



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

BRUNA STARLING COSTA

**SIMULAÇÃO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS DE DEPÓSITO
DE ESTÉRIL PARA UMA MINA DE FOSFATO**

ARAXÁ/MG

2017

BRUNA STARLING COSTA

**SIMULAÇÃO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS DE DEPÓSITO
DE ESTÉRIL PARA UMA MINA DE FOSFATO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Marcélio Prado
Fontes

ARAXÁ/MG

2017

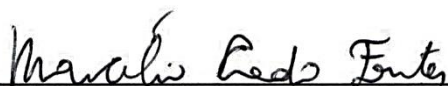
FOLHA DE APROVAÇÃO

BRUNA STARLING COSTA

SIMULAÇÃO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS DE DEPÓSITO DE ESTÉRIL PARA UMA MINA DE FOSFATO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 23 de junho de 2017



Presidente e Orientador: Prof. Me. Marcílio Prado Fontes
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –
Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –
Unidade Araxá



Membro Titular: Prof. Me. Guilherme Alzamora Mendonça
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG –
Unidade Araxá

Dedico este trabalho aos meus pais, que foram meu alicerce na realização deste sonho. A eles, a minha eterna gratidão pelo imenso apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido a oportunidade de chegar até aqui e por ter iluminado minha caminhada ao longo desses anos de estudos. Graças à vontade Dele, foi possível alcançar os meus objetivos e concretizar mais um sonho.

Agradeço também aos meus pais, Eliana e Francisco, pelo amor incondicional e pelo apoio que sempre me deram em todos os momentos. São eles meus maiores exemplos e a eles dedico a felicidade de concluir esta importante etapa de minha vida.

À minha irmã Fernanda, que de forma especial e carinhosa, me deu todo o incentivo para a realização deste curso. Obrigada por ser minha amiga e por sempre acreditar em minhas escolhas e projetos.

A meu namorado Willian, o melhor presente que a faculdade poderia ter me dado. Obrigada pelo carinho, cumplicidade e compreensão. Sou grata por me encorajar nos momentos de dificuldades e desânimo e por ser uma brisa em meio a tantas tensões.

Agradeço ao meu orientador Marcélio, pelos conhecimentos transmitidos e por me auxiliar na escolha do tema do TCC. Quero expressar a minha gratidão pelas ideias compartilhadas e pela paciência em me ensinar e me conduzir na realização deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Obrigada pela amizade demonstrada e pela imensa bagagem fornecida de conhecimentos e experiências.

“Descobri como é bom chegar quando se tem paciência. E para se chegar, onde quer que seja, aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão. É preciso, antes de mais nada, querer.”

(Amyr Klink)

RESUMO

A atividade de mineração a céu aberto envolve a retirada de um grande volume de estéril, o qual constitui material não aproveitável economicamente na atualidade, sendo estocado, geralmente sob a forma de pilhas. Dessa forma, é necessário que se estabeleça uma área adequada para a disposição deste material e, para isso, devem ser realizados estudos que visem a viabilidade técnica e econômica para o processo produtivo ser mais efetivo. No entanto, algumas variáveis são importantes tais como, o volume de estéril retirado no decorrer da operação de lavra, a capacidade de armazenamento da possível área para a disposição e a distância média de transporte. Neste trabalho, foi feita a simulação de três depósitos de estéreis para uma mina de fosfato. Tal simulação foi realizada através do *software DataMine Studio OP* e foram feitas estimativas de seus respectivos volumes e das distâncias médias de transporte. Assim, determinou-se as alternativas locais que apresentam maior viabilidade para a disposição do material sob o ponto de vista econômico e ambiental em concomitância com os objetivos do planejamento de lava.

Palavras-Chave: Depósito de estéril. Distância média de transporte. Capacidade de armazenamento. Alternativas locais.

ABSTRACT

The opencast mining activity involves the removal of a large volume of mine waste material, which is a material not usable economically at the present time, being stored, usually in the form of piles. Thus, it is necessary to establish a suitable area for the disposal of this material and, to this end, should be carried out studies that aim the feasibility technical and economical for the production process be more effective. However, some variables are important such as the volume of mine waste material withdrawn during the mining operation, the storage capacity of the possible area for disposal of material and the average distance of transportation. In this work, were made three mine waste piles simulation for a phosphate mine. This simulation was carried out through the software *DataMine Studio OP* and were made estimatives of their respective volumes and average distances of transport. So, were set the locational alternatives, which feature the greater feasibility for the disposal of material under the economic and environmental point of view concomitantly with the goals of mining planning.

