõem o descomissionamento, a reabilitação, a manutenção e monitoramento e o pós-fechamento.

A não reabilitação de áreas degradadas pela mineração ou a aplicação de técnicas inadequadas na execução dos planos de desativação e fechamento de mina, podem originar passivos ambientais, que por sua vez podem acarretar acidentes ambientais, podendo provocar danos ao meio ambiente e riscos à saúde humana (TONIDANDEL, 2011).

Muitos empilhamentos foram construídos ao longo da vida útil de uma mina, onde a maioria apresenta pouca informação sobre a interface com a vegetação nativa no local de implantação, bem como quando esses projetos serão descomissionados (VICK, 1983).

O objetivo do artigo foi a avaliação da estabilidade da PDE Unificadas Conceição sob a influência da sobrecarga da vegetação de médio e grande porte e seus impactos positivos e negativos na incorporação dessa vegetação nessa estrutura, visando o plano de fechamento.

## **2. CARACTERÍSTICAS DA PDE**

### **2.1. Considerações da estrutura**

A PDE Unificadas Conceição integra o Complexo Minerador de Itabira. A pilha situada a oeste da cava das Minas do Meio e a noroeste da cava da Mina Conceição. É composta por empilhamentos implantados ao longo dos anos (período estimado entre os anos 1961 à 2001), composta por 5 vertentes (Lagoinha, Mangueira, Subestação, Dinamitagem e Correia), numa estrutura que se comporta em formação tipo Bolo de Noiva. O polígono da pilha e suas divisões atribuídas no passado, sendo esta zoneada com base nas pilhas de origem, são preservadas até hoje apesar de representar limites de suas vertentes de forma estimada, uma vez que não existe registros da época informando o projeto de implantação com estas informações.

Segundo o histórico da implantação da PDE, a pilha foi desenvolvida pela disposição de estéril em camadas, pelo método ascendente. Para a implantação da pilha foi realizado o tratamento da fundação com a retirada da vegetação e dos solos de baixa resistência geotécnica e a implantação de sistema de drenagem, interna e externa. Após este período, conforme evolução das atividades a pilha recebeu cobertura vegetal através de biomanta e áreas de reflorestamento e recuperação ambiental.

## **3. METODOLOGIA**

A metodologia iniciou por uma pesquisa quantitativa, com metodologia exploratória utilizando: dados dos estudos ambientais, Plano de Intervenção Ambiental (PIA), onde foram coletados os dados da vegetação existente na pilha, tais como: porte, peso e enraizamento. Esses dados foram incorporados às análises de estabilidade da pilha, verificando a influência sob o aspecto de sobrecarga da vegetação nos fatores de segurança, buscando identificar vantagens e desvantagens da vegetação na pilha. O estudo ainda encontra-se em desenvolvimento e dados como, por exemplo, o enraizamento, não foi considerado nas análises.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Dados Operacionais da Vegetação**

Atualmente a pilha conta com vegetação de espécies e portes diferentes a depender da região e vertente da pilha. Para controle da vegetação atualmente a operação utiliza atividades de podas e capinas em pontos específicos, focados atualmente na rotina de inspeção e monitoramento. A periodicidade torna-se maior nas regiões onde existe instrumentação implantada e períodos críticos, como os chuvosos (Figura 1).



Figura 1. Condição da vegetação com o controle de poda e capina em vertentes da pilha (2023/2024).

Em 2023, a equipe de campo identificou dificuldade maior no controle da vegetação onde está sendo implementada nova alternativa de periodicidade em toda a pilha ao longo do ano. A vegetação sem controle do crescimento afeta negativamente a estrutura tendo em vista o prejuízo à inspeção e monitoramento. A cobertura vegetal nas encostas e taludes apresentam aspectos de segurança não só geotécnicos, mas também de manutenção, uma vez que dependendo de seu porte pode dificultar a sua manutenção. Na PDE Unificadas (Figura 1a à 1d) nota-se uma vegetação heterogênea em diversos pontos das vertentes, onde a vegetação mais densa é um fator negativo para a avaliação visual, tanto presencial quanto por drones, uma vez que as copas das árvores limita a visualização.

