

ANÁLISE DE ESTABILIDADE EM DEPÓSITOS CONTROLADOS DE ESTÉRIL DE MINERAÇÃO - ESTUDO DE CASO

Data de submissão: 02/05/2023

Data de aceite: 02/06/2023

Gislene de Sá Souza

Universidade Federal do Pampa –
UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
<http://lattes.cnpq.br/3730069690845297>

Diogo Peixoto Cordova

Universidade Federal do Pampa –
UNIPAMPA
Caçapava do Sul – RS
<http://lattes.cnpq.br/2354744565105719>

RESUMO: A estabilidade de um depósito controlado de estéril (DCE) deve ser observada, visto que uma deposição acelerada poderá ocasionar elevadas tensões de cisalhamento, aumento de poro pressão e instabilidade. Um sistema de classificação é uma metodologia aplicada para estimar o potencial de ruptura que uma pilha poderá ter, permitindo avaliar seu comportamento e analisar fatores que afetam sua estabilidade. Essas informações permitem antever o comportamento interno da DCE, identificando problemas condicionantes, realizando classificações prévias dos possíveis locais para sua construção, além de estabelecer investigação, projeto, construção e

monitoramento de acordo com cada classe encontrada. A proposta deste estudo de caso foi examinar a estabilidade de três depósitos de estéril de uma mineradora localizada na cidade de Caçapava do Sul/RS, identificando, analisando e mitigando riscos geotécnicos das pilhas, além de identificar o fator de segurança (FS). A avaliação foi realizada de forma semiquantitativa, onde o resultado estabelece uma classe de acordo com o potencial de instabilidade. Para a verificação do potencial de estabilidade, foi empregado o método de equilíbrio limite definindo o FS das DCEs. O resultado demonstrou estabilidade dos taludes, porém em alguns pontos se sugere um monitoramento e melhora da drenagem.

PALAVRAS-CHAVE: pilhas de estéril, sistema de classificação, fator de segurança, riscos geotécnicos.

STABILITY ANALYSIS OF MINING WASTE DUMP – CASE STUDY

ABSTRACT: The amount of material deposited in a controlled waste deposits in a short time must be observed, since an imminent accumulation can cause high shear stresses, increase in pore pressure and instability. A classification system is a

methodology applied to estimate the failure potential that a pile may have, allowing to evaluate its behavior and analyze factors that affect its physical stability. This information makes it possible to foresee the internal behavior of the pile, identifying conditioning problems, carrying out previous classifications of possible locations for its construction, in addition to establishing investigation, design, construction and monitoring according to each class. The purpose of this case study was to examine three waste piles of a mining company located in the city of Caçapava do Sul/RS, identifying, analyzing, and mitigating geotechnical risks of the piles, in addition to identifying safety factors. The evaluation was carried out in a semi-quantitative way, where the result establishes a class according to the instability potential. To verify the stability, the limit equilibrium method was used, defining the safety factor of the piles. The results showed a stable scenario, even though, some points need geotechnical monitoring.

KEYWORDS: waste piles, classification system, safety factor, geotechnical risks.

1 | INTRODUÇÃO

A norma ABNT NBR 13029:2017, determina imposições mínimas para a elaboração e apresentação de projeto de pilha para disposição de estéril, atendendo às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação. Além destes, sua construção deve seguir as normas ambientais e os critérios econômicos, estruturais, sociais, de segurança e risco.

O planejamento das DCEs (*Depósitos Controlados de Estéril*) termo utilizado atualmente, é imprescindível para execução de uma mina, sendo uma das maiores estruturas geotécnicas na mineração. É necessário realizar um projeto que reduza os custos à mineradora, porém concomitante atenda às normas vigentes de segurança e ambiental (VICTORINO, 2016). A disposição de uma quantidade considerável de material sobre o local das DCEs, em um curto espaço de tempo, proporciona elevadas tensões de cisalhamento, propiciando um aumento repentino na poro pressão, e como resultado a instabilidade de fundação da pilha (NUNES, 2014).

A estabilidade das pilhas deve ser cuidadosamente avaliada e monitorada durante a fase operacional da lavra (ROBERTSON *et. al.*, 1985). A realização de estudos de acompanhamento na construção e o monitoramento da pilha devem ser executados periodicamente, observando sua estabilidade, deste modo, evita-se os problemas técnicos que poderão surgir. Um sistema de classificação oferece a identificação mínima que uma DCE deve ter, como seu tipo e sua configuração, a partir do seu produto, estrutura ou processo. Essas informações permitiriam antever o comportamento interno da pilha e identificar problemas condicionantes (ARAGÃO & FILHO, 2011).

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a estabilidade dos taludes das pilhas de disposição de estéril, pertencentes a uma mineradora. Como objetivos específicos destacam-se:

- identificar, analisar e sugerir a mitigação de riscos geotécnicos nas DCEs;
- avaliar seu estado de conservação;
- analisar a estabilidade dos taludes onde é disposto o estéril, identificando os fatores de segurança;
- propor melhorias de manutenção e conservação dos taludes através de monitoramento geotécnico.

1.2 Localização do estudo de caso

A área do estudo de caso se dá em uma mina de calcário dolomítico no município de Caçapava do Sul, localizada a dez quilômetros do centro urbano e que tem como principal via de acesso a BR-392, conforme a Figura 1. A cidade pertence a mesorregião central do Rio Grande do Sul, cerca de 260 km a oeste da capital Porto Alegre. A atividade da mineradora consiste na produção de calcário, cal e argamassa, utilizados na construção civil e agronegócio.