Keywords: Mine waste pile. Average distance of transport. Storage capacity. Locational alternatives.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplo de localização de pilha de estéril próxima à cava.	17
Figura 2: Parâmetros geométricos de uma pilha de estéril.	23
Figura 3: Drenagem de fundo em uma pilha de estéril.....	25
Figura 4: Tapete drenante e disposição do estéril acima do mesmo.	26
Figura 5: Representação dos drenos.	26
Figura 6: Exemplo de sistema de drenagem superficial - descidas d'água.	28
Figura 7: Tipos de sistemas de drenagem.	29
Figura 8: Exemplo de ruptura em pilha de estéril.	30
Figura 9: Modos de ruptura em pilhas de estéril.	31
Figura 10: Representação do método de disposição descendente.	34
Figura 11: Representação do método ascendente de disposição do estéril. ...	35
Figura 12: Etapa de retaludamento com trator de esteira.	36
Figura 13: Método de disposição de estéril por correia.	37
Figura 14: Configurações de pilhas de estéril.	38
Figura 15: Etapas da metodologia adotada.....	41
Figura 16: Pilha de estéril 1 inserida na topografia local.	42
Figura 17: Pilha de estéril 2 inserida na topografia local.	43
Figura 18: Pilha de estéril 3 inserida na topografia local.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Volume (m ³) e DMT (Km) dos depósitos de estéril projetados.	44
Tabela 2: Custo de transporte do estéril por m ³ em função da DMT.	44
Tabela 3: Custo total com o transporte de estéril.	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. JUSTIFICATIVA.....	13
1.2. OBJETIVOS.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. ASPECTOS GERAIS DAS PILHAS DE ESTÉRIL.....	14
2.1.1. Planejamento.....	15
2.1.2. Estudos de alternativas locacionais de pilhas de estéril.....	17
2.1.3. Investigação geotécnica.....	19
2.1.4. Hidrologia e hidrogeologia da área.....	21
2.2. PROJETO EXECUTIVO DE DEPÓSITO DE ESTÉRIL.....	22
2.2.1. Geometria.....	22
2.2.2. Sistemas de drenagem interna.....	24
2.2.3. Sistemas de drenagem superficial.....	26
2.2.4. Análise da Estabilidade de Pilha de Estéril.....	29
2.2.5. Monitoramento de Pilhas de Estéril.....	32
2.3. METODOLOGIAS PARA DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL.....	33
2.3.1. Método Descendente.....	34
2.3.2. Método Ascendente.....	35
2.3.3. Método de disposição por correia.....	36
2.4. CONFIGURAÇÃO DAS PILHAS DE ESTÉRIL.....	37
2.5. OPERAÇÃO DAS PILHAS DE ESTÉRIL.....	39
3. METODOLOGIA	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5. CONCLUSÃO	47
6. REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

A mineração constitui uma atividade de fundamental importância, uma vez que permite extrair os recursos minerais em subsolo, os quais são essenciais para a sobrevivência da humanidade. Geralmente, as atividades mineiras são divididas em cinco fases, cujas execuções estão inter-relacionadas. São elas: prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e fechamento da mina. Dentro das fases de desenvolvimento e lavra as três principais etapas são: as operações de lavra, os processos de beneficiamento do minério e os sistemas de disposição dos resíduos gerados nas etapas anteriores.

Com o crescente desenvolvimento da tecnologia, há uma maior demanda por metais e outros insumos provenientes do minério. Como consequência, os empreendimentos mineiros buscam ampliar a sua escala de produção para atender às necessidades do mercado. No entanto, com a exaustão das jazidas mais aflorantes, a tendência é que as operações mineiras fiquem cada vez mais profundas, demandando a retirada de grandes volumes de estéril nos métodos de lavra a céu aberto. Desta forma, são movimentados volumes cada vez maiores de minério anualmente para manter o custo de lavra o mais baixo possível. A remoção do estéril faz-se necessária para expor o corpo de minério e facilitar a extração do mesmo.

O estéril representa o material resultante do decapeamento, incluindo o solo nas partes superiores do perfil estratigráfico, sendo composto por partículas de rochas e de solo com diferentes granulometrias, contendo também ar, água e matéria orgânica. Tal material não possui valor econômico agregado, porém, necessita ser transportado e estocado. A disposição do estéril é comumente feita sob a forma de pilhas e a construção destas estruturas corresponde a uma parcela significativa nos custos de uma empresa de mineração (Petronilho, 2010).

A variedade de tamanhos das partículas que constituem o estéril dificulta o projeto de construção de depósitos para a disposição deste material (Carvalho, 2009). As pilhas de estéril constituem assim, uma estrutura complexa e

heterogênea e, devido ao grande volume de material retirado na mina, requerem áreas progressivamente maiores para a sua construção.

Estas estruturas podem sofrer de pequenos a grandes colapsos se submetidas a abalos por tremores de terra, se o sistema de drenagem for insuficiente ou se ocorre a má compactação do material que as constitui. Deste modo, os estudos geotécnicos, assim como os estudos hidrológicos e hidrogeológicos das pilhas de estéril são extremamente importantes, pois problemas relacionados à saturação do maciço, devido à inexistência de sistemas de drenagem adequados, e às características de resistência do material de fundação e do estéril, podem gerar grandes deformações. Estas deformações, por sua vez, podem aumentar o custo relativo à manutenção do depósito, além de causar grande impacto ambiental (Saliba, 2007).