#### 4.2. Categorização da Vegetação

Como base de dados para categorização da vegetação na PDE Unificadas, foi utilizado o estudo para o PIA para as Cavas de conceição e Minas do Meio em Itabira/MG. As áreas do projeto compreendem aos locais com presença de vegetação nativa e exótica remanescente em Cavas de Conceição e Minas do Meio, além de pilhas de estéreis já existentes (Figura 2). Apesar do estudo não ter sido direcionado para a pilha em questão, a área do levantamento integra o estudo e esses dados foram utilizados.

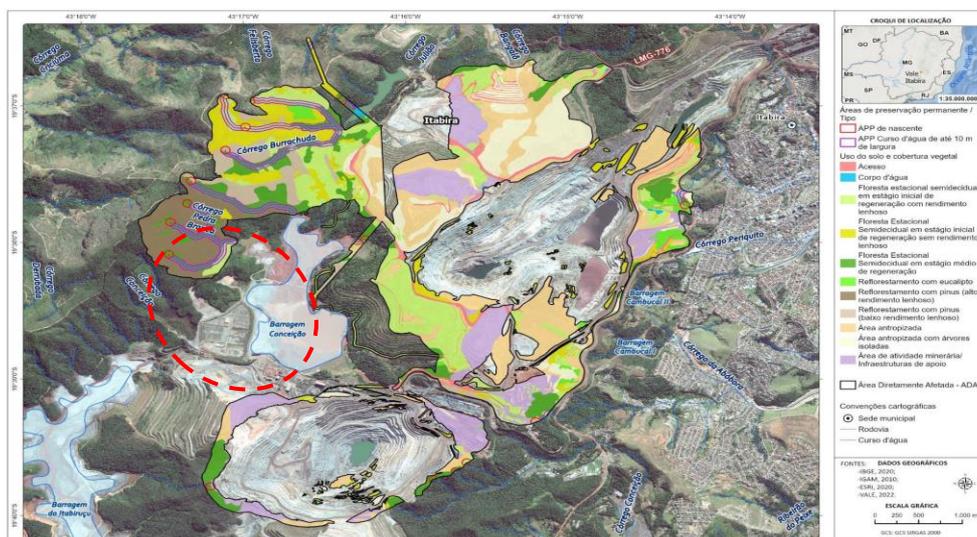


Figura 2. Uso do Solo e Cobertura Vegetal na Área Diretamente Afetada do Projeto.

Para a realização do inventário florestal na ADA, foram realizadas amostragens utilizando-se o método de parcelas, com o lançamento de parcelas de forma aleatória, com dimensões de 10 m x 40 m (400 m<sup>2</sup>). Para melhor visualização, foram instaladas no eixo central das parcelas fitilho de cor branca, além da coleta das coordenadas geográficas para posterior espacialização através do geoprocessamento (Figura 3).

Foi adotado o critério de inclusão de circunferência à altura do peito (CAP) igual ou superior a 15,8 cm, medido a 1,30 m acima do solo. Para os indivíduos que perfilharam ou bifurcaram abaixo de 1,30 m de altura. Todos os seus múltiplos troncos, que atenderam ao critério de inclusão (CAP  $\geq$  15,8 cm), foram medidos e suas alturas estimadas.

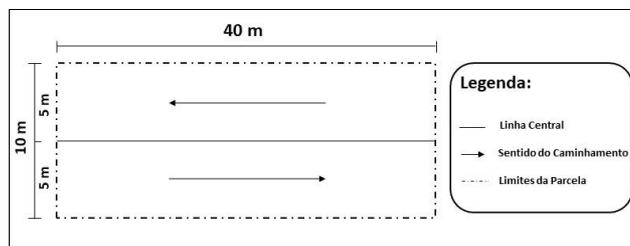


Figura 3. Esquema ilustrativo de alocação das parcelas em campo.

Além da medição e identificação de todos os exemplares arbóreos, cada indivíduo recebeu uma placa de PVC de identificação contendo número da parcela e o número do indivíduo inventariado (Figura 4). Os critérios utilizados na obtenção dos dados biométricos foram os citados na Resolução Conjunta SEMAD/IEF Nº 3.102 de 26 de outubro de 2021 (MINAS GERAIS, 2021).



Figura 4. Fotos ilustrando a metodologia empregada em campo para amostragem do estudo arbóreo.