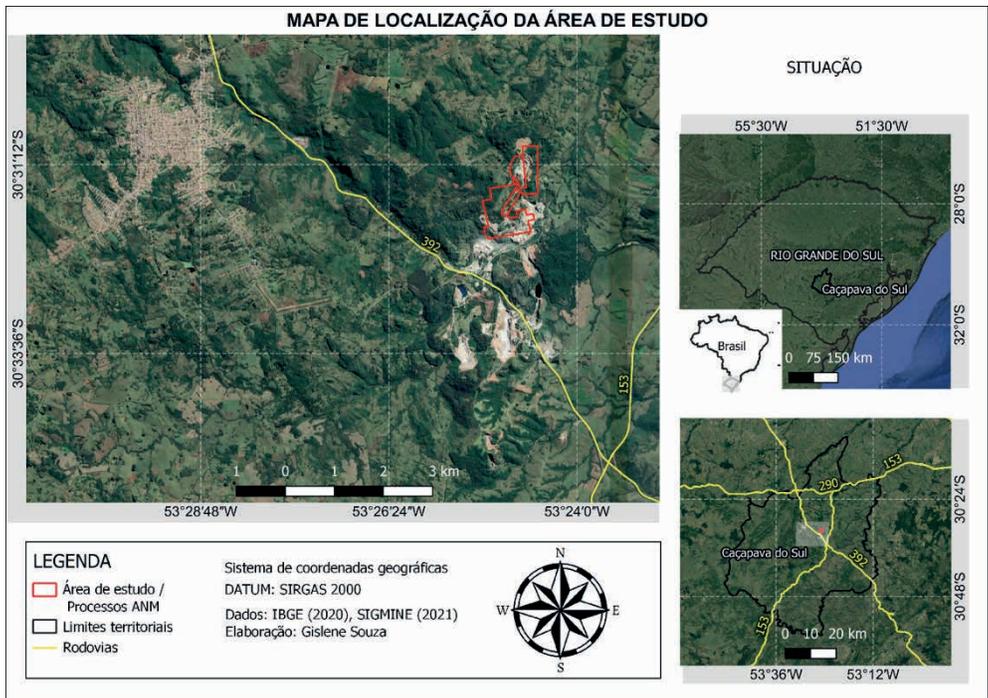


Figura 1 – Mapa de localização da área. Fonte: Elaborado pela autora.

2 | ESTADO DA ARTE

2.1 Métodos construtivos das DCEs

A formação de uma DCE deve constar no planejamento da mina, reunindo informações relevantes sobre os possíveis locais de implementação, características geológicas, ambientais, topográficas, hidrológicas, a quantidade de material que será depositado e o método de construção que será realizado.

De acordo com Forgearini *et al.* (2015), devido a DCE ser constituída por inúmeros tipos de materiais é considerável o cuidado com as características como coesão, ângulo de atrito, peso específico e ângulo natural de estabilidade dos materiais que abrangem todo o estéril. Para a construção da pilha, deve-se começar pela parte inferior com material relativamente seco, sendo empilhado para formar plataformas, deste modo o espalhamento e adensamento propicia um pequeno ângulo global de talude (FERREIRA, 2016). A disposição do estéril deve ser feita ao longo do comprimento da crista, fazendo desta a parte a mais extensa possível, reduzindo a taxa de avanço de elevação do aterro, favorecendo, portanto, a estabilidade (PETRONILHO, 2010).

No método construtivo, a disposição é feita por meio de camadas espessas, formando sucessivas plataformas de lançamento espaçadas com 10 m ou mais de intervalos, onde na operação é planejada para se aproveitar o máximo das condições geomorfológicas do terreno. A estabilidade pode aumentar, monitorando a largura, o comprimento e o espaçamento vertical das plataformas (ARAGÃO, 2008).

2.1.1 Método ascendente

A construção do método ascendente pode ser executada por camadas ou por bancadas. Elaborado por camadas, as pilhas serão construídas em horizontes e cada camada deverá ter a espessura de até 1,5 m. Na construção por bancada, a pilha desenvolve na altura de um banco e poderá ter a altura de 10 a 20 m (ARAGÃO, 2008). O empilhamento é realizado de jusante para montante, onde o estéril é direcionado às cabeceiras da bacia de drenagem a partir de um enrocamento de pé, de acordo com a Figura 2. O transporte e lançamento do material na plataforma de trabalho formam pilhas com altura de 2 a 3 m e o espalhamento do estéril constituindo camas com espessuras de 1 a 15,5 m realizado pelo trator de esteira. À medida que é realizado o tráfego de veículos, esse material é compactado (VICTORINO, 2016).

Neste método cada alteamento sustenta o precedente, sendo considerado o método mais vantajoso e preferível, pois o comportamento das pilhas pode ser documentado e compreendido (ARAGÃO, 2008). Os pontos favoráveis desse método é que qualquer ruptura que aconteça, deverá passar pelo banco anterior, que atua apoiando o pé do talude fornecendo confinamento para solos de fundação, e, o pé de cada banco é suportado na

berma superior.

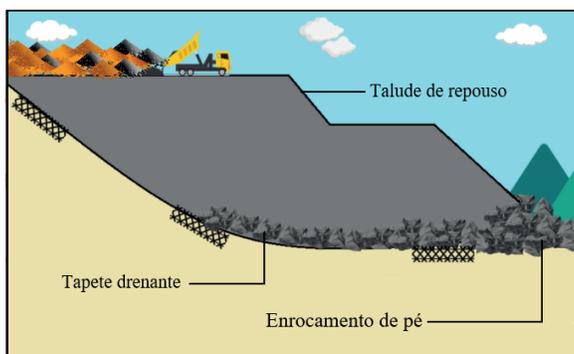


Figura 2 – Construção de uma pilha pelo método ascendente por camada. Fonte: Adaptado de FREITAS (2004).

2.1.2 Método descendente

Neste método, a camada é suportada no pé do talude anterior pela disposição de estéril a partir da cota mais alta do talude da pilha feita na altura máxima (VICTORINO, 2016). Sua construção é realizada somente com o basculamento do material por caminhão e o espalhamento por trator de esteira no ponto mais alto da pilha. Não há controle geotécnico, não é feita a compactação do aterro e nem é preparado a base para a disposição do material (COSTA, 2017), como demonstrado na Figura 3.

A estrutura das pilhas é bastante instável, sendo assim, possui alto grau de escorregamentos. Sua aplicação requer grandes restrições tornando indicada apenas para enrocamentos drenantes ou áreas confinadas (PETRONILHO, 2010). Este é considerado o método mais econômico, devido a redução da distância média de transporte (FERREIRA, 2016). A construção da pilha por este método não compreende um sistema de drenagem apropriado e não possui proteção superficial dos taludes contra a erosão, o que o torna altamente susceptível a rupturas (COSTA, 2017).

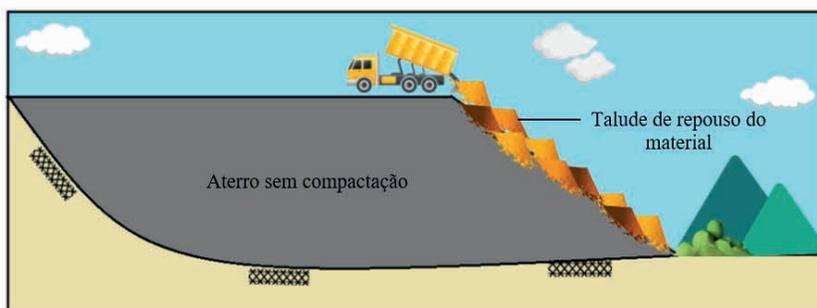


Figura 3 - Construção de uma pilha pelo método descendente. Fonte: Adaptado de FREITAS (2004).