Em suma, é imprescindível que sejam realizados um bom planejamento e um estudo minucioso dos fatores que condicionam o projeto de construção de um depósito de estéril, para assim, garantir a segurança do mesmo, além de promover maior economicidade ao empreendimento.

1.1. JUSTIFICATIVA

O aumento da demanda por minerais viabiliza minérios cada vez mais profundos, o que acarreta a retirada de grandes volumes de estéril em minas a céu aberto. Assim, é necessário que se estabeleça uma área adequada para a disposição deste material e, para isso, torna-se essencial considerar diversos fatores para sua locação, tais como a geotecnia, geologia, aspectos hidrológicos e hidrogeológicos. Da mesma forma, os impactos ambientais devem ser estudados, porém não somente durante as fases de projeto e execução, pois as consequências da implantação de uma pilha de estéril devem ser avaliadas para um longo período de tempo.

É importante que sejam considerados também, parâmetros como: o volume planejado de retirada de estéril, a distância requerida para o transporte do material da frente de lavra até a pilha de estéril e a capacidade da área

selecionada para o armazenamento. Estes parâmetros devem ser tais que garantam a estabilidade econômica do empreendimento.

Portanto, é fundamental que seja feita a análise da influência dos fatores citados na seleção da área para a construção do depósito de estéril. Isto posto, o local selecionado deve ser aquele que melhor se adeque aos objetivos do planejamento de lavra e aos requisitos ambientais exigidos.

1.2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em dimensionar o depósito de estéril para uma mina de fosfato - localizada na região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais – através da utilização do *software DataMine Studio OP*. O objetivo específico reside em simular os possíveis locais para a construção da pilha de estéril para a mina em estudo e, a partir da análise dos fatores custo de operação e volume, pretende-se definir o melhor local para a disposição do material, levando em consideração também a exequibilidade econômica do empreendimento.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. ASPECTOS GERAIS DAS PILHAS DE ESTÉRIL

No Brasil, o projeto de construção de uma pilha de estéril deve ser feito de modo a cumprir as regras estabelecidas pela norma brasileira regulamentadora NBR 13029 e pela norma reguladora de mineração NRM 19 e deve ser tão detalhado quanto o projeto de lavra.

A construção de um depósito de estéril gera um grande impacto ambiental na área onde é disposto e representa um projeto de alto custo. Assim, os fatores financeiros e ambientais devem ser cuidadosamente analisados para que a pilha seja construída dentro das condições mais adequadas, ou seja, sua operacionalidade deve ser planejada de forma a minimizar os custos e os possíveis impactos (Petronilho, 2010).

Portanto, é necessário que se estabeleça uma área adequada para a disposição deste material e, para isso, devem ser realizados estudos que visem a viabilidade técnica e econômica para o processo produtivo ser mais efetivo.

Algumas variáveis são importantes na elaboração de um projeto de uma pilha de estéril, tais como: volume de estéril retirado no decorrer da operação de lavra, o local para construção do depósito, capacidade de armazenamento da possível área para disposição, distâncias de transporte, condições de acesso, características da área (relevo, fundação, topografia, etc.), condições hídricas locais e os impactos que podem ser gerados (Petronilho, 2010).

2.1.1. Planejamento

O planejamento do projeto de uma pilha de estéril consiste em uma série de estudos que são realizados nas seguintes fases: exploração, pré-viabilidade, viabilidade e projeto preliminar.

A fase de exploração de uma mina contempla, entre outras atividades, a etapa em que as informações necessárias para o planejamento de um depósito de estéril são coletadas. Na fase de pré-viabilidade, são levantadas todas as informações a respeito dos possíveis locais para a disposição do material, tais como, geologia, topografia, hidrologia, clima e vegetação e são também, determinados os dados de quantidade, origem, tipo de material e os métodos para disposição do estéril (Welsh, 1985 *apud* Aragão, 2008).

Segundo Aragão (2008), é necessário o conhecimento prévio dos possíveis locais para a construção da pilha de estéril para verificar se esses são destinados a parques, se constituem uma reserva ecológica ou se são nascentes de uma bacia hidrográfica. A identificação dessas áreas é feita devido ao fato de que as mesmas necessitam da liberação de órgãos técnicos competentes para serem ocupadas.

Deve ser considerada também, a importância de se fazer uma classificação dos possíveis impactos ambientais causados pelo depósito de estéril, dos quais pode-se citar o desmatamento, a modificação física e estética

do meio ambiente, a poluição das águas superficiais e subterrâneas, a evasão forçada de animais existentes na área, entre outros. Essa classificação pode ser feita na etapa de pré-viabilidade e possui como função possibilitar a comparação entre as possíveis áreas para disposição do estéril, permitindo analisar assim, o potencial de instabilidade; o nível de esforço recomendado para investigação, projeto e construção e o tipo de monitoramento mais adequado.