Para a definição da malha amostral e distribuição das parcelas, foi priorizado o levantamento das fitofisionomias nativas e florestais mais representativas da ADA. Para as análises do inventário florestal foram utilizados os dados coletados em: 15 parcelas em Floresta Estacional Semidecidual em estágio médio de regeneração (0,60 ha); nove parcelas em Floresta Estacional Semidecidual em estágio inicial de regeneração (0,36 ha); cinco parcelas em reflorestamento de pinus com alto rendimento (0,20 ha); 12 parcelas em reflorestamento de pinus com baixo rendimento (0,48 ha); e nove parcelas em reflorestamento de eucalipto (0,36 ha).

Nota-se que a área de estudo trata-se de uma vegetação classificada como Floresta estacional Semidecidual em estágio inicial de regeneração com rendimento lenhoso. Na Figura 5 é destacada a vegetação eucalipto e pinus, como vegetação principal. Sendo assim, foram consideradas essas características, para o dimensionamento de sobrepos.



Figura 5. Perfil vegetação Pinus e Eucalipto.

Foram considerados os tipos de vegetação na área levantada (BECHARA, 2003; 2006) em dois estágios de regeneração, ou seja, Florestas em estágio médio de regeneração (FESD-M) e Florestas em estágio inicial de regeneração (FESD-I), detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo dos dados compilados da vegetação.

Sigla	Descrição	Vol. Total (m <sup>3</sup> ) / hectare	DAP Médio (cm)	Altura Média (m)	Densidade Média Pinus (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade Média Eucalipto (kg/m <sup>3</sup> )
FESD-M	Florestas Estacionais Semidecíduais em estágio médio de regeneração	172,11	12,8	8,38	500	650
FESD-I	Floresta Estacional Semidecidual em estágio inicial de regeneração	76,35	10,05	7,46	500	650

### 4.3. Dados de Anomalias – Levantamento de 2023

Para complementação da análise de dados, foi realizado um levantamento no GEOTEC (gerenciador de Anomalias) com todas elas registradas para a PDE Unificadas e 9 Pilhas do complexo de Itabira, em condições semelhantes de vegetação e/ ou idade. Para a seleção foi considerado pilhas que possuem vegetação de porte semelhante e pilhas sem vegetação, (Figura 6). Como as inspeções acontecem em periodicidades diferentes, foram consideradas as inspeções mensais para todas as pilhas de forma a uniformizar os dados.

#### Principais anomalias encontradas em 9 PDES de Itabira

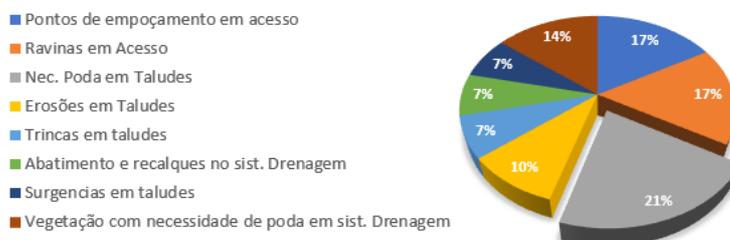


Figura 6. Principais anomalias levantadas em 2023- PDE's Itabira.

Além da análise apresentada para as 9 pilhas do complexo de Itabira, foi realizado ainda um levantamento com as anomalias registradas na PDE Unificadas, considerando os mesmos tipos de anomalias (Figura 7) e classificados com base na periodicidade em que foram apontadas. A PDE Unificadas possui inspeções mensais e semanais. Neste caso foram consideradas as inspeções mensais e unificado os dados para toda a pilha.

#### Principais anomalia identificadas na PDE Unificadas em 2023

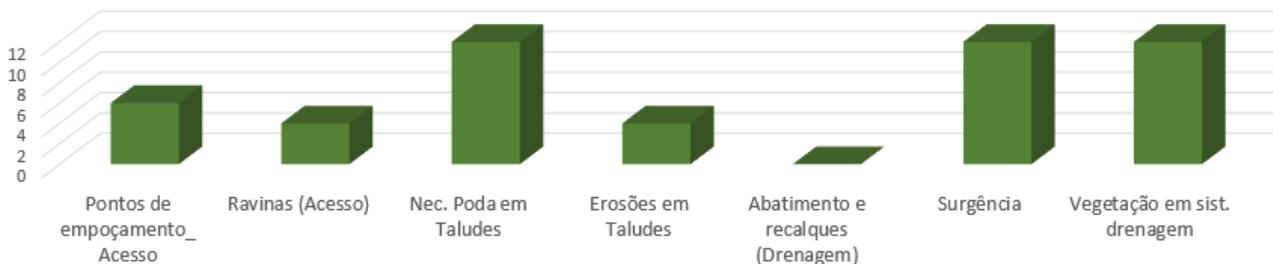


Figura 7. Principais anomalias apresentadas na PDE Unificadas - 2023

Na avaliação dos dados compilados constatou-se que para as anomalias das pilhas apresentadas, 35% dessas tratam de problemas com o controle da vegetação (21% representando poda em taludes e 14% vegetação no sistema de drenagem), seguidos por pontos de empocamento e ravina nos acessos. Todas essas