2.2 Classificação das DCEs

O sistema de classificação é uma metodologia utilizada para avaliar o comportamento das estruturas existentes e analisar fatores que afetam a estabilidade física das pilhas. Também é uma ferramenta de planejamento, pois permite realizar classificações prévias dos possíveis locais para a construção da DCE, além de estabelecer os níveis de investigação, projeto, construção e monitoramento de acordo com cada classe (ARAGÃO, 2008).

Dependendo do material, o objetivo da estrutura e a limitação física do local, é possível identificar a classificação quanto ao tipo de pilha (Figura 4). Uma pilha do tipo aterro em vale, tem o início na porção montante e a disposição do estéril segue ao longo da porção jusante. A estrutura da pilha transversal a um vale transpõe o vale, porém não o preenche. A pilha em geral, possui uma drenagem na parte inferior no intuito de controlar o armazenamento e/ou evacuação de águas pluviais. A configuração de aterro de encosta é preenchida ao longo da encosta do vale, mas sem o seu preenchimento, sua elaboração deve ser planejada e deve ser construído canais de drenagens para evitar o acúmulo de água (VICTORINO, 2016).

O depósito do tipo aterro de crista é edificado no topo de um monte, a estrutura estende para baixo, acompanhando a inclinação do terreno (COSTA, 2017). A elaboração em pilha é feita de baixo para cima e os lados do talude são totalmente preenchidos. A construção é realizada com o terreno pouco inclinado ou levemente plano.

Um sistema de classificação auxilia descrever o tipo e a configuração da DCE. Essas informações contribuem para prever o comportamento interno da pilha, investigar prováveis danos e corrigi-los. As três principais partes do sistema são: avaliação de estabilidade da pilha, classes de estabilidade da pilha e verificação de enquadramento da classe.

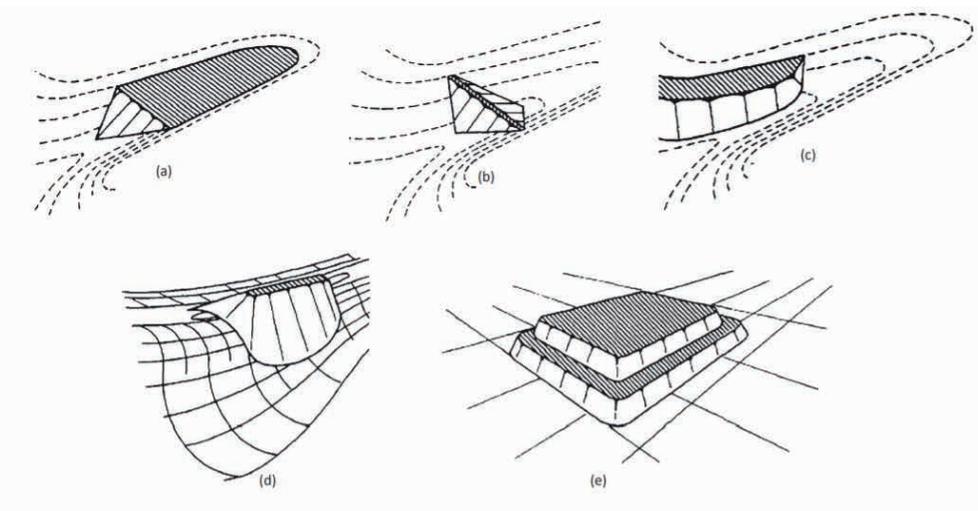


Figura 4 – Tipos de DCEs: (a) Aterro em vale; (b) Aterro transversal a um vale; (c) Aterro de encosta; (d) Aterro de crista; e (e) Pilha. Fonte: Guidelines For Mine Waste Dump and Stockpile Design (2017).

2.3 Método semiquantitativo de análise de estabilidade

2.3.1 Tabela de pontuação

A avaliação da estabilidade das pilhas pode ser realizada de forma semiquantitativa, onde o resultado estabelece uma classe de acordo com o potencial de instabilidade (Tabela 1).

Fatores		Faixa de Condições ou Descrições		Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	<50m		0
		50m - 100m		50
		100m - 200m		100
		>200m		200
	Volume da Pilha	Pequeno	<1 x 10 ⁶ m ³ /banco	0
		Médio	1 - 50 x 10 ⁶ m ³ /banco	50
		Grande	>50 x 10 ⁶ m ³ /banco	100
	Inclinação do Talude	Suave	<26°	0
		Moderado	26° - 35°	50
		Íngreme	>35°	100
Inclinação de Fundação Moderada Íngreme Extrema	Suave	<10°	0	
	10° - 25°	50		
	25° - 32°	100		
	>32°	200		
Grau de Confinamento Moderadamente confinado Sem Confinamento	Confinado	- Talude côncavo em planta ou seção; - Aterros em vale ou transversais a um vale, pé de talude em contato com a parede oposta do vale; - Ravinas em forma de dente de serra suavizando a inclinação de fundação.	0	
		- Bancos ou terraços naturais nos taludes; - Taludes com inclinação uniforme, limitados por topografia natural diversificada; - Empilhamento de estereis em encostas, em vales abertos, ou transversais a vales.	50	
		- Talude convexo em planta ou seção; - Aterros de encosta ou aterros de crista sem confinamento na base; - Sem ravinas ou bancos para auxiliar a construção.	100	

Tipos de Fundação Intermediária Fraca	Competente	- Materiais de Fundação tão ou mais resistentes que os da pilha; - Não sujeita a efeitos adversos da poro pressão; - Sem estruturas geológicas desfavoráveis.	0
	- Intermediária entre competente e fraca; - Ganho de resistência do solo com adensamento; - Dissipação do excesso de poro pressões com o controle da taxa de carregamento.	100	
	- Capacidade de suporte limitada, solos moles; - Sujeita a excessos de poro pressão devido ao carregamento; - Condições adversas de água subterrânea, surgências ou infiltrações; - Baixa resistência ao cisalhamento, com alto potencial de liquefação.	200	
Qualidade do material da pilha Moderada Pobre	Alta	- Resistente, durável; - Menos que 10% de finos.	0
	- Moderadamente resistente, durabilidade variável; - 10 a 25% de finos.	100	
	- Predominância de rochas fracas de baixa durabilidade; - Mais que 25% de finos, material de cobertura (capeamento).	200	
Método de construção Misto Desfavorável	Favorável	- 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
	- Bancos ou bancadas moderadamente espessas (25m - 50m); - Métodos mistos de construção.	100	
	- Bancos ou camadas muito espessas (>50m), plataforma estreita (aterro na forma de pontões); - Disposição abaixo da linha de queda do talude; - Construção descendente.	200	