Após as etapas anteriormente descritas, segue-se para a etapa de viabilidade, na qual são realizados estudos acerca das condições do local e de sua exequibilidade, e são determinadas também as características do material de fundação (como a resistência ao cisalhamento, durabilidade, composição química, etc.), bem como as características dos materiais que irão compor a pilha, para verificar o comportamento geotécnico dos mesmos sob empilhamento.

A última etapa do planejamento de um depósito de estéril compreende a elaboração do projeto preliminar, o qual deve conter informações detalhadas dos planos preliminares, avaliação dos parâmetros ambientais, os possíveis impactos e as medidas mitigatórias para minimizá-los, e os critérios do projeto para que este possa ser avaliado pelos órgãos competentes (Aragão, 2008).

Uma vez finalizado o projeto, o mesmo deve ser encaminhado ao órgão ambiental para concessão da licença e caso não esteja de acordo com as regulamentações especificadas, a licença não é concedida e o projeto deve passar por uma nova análise.

Após serem cumpridas todas as etapas do planejamento, inicia-se o processo de desenvolvimento do projeto executivo, no qual serão determinadas todas as características da pilha, como a sua geometria, o dimensionamento da fundação e dos sistemas de drenagem interna e superficial e a proteção das bermas.

Um fator a ser considerado em todas as etapas do projeto e que deve ser assegurado em todas as fases de uma pilha, é a sua estabilidade. Assim, faz-se necessário analisar os tipos de ruptura em pilha sob diversas condições hidrogeológicas para verificar a condição de estabilidade desta estrutura.

2.1.2. Estudos de alternativas locacionais de pilhas de estéril

A escolha da área para o alteamento do depósito de estéril deve respeitar os requisitos definidos pelo planejamento de lavra e as determinações contidas no plano de manejo de estéril, o qual define a viabilidade de construção em termos econômicos, técnicos e ambientais, definindo também o custo com o transporte do material (Teixeira, 2011).

Conforme as definições da norma NBR 13029 (1993) - elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e que trata sobre o projeto de disposição de estéril em pilha - o material deve ser disposto dentro da cava da mina ou o mais próximo possível da mesma (figura 1), de preferência em áreas já degradadas e dentro dos limites do empreendimento.



Figura 1: Exemplo de localização de pilha de estéril próxima à cava.

Fonte: Adaptado de Fontes *et al.*, 2014.

Um dos fatores de maior relevância na escolha da área para a construção da pilha de estéril é a distância requerida para o transporte do material das frentes de lavra até o local do empilhamento; esta distância é chamada de

distância média de transporte (DMT) e influencia diretamente nos custos de movimentação do estéril.

Por conseguinte, e segundo Teixeira (2011), dentre os possíveis locais para disposição do estéril, aquele que apresentar a menor distância de transporte será, em geral, priorizado na escolha, pois implica em menores gastos com o transporte do material.

Entretanto, apenas um parâmetro não é suficiente para se chegar a uma conclusão sobre o melhor local para a disposição do estéril. A escolha baseia-se na análise conjunta de dados de inspeção de campo, levantamentos topográficos e outros dados técnicos que se fizerem necessários.

Em tempos remotos, a escolha do melhor local para a construção de uma pilha de estéril considerava somente a alternativa de menor custo, sendo assim, um procedimento relativamente simples. No entanto, nos dias atuais, os estudos de alternativas locacionais de um depósito de estéril analisam, além da questão econômica, os aspectos ambientais, visando a diminuição dos possíveis impactos decorrentes desta atividade.

Desta forma, tais estudos têm se tornado cada vez mais complexos, pois inúmeros fatores devem ser avaliados, muitos dos quais, podem limitar ou até mesmo eliminar a viabilidade de muitas alternativas locacionais (Krause e Dwire, 1999 *apud* Pires, 2015).

Como exposto por Pires (2015), os fatores que devem ser considerados na seleção do local para construção de um depósito de estéril são:

- Topografia do local, a qual influencia na capacidade e na área da pilha, assim como na distância de transporte;
- Hidrologia e condições climáticas, tais como: precipitação, velocidade e direção do vento, regime hidrológico, drenagem ácida, escoamento superficial;
- Hidrogeologia, relacionada à qualidade da água subterrânea e ao lençol freático;

- Geologia e Geotecnia, como condição da fundação, porosidade, infiltração, resistência do material a ser disposto e ângulo de repouso do mesmo, sísmica e falhas ativas;
- Aspectos técnicos, os quais estão relacionados ao método de lavra, limite de cava, sistema de transporte e volume de estéril;
- Aspectos ambientais, como os efeitos da infiltração de águas superficiais e subterrâneas, impactos que podem ser gerados na área;
- Aspectos econômicos, referentes ao custo de capital e operacional, custo de fechamento e riscos econômicos.