anomalias apresentam a necessidade de uma manutenção periódica constante e muito bem programada. Outro grupo representativo se trata de erosões em taludes em locais onde não existia cobertura vegetal.

Os dados levantados na PDE unificadas demonstram a necessidade de manutenção com poda e capina tanto em taludes como no sistema de drenagem em todas as suas inspeções. Essa anomalia é recorrente seguida de pontos de empoçamento em 50%, conforme inspeções. Cabe ressaltar que a anomalia de surgência relatada, se trata de um ponto específico e em processo de correção.

Tendo em vista o cenário das estruturas avaliadas, durante o ano de 2023, o controle e manutenção não apropriada se destacaram como fator crucial no surgimento de anomalias. A não programação desses e que este se não bem planejado e com recursos apropriados, se tornam um ponto negativo para a estabilidade de taludes de pilhas de um modo geral. Ressalta-se que a velocidade de crescimento da vegetação altera de acordo com a pluviometria, neste caso. Assim, no mês de janeiro de 2024 o índice pluviométrico foi acima da média histórica, bem como nos anos de 2022 e 2023.

#### 4.4. Análises de Estabilidade

Para as análises de estabilidade, foi considerado o carregamento estático sob condições drenadas, considerando superfícies de ruptura críticas circulares e não circulares. Rupturas rasas não representativas do tipo “casquinhas” foram desconsideradas dos resultados, sendo utilizadas superfícies com profundidade superior a 10 m. As superfícies freáticas foram traçadas a partir das leituras máximas observadas na instrumentação existente das PDE, considerando o histórico de leitura de 2023. O critério de ruptura para os materiais adotados foi o de Mohr-Coulomb. Para o estéril, os parâmetros encontram-se indicado conforme Tabela 2, obtidos por ensaios. Os fatores mínimos ( $FS_{\text{Mín}}$ ) considerados para garantir a segurança das estruturas são os indicados na Tabela 3. No cenário atual de operação de PDE's a influência da vegetação foi desconsiderada, uma vez que existe uma dificuldade na determinação de parâmetros específicos considerando o ciclo de vida arbóreo nos taludes. A vegetação é comumente recomendada com fins de proteção superficial e contemplando aspectos ambientais, de forma a avaliar qualitativamente as espécies. Entretanto, estudos sobre o efeito do enraizamento estão em curso.

Tabela 2. Parâmetros de Material- PDE Unificadas Conceição

Material	g (kN/m <sup>3</sup> )	c' (kPa)	$\phi'$ (°)
Pilha de Estéril	18	5	28

Tabela 2. Fatores de Segurança Mínimos considerados - PDE Unificadas Conceição.

Análise	Condição freática	Carregamento	FS admissível	Referência
Ruptura global do talude ou entre bermas	Normal	Drenado	$FS_{\text{Mín}} \geq$	1,50
	Crítica	Estático		

#### 4.5. Avaliação de Estabilidade

Para a avaliação da estabilidade e buscando o máximo de informações existentes, foi considerada a Seções E-E' (Vertente Lagoinha), que apresenta os dados para categorização da vegetação no PIA, para as Cavas de Conceição e Minas do Meio em Itabira/MG), conforme Figura 8.

As análises de estabilidade para a seção E-E, consideraram as condições, estática drenada global circular e global não circular para regiões da pilha sem manutenção. As análises apresentaram fatores de segurança (FS) de 1,80 (Figura 10) e 1,77, respectivamente. Ambas as análises mostraram fatores de segurança aceitáveis (Tabela 3) e sem considerar sobrepeso ou aspectos da vegetação que compõem a pilha. Posteriormente, foram realizadas análises considerando uma carga adicional de sobrepeso buscando representar a vegetação da Pilha composta Pinus e Eucalipto. A carga (Tabela 1) de pinus e de eucalipto consideradas foram de 550 kN/m<sup>3</sup> e 650 kN/m<sup>3</sup>, respectivamente, ao longo de toda face da pilha. Avaliações sobre o acréscimo de resistência devido ao enraizamento ainda estão em andamento e não foram consideradas nas análises. A Tabela 4 apresenta o resumo das análises.