Condições piezométricas e climáticas	Favorável	- Baixas pressões piezométricas, nenhuma surgência na fundação; - Improvável desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha; - Precipitação limitada; - Infiltração mínima dentro da pilha; Nenhuma camada de neve ou gelo na pilha ou fundação.	0
Condições piezométricas e climáticas	Intermediária	- Pressões piezométricas moderadas, algumas infiltrações na fundação; - Desenvolvimento limitado da superfície freática na pilha; - Precipitação moderada; Alta infiltração no interior da pilha.	100
	Desfavorável	- Altas pressões piezométricas, surgências na fundação; - Moderada a alta precipitação; - Significativo potencial de desenvolvimento de superfície freática ou lençol suspenso no interior da pilha.	200
Taxa de Disposição Moderada Alta	Baixa	- < 25 m ³ /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista < 0,1 m por dia.	0
		- 25 – 200 m ³ /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista de 0,1 m – 1,0 m por dia.	100
		- > 200 m ³ /banco por metro linear de crista por dia; - Taxa de avanço da crista > 1,0 por dia.	200
Sismicidade Moderada Alta	Baixa	- Zona de risco sísmico 0 e 1 (Escala Richter).	0
		- Zona de risco sísmico 2 e 3.	100
		- Zona de risco sísmico 4 ou maior.	200
Pontuação máxima possível de Estabilidade da Pilha: 1800			

Tabela 1 – Tabela de pontuação de estabilidade das pilhas de estéril. Fonte: Modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991)

Esse método auxilia compreender o comportamento da pilha à possíveis rupturas causadas pela sobrecarga de materiais, poro pressões e demais agentes condicionantes. O

conjunto de fatores não é fácil de ser avaliado, assim a avaliação é parcialmente subjetiva, porém o método de classificação alcança um nível aceitável de aplicabilidade e facilidade (ARAGÃO, 2008).

2.3.2 Classes de estabilidade

As classes de estabilidade definem o nível de esforço aconselhável para a investigação, projeto e elaboração da pilha, conforme Tabela 2 (ARAGÃO, 2008). Quanto maior a classe, maior será o esforço para o manejo do estéril. Caso a pilha seja definida como categoria III ou IV, não revela que ocorrerá o rompimento ou que esteja instável, apenas representa que existe um perigo potencializado (ARAGÃO & FILHO, 2011).

Classificação da Pilha	Potencial de Ruptura	Nível de esforço recomendado para investigação, projeto e construção	Pontuação
I	Desprezível	<ul style="list-style-type: none"> - Reconhecimento básico do local, documentação de referência; Programa mínimo de ensaios de laboratório; - Rotina de checagem de estabilidade, possivelmente usando ábacos; Restrições mínimas na construção; - Monitoramento apenas visual. 	<300
II	Baixo	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação completa do local; - Poços de inspeção, amostragem pode ser obrigatória; - Programa limitado de ensaios de laboratório; - Estabilidade pode ou não influenciar o projeto; - Análises básicas de estabilidade obrigatórias; - Certas restrições na construção; - Monitoramento visual e de instrumentos de rotina. 	300 - 600
III	Moderado	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação detalhada do local, em etapas; - Poços de inspeção obrigatórias, ou outras investigações de subsuperfície podem ser obrigatórias; - Amostragem indeformada pode ser obrigatória; - Programa detalhado de ensino de laboratório, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; Estabilidade influencia e pode controlar o projeto; Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente estudos paramétricos obrigatórios; - Projeto básico pode ser obrigatório para aprovação/ permissão; Restrições moderadas na construção (ex. taxa de carregamento limitada, espessuras das camadas, qualidade do material, drenagem superficial adequada etc.); - Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar o projeto, documentar performance e estabelecer limites descarregamentos. 	600 - 1200

IV	Alto	<ul style="list-style-type: none"> - Investigação detalhada do local em etapas; - Poços de inspeção e possíveis trincheiras obrigatórios; - Sondagens e outras possíveis investigações subsuperficiais, provavelmente obrigatória; - Amostragem indeformada provavelmente obrigatórias; - Programa detalhado de ensaios, incluindo propriedades-índice, resistência ao cisalhamento e durabilidade provavelmente obrigatórios; - Considerações sobre estabilidade essenciais; - Análises de estabilidade detalhadas, possivelmente incluindo estudos paramétricos e avaliações completas de alternativas provavelmente obrigatórias; - Projeto básico possivelmente obrigatório para aprovação/permissão; - Restrições severas na construção (ex. taxas limite de carregamento, espessuras das camadas, qualidade do material drenagem superficial etc.); 	>1200
		<ul style="list-style-type: none"> - Monitoramento detalhado de instrumentação para confirmar projeto, documentar performance e estabelecer limites de carregamento. 	

Tabela 2 – Classificação da Estabilidade da pilha e nível de esforço recomendado. Fonte: Modificado de BC Mine Waste Rock Pile Research Committee (1991).

2.4 Métodos de monitoramento de pilhas

Uma das ações mais importantes nas operações da mina, é a avaliação dos taludes. Conhecer o ângulo de inclinação é um dos fatores principais para a abertura e manutenção dos taludes da cava e dos taludes das pilhas de estéril.

Segundo Dias (2017), existem métodos que são aplicados no monitoramento dos taludes da cava e dos bota-foras. Os métodos são medições constantes, com o objetivo de atenuar problemas geotécnicos, onde são observados movimentações ou sinais de ruptura. Algumas técnicas são descritas a seguir.

2.4.1 Método topográfico

Executado com uma estação total, são realizadas medidas colineares entre os marcos topográficos, definidos e alinhados, medindo a distância entre eles, conforme Figura 5. Possui boa confiabilidade e de baixo custo.

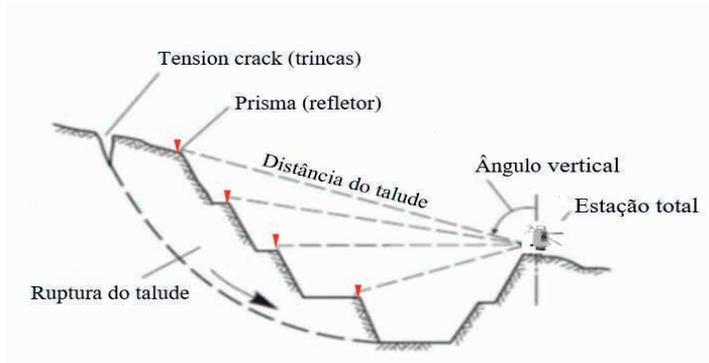


Figura 5– Esquema do método topográfico. Fonte: Modificado de Dias (2017).