De acordo com Petronilho (2010), a escolha do local para disposição é restringida dado algumas condições, como por exemplo: I) Áreas afastadas ou localizadas em cotas muito elevadas em comparação com as frentes de lavra; II) Inserção da pilha em amplas bacias de drenagem; III) Fundação composta por solos de baixa resistência, condição que demanda a remoção de grandes volumes de materiais ou a adoção de taludes muito suavizados, reduzindo assim, a capacidade de armazenamento da pilha; IV) Ocupação de espaços passíveis de proteção ambiental ou cultural (solos férteis, matas nativas, ecossistemas, etc.); V) Áreas externas ao domínio do empreendimento, o que aumenta os custos de desapropriações e com licenciamentos específicos.

Portanto, a escolha do local deve se basear na alternativa que promova um melhor equilíbrio entre todos os fatores citados. Assim, vale ressaltar que a área escolhida deve ser tal que, atenda aos objetivos técnicos e econômicos do empreendimento, bem como às regulamentações ambientais, mas também, onde os impactos causados pela disposição do estéril sejam mínimos.

2.1.3. Investigação geotécnica

Com o objetivo de enriquecer as informações coletadas na fase de planejamento, é feito um levantamento geológico-geotécnico da área escolhida para a disposição do estéril. Tal levantamento é executado tendo em vista

caracterizar as feições presentes, como afloramentos, presença de matacões, nascentes, entre outras (Petronilho, 2010).

São executadas assim, uma série de campanhas de sondagens e, a partir das amostras coletadas e de suas respectivas análises, pode-se determinar a resistência e a condutividade hidráulica do material que constituirá a fundação da pilha. De acordo com Pereira (2009), a condutividade hidráulica representa a capacidade que o material possui de permitir a percolação de água através dele e corresponde a um fator crítico, uma vez que pode ser responsável por graves problemas relacionados à estabilidade de um depósito de estéril.

Além de ser possível determinar as propriedades do material, as sondagens permitem também, inferir o nível de água (NA) na área destinada à disposição do estéril. Este parâmetro é de grande significância pelo fato de também exercer influência sobre as condições de segurança de uma pilha, pois a água no interior da estrutura pode provocar a saturação do maciço e reduzir, desta forma, os parâmetros de resistência do depósito de estéril, ficando este mais susceptível a rupturas.

Com os resultados obtidos a partir das análises das amostras, pode-se obter todo o perfil geológico-geotécnico do local escolhido para a disposição do estéril, sendo possível compará-lo com o perfil geológico-geotécnico regional.

É importante salientar que, torna-se imprescindível também, a realização de análises das características do material que irá compor a pilha; no caso, o material resultante do decapeamento da jazida. Devido ao fato deste material ser constituído por partículas heterogêneas, ou seja, de diferentes granulometrias, pode haver uma interferência negativa na sustentação da pilha. Isso justifica a necessidade de se fazer amostragens do estéril antes de sua remoção na jazida, tornando possível a determinação dos parâmetros físicos, da permeabilidade e da resistência do mesmo. As amostras devem, portanto, ser representativas da composição final do material do empilhamento.

Cabe mencionar que, as condições climáticas também podem influenciar na segurança de um depósito de estéril, uma vez que, a ação do intemperismo pode diminuir a resistência do material ao longo do tempo, podendo causar

assim, erosões e, conseqüentemente, tornar a pilha uma estrutura bastante instável.

Dado a sua importância, a investigação geológica-geotécnica do material que irá compor a pilha, deve ser realizada periodicamente no decorrer da construção do depósito de estéril, pois, “os efeitos resultantes dos processos de mistura e segregação decorrentes das operações de desmonte e de escavação dos solos e rochas pré-existentis tendem a mascarar completamente a natureza dos materiais originais” (Petronilho, 2010, p. 12).

De posse dos resultados obtidos nas análises, são definidas as condições consideradas mais preocupantes, as quais podem inviabilizar o projeto de construção da pilha de estéril, e também, as condições mais apropriadas, visando garantir assim, a adequabilidade do projeto.

2.1.4. Hidrologia e hidrogeologia da área

Além da investigação geotécnica dos materiais de fundação e dos materiais que irão compor a pilha, estudos hidrológicos e hidrogeológicos são necessários para se determinar as vazões afluentes e efluentes, tomando como embasamento, as propriedades da bacia hidrográfica, as quais podem ser obtidas a partir de mapas topográficos, bem como a intensidade das precipitações na região. Estes estudos são cruciais para o correto dimensionamento dos dispositivos de drenagem, tanto interna quanto superficial (Petronilho, 2010).