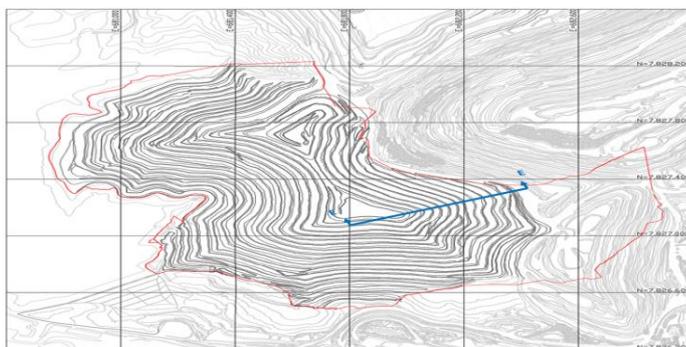


Figura 8. Em (a), localização em planta das seções de análise.

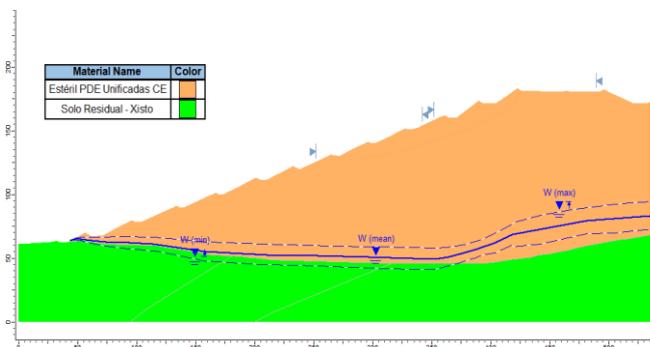


Figura 9. Seção E-E (Lagoinha) modelada considerando a carga piezométrica.

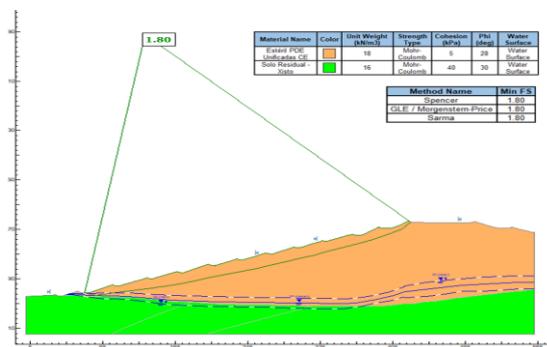


Figura 10. Seção E-E (Lagoinha) – Análise estática drenada global circular

Tabela 4. Parâmetros de Material- PDE Unificadas Conceição

Vegetação	FS - Análise estática drenada global circular	FS - Análise estática drenada global não circular
Pinus	1,76	1,71
Eucalipto	1,63	1,63

Avaliando as condições drenada global circular com sobrepeso de Pinus (Figura 11) e Eucalipto (Figura 12), os Fatores de Segurança foram 1,76 e 1,63, respectivamente. Já para a condição drenada global não circular, os Fatores de Segurança foram de 1,71 e 1,63, respectivamente. Assim, as árvores de grande porte geram uma sobrecarga que reduz o Fator de Segurança nas estruturas, porém aceitáveis. Entretanto, a vegetação que compõe a pilha, contribui significativamente para o não surgimento de erosões, ravinas, trincas e abatimentos, necessitando que essa seja controlada de forma a permitir as análises e inspeções nos taludes (HUIJUAN *et al.*, 2020).

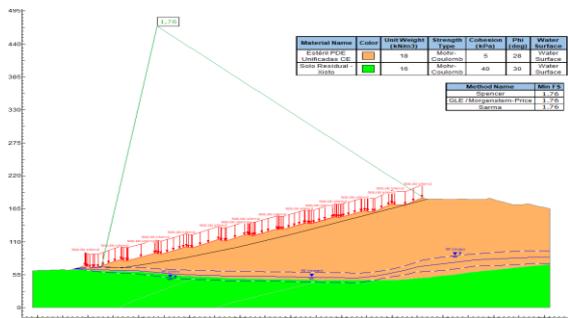


Figura 11. Seção E-E (Lagoinha) – Análise estática drenada global circular (Com Sobrecarga Pinus)