2.4.2 Medidores de trincas e fendas

Servem como elementos indicativos de ruptura que estão prestes a acontecer. Os instrumentos geralmente utilizados são um fio e/ou régua metálica ou sistemas elétricos, que são postos após o desenvolvimento de trincas e fendas, de acordo com a Figura 6.

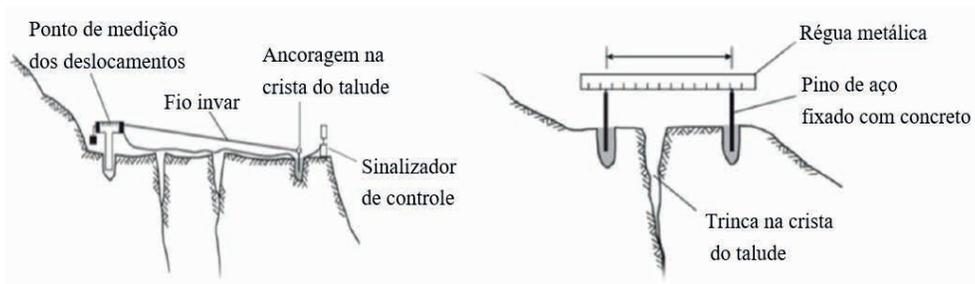


Figura 6 – Esquema do método de trincas e fendas utilizando fio invar e régua metálica. Fonte: Modificado de Dias (2017).

2.4.3 Fotografia dos taludes

Realiza-se uma série de fotografias dos taludes, demonstrado na Figura 7, posteriormente é feito uma superposição das imagens, onde é possível ao longo do tempo acompanhar possíveis variações de deslocamentos.



Figura 7 – Imagens de trincas observadas nos taludes de estéril. Fonte: Imagens da autora

2.5 Método de análise de equilíbrio limite

2.5.1 Mecanismo de ruptura circular

Ruptura circular ocorre em taludes onde não existe padrão estrutural definido e maciço rochoso fraturado que se comporta como solo. Pode ocorrer principalmente pelo peso excessivo de material depositado. Nos locais onde o maciço é exposto e não possui cobertura superficial, a presença de trincas permite a saturação e intensificação do grau de alteração, estimulando que ocorra esse tipo de ruptura.

A presença de água infiltrada é imprescindível para o desencadeamento dos movimentos de massa através da criação da frente de saturação, responsável pelo aparecimento de poro pressões (Figura 8) e a eliminação da sucção pré-existente (SILVA *et al.*, 2018).

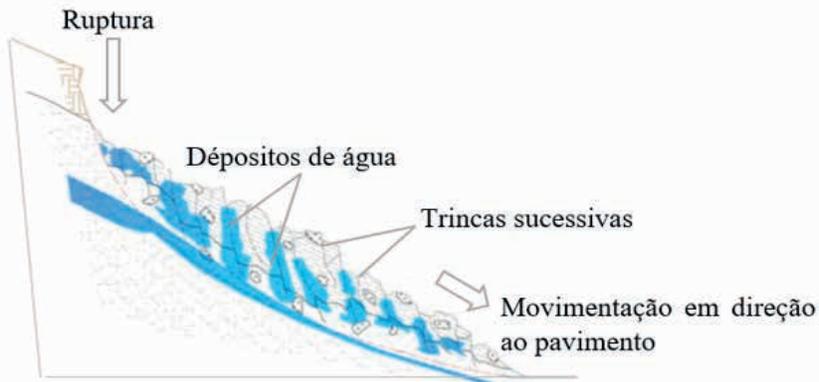


Figura 8 - Modelo geotécnico do mecanismo de ruptura do talude. Fonte: Modificado de Silva et. al (2018).

2.5.2 Cálculo do fator de segurança

As diferentes propriedades geomecânicas do maciço são consideradas para determinar o fator de segurança dos taludes. São realizadas análises que determinam se existe resistência considerável para suportar as tensões de cisalhamento que provocam as rupturas. A análise do coeficiente deve ser realizada durante o projeto de construção da pilha, pois será determinante para a estabilidade do talude. De acordo com a norma NBR 13029 (2017), deve-se adotar fatores de segurança mínimos para analisar a estabilidade das DCEs com as especificações demonstradas na Tabela 3.

Condição de Saturação	Especificações	Fator de Segurança
Condição de saturação normal (drenada)	Nível de água no contato da pilha/fundação	1,50
Condição de saturação crítica	Elevação do nível de água no maciço da pilha	1,30
Condição de saturação normal	Estabilidade dos taludes entre as bermas	1,50

Tabela 3 – Especificações de fatores de segurança mínimo em condições de saturação normal e crítica. Elaborado pela autora.

O fator de segurança considera as características de coesão, coeficiente de atrito, densidade do material e a geometria dos taludes e é estabelecido como a relação entre a resistência ao cisalhamento do material (S) e a tensão que age sobre ele (t), conforme a Equação 1:

$$FS = \frac{s}{t} \quad (1)$$

As rupturas iniciam quando as forças mobilizantes excedem interinamente as forças resistentes. As forças externas de um modo geral são relacionadas ao desmonte, eventos sísmicos, precipitação pluvial e pela pressão d'água subterrânea.

3 | MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia utilizada consiste em pesquisa de informações através de laudos geológicos realizados no local de estudo, licenças de operações, acompanhamento de desenvolvimento das DCEs R3, R4 e R5 através de imagens de satélite temporais, demonstrando a sequência evolutiva das pilhas, conforme Figura 9.

Para as avaliações de campo foi necessário o uso de câmera fotográfica, veículo aéreo não tripulado (*drone*), smartphone, fita métrica, régua, mapas, GPS (*Differential Global Positioning System*) e prancheta. O desenvolvimento consiste nas etapas de planejamento da área de voo, obtenção das imagens aéreas e processamento destas, gerando o modelo virtual de superfície utilizando fotogrametria através do software Agisoft MetaShape Pro®.

Para o cálculo do fator de segurança das superfícies, foi utilizado o software Hyrcan. O software é gratuito e permite analisar a estabilidade dos taludes em 2D.