O estudo acerca desses fatores é indispensável, pois, uma vez que ocorre a elevação do nível de água interno a uma pilha de estéril, a segurança da estrutura fica seriamente comprometida, visto que a presença de água em seu interior diminui o fator de segurança necessário para garantir a sua estabilidade (Orman *et al.*, 2011).

2.2. PROJETO EXECUTIVO DE DEPÓSITO DE ESTÉRIL

Após serem executadas todas as etapas de planejamento, é elaborado o projeto executivo, o qual conterà informações detalhadas acerca do dimensionamento final da pilha de estéril e de sua construção. Assim, estão presentes neste relatório, análises relacionadas à geometria, visando a otimização da capacidade da área; ao dimensionamento dos sistemas de drenagem; à sua estabilidade e monitoramento (Gomes, 2004 *apud* Petronilho, 2010).

2.2.1. Geometria

De acordo com a NBR 13029 (1993), alguns parâmetros são essenciais quanto à geometria interna e externa do depósito de estéril. Segundo esta norma, os seguintes critérios devem ser respeitados:

- A altura dos bancos deve ser, no máximo, de 10 metros;
- A largura mínima de bermas deve ser de 6 metros,
- A altura máxima da pilha de 200 metros;
- Devem existir acessos para manutenção;
- O ângulo entre os bancos deve ser inferior ao ângulo de repouso natural do estéril;
- As bermas devem possuir declividade longitudinal e transversal de no mínimo, 1% e 5%, respectivamente;
- Devem ser implantadas leiras na crista dos bancos.

A definição da geometria da pilha de estéril leva em consideração os estudos geológico-geotécnicos da área e também, do material a ser depositado; os estudos hidrológicos e hidrogeológicos e as exigências por parte dos órgãos ambientais. A geometria do depósito deve ser tal que assegure a maior capacidade de armazenamento possível.

Segundo Pulino (2010), a geometria do depósito de estéril deve ser projetada conforme a topografia do local de construção e consoante às

características geotécnicas do material que irá compor a pilha. A figura 2 mostra uma seção típica de uma pilha de estéril.

A atual versão da norma NBR 13029, de 2006, não especifica a altura máxima da pilha; apenas afirma que o fator de segurança mínimo permitido (tanto o global da pilha quanto o individual para cada bancada) deve ser de 1,5 sendo este o fator determinante da altura máxima do depósito (Carvalho, 2009).

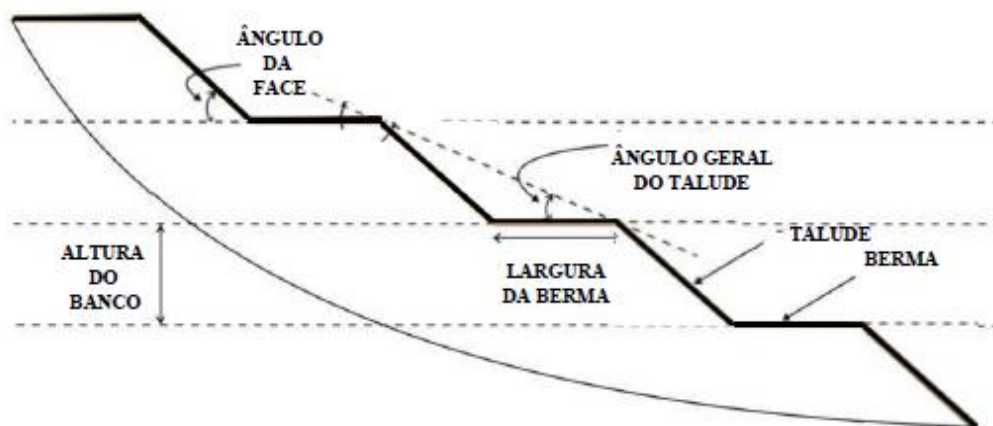


Figura 2: Parâmetros geométricos de uma pilha de estéril.

Fonte: Teixeira, 2011.

Com relação ao coeficiente ou fator de segurança (FS), este deve ser devidamente analisado em um projeto de construção de uma pilha de estéril, pois é o que determina a estabilidade dos taludes do depósito. Este fator é definido como a relação entre a resistência ao cisalhamento do material (S) e a tensão atuante sobre o mesmo (τ), como mostra a equação 1:

$$FS = \frac{S}{\tau} \quad (\text{Equação 1})$$

Logo, o coeficiente de segurança indica a capacidade do material da pilha de resistir aos esforços atuantes sobre ele, os quais podem causar deslocamentos de massa e colapsos da estrutura.

Os fatores de segurança determinísticos e suas respectivas condições de estabilidade de taludes, são, conforme Junior (2005):

- $FS < 1$: Talude instável, ocorrendo ruptura.
- $FS = 1$: Condição limite de estabilidade, associada à iminência de ruptura.
- FS pouco maior do que 1: Condição estável. Porém, quanto mais próximo de 1, mais precária e frágil será a condição de estabilidade de um talude.
- FS muito maior do que 1: Condição estável. Quanto maior o fator de segurança, maior a estabilidade do talude e menores são as possibilidades de este vir a sofrer ruptura.