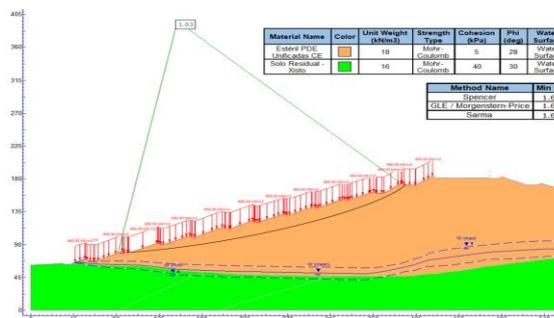


Figura 1. Seção E-E (Lagoinha) – Análise estática drenada global circular (Com Sobrecarga Eucalipto)

Desta forma, a cobertura vegetal nos taludes pode não ser benéfica, considerando as variáveis analisadas e desconsiderando o efeito das raízes, mas está intimamente relacionada com o tipo, densidade e saúde da vegetação em engenharia ecológica (FORBES et al., 2020). Por fim, a realização de manutenções constantes direciona a um cenário positivo para utilização de vegetação em taludes e pilhas de estéril (ATKINSON, 1981).

## 5. CONCLUSÕES

Este artigo buscou discutir os primeiros resultados sobre a influência da vegetação em projetos de fechamento. Para os tipos de árvores consideradas, os fatores de segurança atenderam a normativa. No entanto, fatores importantes devem ser ponderados no avanço dos estudos tais como: o enraizamento do solo pela vegetação, que podem aumentar a coesão do solo e a resistência do solo e, prejudicar a implantação de sistemas de drenagem (danificando canaletas de concreto) e gerar a concentração de fluxo de água. Entretanto, os caules e as folhas podem ser um fator de redução da erosão, aumentando não apenas a rugosidade da superfície como as forças sobre a massa do solo pela ação do vento, ativando deslizamentos. Considera-se oportuno o avanço dos estudos considerando o enraizamento da vegetação nas análises.

## AGRADECIMENTOS

O agradecimento principal ao meu bom Deus, que nos capacita e nos guia e concede condições de fazer coisas impossíveis aos nossos olhos. Ao querido Marcio Leão, que esteve orientando e incentivando nessa jornada desafiadora. A Vale que sempre apoia, incentiva e disponibiliza recursos para o estudo e aprimoramento de profissionais e, que para este artigo além do incentivo, disponibilizou dos dados para realização das avaliações. À minha família que sempre apoia e entende as oscilações de cada momento da vida profissional, acadêmica e pessoal.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atkinson, J. H. (1981) *Foundations and Slopes: An Introduction to Applications of Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill, London.
- Bechara, F. C. (2003) *Restauração Ecológica de Restingas Contaminadas por Pinus no Parque Florestal do Rio Vermelho, Florianópolis, SC*. Florianópolis, 125 f. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal) - Departamento de Botânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Bechara, F.C. (2006) *Unidades Demonstrativas de Restauração Ecológica através de Técnicas Nucleadoras: Floresta Estacional Semidecidual, Cerrado e Restinga*. Dissertação (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- Huijuan, L. D. W., Songtang, H. Y. F., Wenle, C. P. Z., Yuchao, Q. (2020) *Experimental study on the effects of tree planting*. Landslides, 1021–1035.
- ICMM (2008) *Planning for Integrated Mine Closure: Toolkit*. London. Traduzido e publicado em português pelo IBRAM.
- MINAS GERAIS. *Resolução Conjunta Semad/IEF nº 3.102, de 26 de outubro de 2021*. Dispõe sobre os processos de autorização para intervenção ambiental no âmbito do Estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário do Executivo, Belo Horizonte, MG, 04 nov. 2021. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=54600>. Acesso em: 05 jul. 2024.
- NBR 13029/2017. *Mineração - Elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilhas*.
- Sánchez, L.E.; Silva-Sánchez, S.S.; Neri, A.C. (2013) *Guia para o Planejamento do Fechamento de Mina*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.
- Tonidandel, R. P. (2011) *Aspectos legais e ambientais do fechamento de mina no Estado de Minas Gerais*, 146p. Dissertação (Mestrado em Geologia Econômica Aplicada) - Universidade Federal de Minas Gerais - MG.
- Vick, S.G. (1983) *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*, Wiley Interscience. New York.