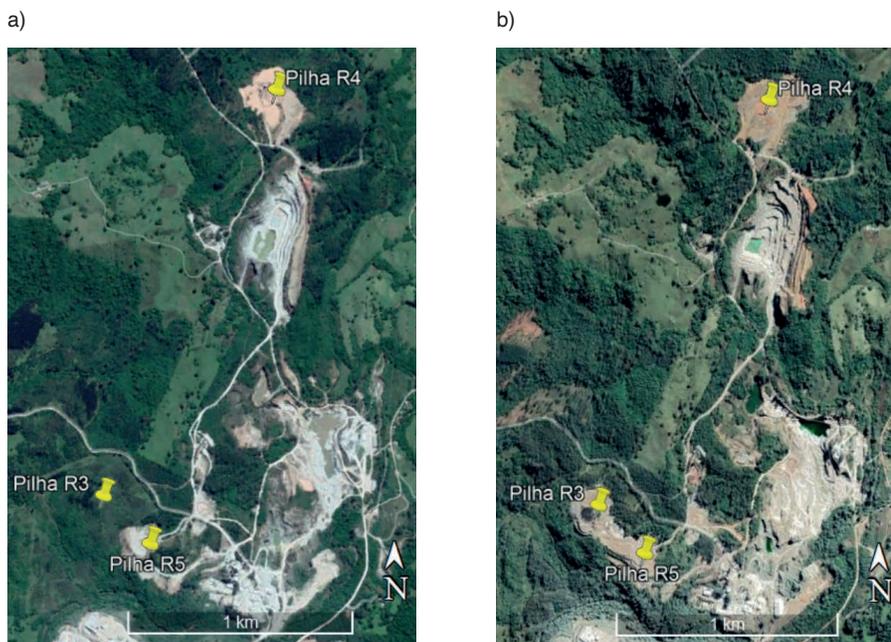


Figura 9 – Desenvolvimento das DCEs (bota-foras). (a) 2016, (b) 2021. Fonte: Modificado de GOOGLE EARTH (2021).

3.1 Pesquisa documental

Nesta etapa foi realizado um compilado histórico construtivo das DCEs, frequência e período de descarte de material nos bota foras da mineradora. As informações necessárias foram obtidas internamente na empresa através de visitas e consulta a materiais de pesquisas realizadas anteriormente.

3.2 Inspeção visual

Foram realizadas inspeções visuais de campo utilizando câmeras fotográfica e *drone* para o registro e identificação de possíveis áreas críticas nas DCEs. As imagens obtidas ajudaram a constatar e mensurar trincas e possíveis riscos de desabamento.

3.3 Classificação de estabilidade

Foi aplicado inicialmente o método semiquantitativo para classificação da estabilidade das pilhas, e verificação do FS por equilíbrio limite. A classificação e verificação do fator de segurança atualizado, permitirá tomadas de decisões para manutenção e melhorias na estabilidade dos bota-foras da mineradora.

3.4 Voos e processamento das imagens

A primeira ação realizada foi o planejamento das rotas de voo das áreas de interesse, a definição das coordenadas de localização e definição do ponto de decolagem e pouso foi realizada com o software *Copterus*[®] disponível para dispositivos móveis com sistema operacional iOS. A aquisição das imagens aéreas foi feita utilizando o drone, modelo *DJI Mavic Air 2*, equipado com câmera de resolução 24 megapixels.

Foi realizado um voo para a DCE R4 e um para as DCEs R3 e R5, essas estão localizadas adjuntas e as imagens analisadas e processadas foram realizadas concomitante. Os voos foram definidos com uma resolução espacial (*Ground Sample Distance – GSD*) de 1.9 cm/pixel, sobreposição lateral de 60%, sobreposição frontal de 80%, angulação da câmera de 90°, altura de voo de 50 m e finalizando com 370 e 434 imagens respectivamente em cada voo.

As imagens obtidas em campo foram importadas utilizando o software *Agisoft MetaShape Pro*[®], onde foi possível criar a sobreposição e nuvem de pontos para visualização do modelo 3D. Com a nuvem de pontos foi possível determinar a topografia do local das DCEs, a inclinação dos taludes e o volume de cada pilha.

4 | RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento das imagens e inspeção visual no local do estudo, as informações relevantes para classificar as DCEs de acordo com a probabilidade de instabilidade foram obtidas e apresentadas nas Tabelas 4 e 5.

Para as DCEs R3 e R5, a qualidade do material é alta, possuindo menos que 10% de finos. Para o cálculo da taxa de disposição, foi considerado o perímetro da área de 1.597m e o raio equivalente de 254m, com volume total de $1,87 \times 10^6$ m³. Comparando as imagens de avanço das pilhas pelo Google Earth, considerou-se que as DCEs têm aproximadamente 6 anos de atividade, pressupondo que a mineradora trabalhe 240 dias/ano, o total de dias trabalhados durante esse período é de 1.440. Desse modo, a taxa de avanço da crista com a disposição de material é de 0,35m/dia.

No que se refere a DCE R4, o volume da pilha foi considerado pequeno, devido a disposição de material acompanhar a safra da soja, sendo realizada em períodos sazonais. A qualidade do material é pobre, possuindo mais que 25% de finos, resultado da disposição de material de capeamento. O perímetro da área é de 1.265m e o raio equivalente de 201m, o volume total é de $0,44 \times 10^6$ m³. Considerando o período de atividade de 12 anos, o total de dias trabalhados é de 2.880, assim a taxa de avanço diário equivale a 0,14m/dia

Para ambos os casos, admitiu-se que não há grau de confinamento, já que o talude é convexo em planta ou seção. A resistência da fundação foi considerada intermediária, pois há ganho de resistência do solo com o adensamento do que é depositado. O método de construção foi avaliado como favorável a misto, obtendo 50 na pontuação, já que as

camadas não são muito espessas e possui métodos mistos de construção. As condições piezométricas e climáticas foram consideradas favoráveis, visto que é improvável o desenvolvimento de superfície freática no interior da pilha. A sismicidade foi considerada baixa, não havendo nenhuma zona de risco sísmico.

Com os resultados obtidos da pontuação de estabilidade das pilhas, as DCEs R3 e R5 somaram 450 pontos e a DCE R4 somou 650. Com esse total, foi possível identificar a classificação da estabilidade das pilhas quanto ao potencial de ruptura e nível recomendado para investigação e monitoramento.

Fatores		Faixa de condições obtidas nas DCE R3 e R5	Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	24,0 m	0
	Volume da Pilha	Médio: $1,87 \times 10^6$	50
	Inclinação do Talude	Moderado: $31,4^\circ$	50
Inclinação de Fundação		Suave	0
Grau de Confinamento		Sem Confinamento	100
Tipos de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do material da pilha		Alta	0
Método de construção		Favorável a Misto	50
Condições piezométricas e climáticas		Favorável	0
Taxa de Disposição		Moderada: 0,35 m/dia	100
Sismicidade		Baixa	0
Pontuação de Estabilidade das Pilhas R3 e R5: 450			

Tabela 4 – Tabela de resultados obtidos da pontuação de estabilidade das DCEs R3 e R5.