A determinação do fator de segurança no projeto de construção de um depósito de estéril deve levar em consideração as consequências potenciais de uma eventual ruptura dos taludes, assim como a dimensão dos mesmos, a heterogeneidade do maciço, dentre outros fatores (Junior, 2005).

Para a construção de uma pilha de estéril, considera-se o fator de segurança sempre de 1,5, para garantir assim, a maior estabilidade do depósito.

2.2.2. Sistemas de drenagem interna

As condições de drenagem em um depósito de estéril dependem das características do material que o compõe, do meio físico local e do fluido percolante (Petronilho, 2010).

Neste âmbito, a condutividade hidráulica da pilha de estéril é um parâmetro que merece especial atenção, pois se esta condutividade é alta, significa que há muitos espaços vazios entre as partículas do material que compõe o depósito e isso pode comprometer a sua segurança. Assim, é de extrema importância adotar um sistema de drenagem eficiente.

Ainda que o material que integra a estrutura seja bastante compactado e firme, sempre haverá percolação de água por entre suas partículas. Isto posto, torna-se imprescindível o conhecimento acerca da vazão do fluxo de água, tal como o caminho preferencial de escoamento.

Desta forma, os sistemas de drenagem interna são fundamentais para garantir a estabilidade dos depósitos de estéril, uma vez que permitem aliviar os níveis de poropressão, direcionar o fluxo de água e evitar o carreamento de materiais finos, o que pode provocar problemas de *piping*, ou seja, erosão interna na pilha (Azevedo, 2005).

Os dispositivos de drenagem interna possuem como função drenar a água no interior da pilha de estéril, ou seja, seu objetivo é canalizar os cursos d'água e nascentes existentes no local, evitando assim, o acúmulo de fluido na estrutura e como consequência, auxiliando na preservação de sua estabilidade geotécnica.

Podem então, ser instalados diferentes tipos de drenagem interna no depósito de estéril, sendo que os mais comuns são os drenos de fundo, os quais são constituídos por blocos de rocha com granulometria adequada que atenda a vazão necessária dos afloramentos do lençol freático (figura 3), sendo necessário também o uso de manta geotêxtil (Bidim) para evitar a colmatagem da drenagem (figura 4).



Figura 3: Drenagem de fundo em uma pilha de estéril.

Fonte: Adaptado de Fontes, 2015.



Figura 4: Tapete drenante e disposição do estéril acima do mesmo.

Fonte: Adaptado de Fontes, 2015.

De acordo com Carvalho (2009), os drenos assumem a forma de uma espinha de peixe (figura 5) e é conveniente que os mesmos sejam direcionados até o enrocamento de pé, com a finalidade de evitar erosões.

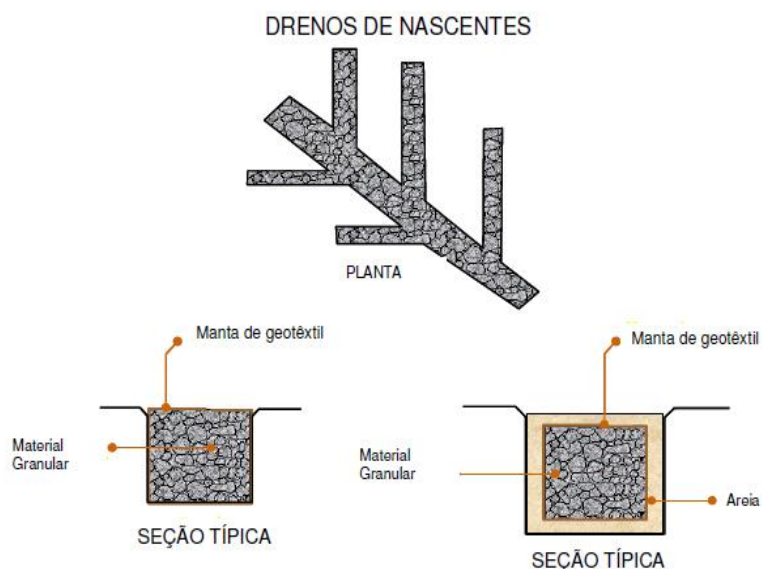


Figura 5: Representação dos drenos.

Fonte: Carvalho, 2009.

2.2.3. Sistemas de drenagem superficial

Os dispositivos de drenagem externa ou superficial são instalados na pilha de estéril com a finalidade de captar as águas incidentes sobre a mesma - provenientes de precipitações ou de outras áreas adjacentes - e impedir, desta

maneira, o acúmulo de água sobre a sua superfície e a infiltração. Tais dispositivos captam a água e a direcionam para fora do depósito, de forma que não haja comprometimento da estrutura. Os mais comuns são as canaletas, descidas d'água e dissipadores de energia.