Fatores		Faixa de condições obtidas na DCE R4	Pontuação
Configuração da Pilha	Altura da Pilha	41,3 m	0
	Volume da Pilha	Pequeno: $0,44 \times 10^6$	0
	Inclinação do Talude	Íngreme: $37,3^\circ$	100
Inclinação de Fundação		Suave	0
Grau de Confinamento		Sem Confinamento	100
Tipos de Fundação		Intermediária	100
Qualidade do material da pilha		Pobre	200
Método de construção		Favorável a Misto	50
Condições piezométricas e climáticas		Favorável	0
Taxa de Disposição		Moderada: 0,14 m/dia	100
Sismicidade		Baixa	0
Pontuação de Estabilidade da Pilha R4: 650			

Tabela 5 – Tabela de resultados obtidos da pontuação de estabilidade da DCE R4.

As DCEs R3 e R5 se enquadraram na classe II, onde o potencial de ruptura é baixo, porém é necessário que o local seja monitorado visualmente e realizado análises básicas de estabilidade. A DCE R4 possui um potencial de ruptura moderado, sendo preciso realizar monitoramento um pouco mais detalhado, definindo se uma taxa limite de deposição de material e controle de drenagem superficial.

4.1 Verificação do fator de segurança

Para a verificação do potencial de estabilidade, foi empregado o método de equilíbrio limite definindo o fator de segurança das DCEs. Para isso, foi utilizado o software gratuito *Hyrscan*[®] para calcular o FS através do método Bishop simplificado, que analisa onde há potencial de ruptura circular, subdividindo as superfícies de análise em fatias verticais. As propriedades dos materiais foram consideradas segundo parâmetros de bibliografia, sendo definidos as propriedades para o material estéril depositado e as propriedades da base de fundação. Para o material estéril a coesão utilizada foi de 100 kPa e ângulo de atrito de 35°. Já para o material correspondente a fundação rochosa foi de 5000 kPa e ângulo de atrito de 35°. O peso específico do estéril foi definido em 22 kN/m³ e do material rochoso da fundação 26 kN/m³. O nível freático foi considerado no contato entre o material estéril e a fundação.

Para as DCEs R3 e R5 no sentido da direita para esquerda (Figura 11), o FS encontrado foi de 4,051 e a porção analisada foi dividida em 26 fatias. Nesse sentido a largura mais espessa da fatia tem 3,47m e a menor tem 1,29m.

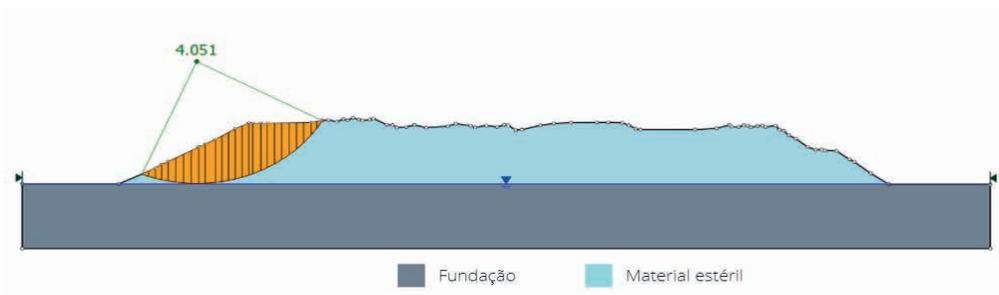


Figura 11 – Fator de segurança encontrado nas DCEs R3 e R5, no sentido direita para a esquerda.

No sentido inverso, o valor encontrado foi de 3,421, contendo o total de 28 fatias, sendo a mais espessa com 2,73m e com 0,84m a menos espessa, conforme a Figura 12.

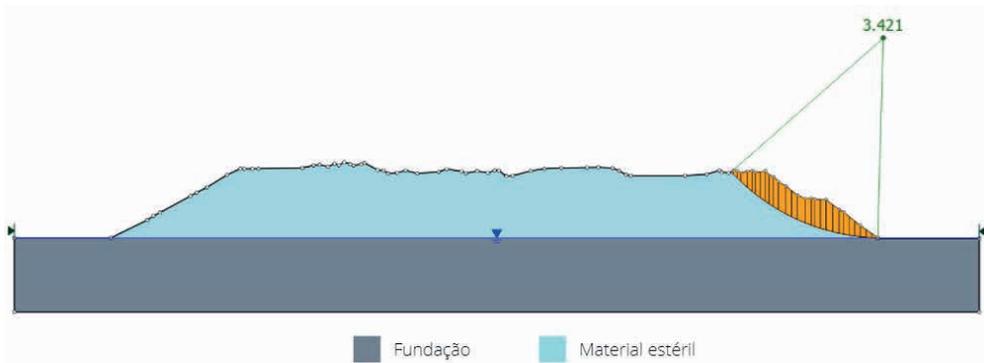


Figura 12 – Fator de segurança encontrado nas DCEs R3 e R5, no sentido esquerda para direita.

Para a DCE R4 no sentido direita para a esquerda, como demonstrado na Figura 13, o FS encontrado foi de 3,459 e a porção analisada de estabilidade foi dividida em 27 fatias. A porção mais espessa possui 6,79m e a menor tem 0,76m.

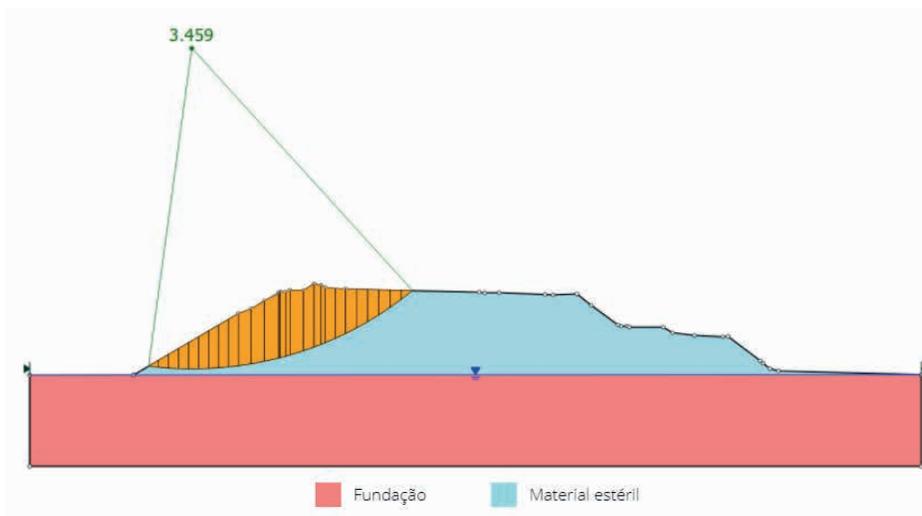


Figura 13 – Fator de segurança encontrado na DCE R4, no sentido direita para esquerda.

No sentido esquerda para direita da DCE R4, o FS encontrado foi de 5,320, a porção de estabilidade contém 33 fatias, a mais espessa tem 12,66m e a menor possui 1,13m, representado na Figura 14.

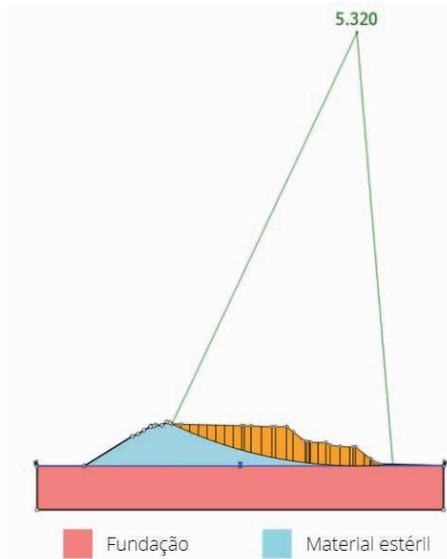


Figura 14 – Fator de segurança encontrado na DCE R4, no sentido esquerda para direita.

Os fatores de segurança calculados mostraram-se satisfatórios e sugerem grande estabilidade. Porém, ainda que a estabilidade dos taludes das DCEs esteja garantida, alguns pontos requerem atenção devido à drenagem, o que produz erosão superficial e pode desencadear um processo de desestabilização a longo prazo (Figura 15).

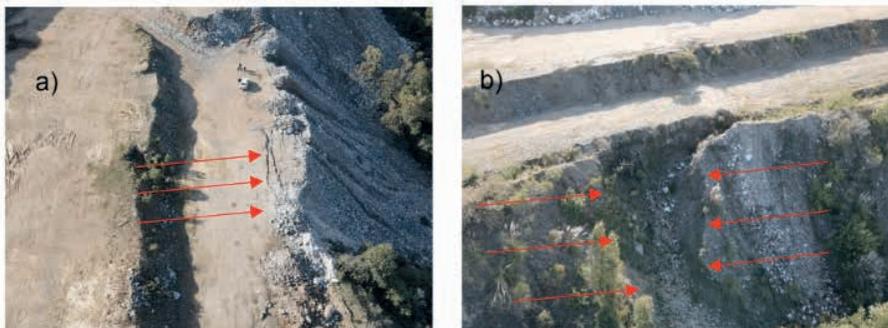


Figura 15 – Fotos áreas da DCE R4, (a) trincas observadas na crista do talude (b) erosões na face do talude da pilha devido a drenagem ineficiente.

5 I CONCLUSÕES

Após o estudo realizado, concluiu-se que a classificação semiquantitativa de estabilidade de DCEs é uma ferramenta útil na avaliação dos fatores que afetam a estabilidade. Porém, esse sistema não pode ser visto como uma análise completa de estabilidade. Os cálculos dos FSs devem ser realizados de forma complementar. Se sugere

ainda um monitoramento topográfico e visual de trincas e fendas de forma a identificar futuras modificações do estado atual. Quanto aos processos erosivos ocasionados pela pluviosidade, a construção de uma drenagem superficial, por meio de canaletas, seria eficiente para conduzir a água para um local apropriado onde se reduz a infiltração nos taludes.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Sistema de Informação Geográfica da Mineração – SIGMINE**.

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. 2008. 133 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

ARAGÃO, G. A. S.; OLIVEIRA FILHO, W. L. Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, n. 2, p. 193-198, abr-jun. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13029**: Elaboração de projetos para disposição de rejeitos e estéreis em mineração. 2017.

BC MINE. **Mined Rock and Overburden Piles**. Investigation and Desing Manual. Vancouver: Piteau Associates Engineering.,1991. 177 p.

COSTA, B. S. **Simulação de alternativas locais de depósito de estéril para uma mina de fosfato**. 2017. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

DIAS, R. A. **Laudo Geotécnico**: da cava atual e final unidade mineira Matriz Linhares. Caçapava do Sul, 2017. Relatório técnico realizado na Irmãos Cioccarri & cia LTDA. 67p.

DIAS, R. A. **Laudo Geotécnico**: da cava atual e final unidade mineira Fida.

DNPM: nº822.256/1969. Caçapava do Sul, 2018. Relatório técnico realizado na Irmãos Cioccarri & cia LTDA. 66p.

FERREIRA, F. A. B. **Pilha de estéril: dimensionamento e classificação**. 2016. 89 f. Monografia (Especialização) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

FORGEARINI, R. G.; OLIVEIRA NETO, R.; SOUZA, L. E.; ABICHEQUER, L. A.; GONÇALVES, I. G. Metodologia de avaliação ambiental na análise de alternativas locais de pilhas de estéril. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v.14, Ed. Especial Unipampa, p.80-97. 2015.

FREITAS, M. A. Apostila sobre formação de pilhas de estéril e rejeito. Belo Horizonte: Editora Ietec, 2004.

HAWLEY, M.; CUNNING, J. Introduction. In: Guidelines for Mine Waste Dump and Stockpile Desing. Austrália: CSIRO Publishing, 2017. Cap. 1, p 9.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de mapas do IBGE - Malhas territoriais / 2020.**

NUNES, D. R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia.** 2014. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco.** 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

ROBERTSON, A. M.; STEFFEN & KIRSTEN. **Mine waste disposal: An update on geotechnical and geohydrological aspects.** 1985. 24 f. Dissertação. Vancouver, Canadá, 1985.

SILVA, E. M. **Análise de estabilidade de taludes em solos de alteração de rochas metamórficas do quadrilátero ferrífero.** 2006. 143 f. Dissertação (Magister Scientiae) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006.

SILVA, R. C.; COSTA, D.P.; EHRLICH, M. Movimentação de rastejo e proposta de estabilização de um depósito de solo residual de filito. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA E DESENVOLVIMENTO URBANO, 19, 2018, Salvador. **Anais Eletrônicos...** Salvador: ABMS, 2018.

VICTORINO, H. S. Análise de deformação em pilhas de disposição de estéril (NWI, W E SIV) no complexo minerador de Carajás com uso de dados Stripmap do satélite Terrasar-X. 2016. 146 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, São Paulo, 2016.

WILDNER, W. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul, escala 1:750.000 / Wilson Wildner; Gilberto Emílio Ramgrab; Ricardo da Cunha Lopes; Carlos Moacyr Fontoura Iglesias – Porto Alegre: CPRM, 2008. 1 DVD.