A ausência desses sistemas acarreta sérias consequências na segurança da pilha, uma vez que, a água infiltrada pode provocar erosão superficial nos taludes e até mesmo o desmoronamento da estrutura. Devido a isso, deve ser feito o correto dimensionamento dos sistemas de drenagem superficial, sendo necessário considerar alguns requisitos básicos, como por exemplo, o caimento transversal e longitudinal das bermas que proporcione a maior eficiência desses sistemas.

Neste âmbito, comumente as bermas são construídas com caimento de 1% na direção longitudinal para evitar as erosões e, para evitar que a água caia pelas faces dos taludes, é dado um caimento transversal de 3 a 5% em direção ao pé da bancada superior.

Segundo Carvalho (2009): “A garantia para a eficiência do sistema de drenagem superficial é a criação de canaletas nas praças que dirijam as águas para os pontos de descida”.

Podem ser construídas também, leiras trapezoidais na crista e ao longo dos bancos do depósito de estéril, de forma a preservar os taludes e, além disso, podem ser instalados canais periféricos, cuja função é captar e conduzir as águas pluviais que incidem sobre a crista da pilha (Petronilho, 2010).

As águas provenientes das canaletas são então, direcionadas às descidas d'água (figura 6), constituídas por canais em degraus. Estes dispositivos são construídos no entorno da pilha ao longo do contato desta com o terreno natural e são dotados de dissipadores de energia, os quais representam estruturas responsáveis por diminuir a velocidade do fluxo e controlar a erosão.



Figura 6: Exemplo de sistema de drenagem superficial - descidas d'água.

Fonte: Petronilho, 2010.

Por fim, os canais periféricos captam as águas oriundas das descidas d'água e lança-as na drenagem natural, visando o menor impacto possível. Esse tipo de drenagem é denominado drenagem periférica (Carvalho, 2009). A figura 7 mostra os tipos de sistemas de drenagem.

Vale considerar também, que as pilhas de estéril devem possuir pontos providos de sistemas de contenção de finos ou diques de contenção de finos, responsáveis por reter as partículas sólidas que são carregadas juntamente com a água, de modo que esta chegue limpa aos cursos d'água naturais.

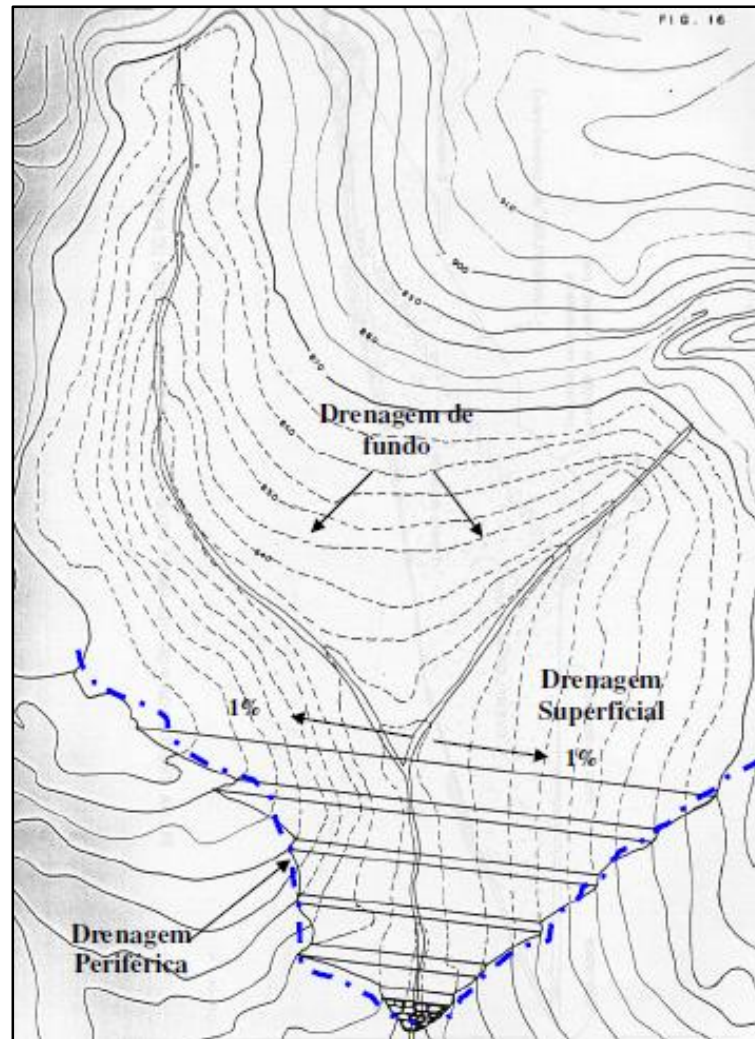


Figura 7: Tipos de sistemas de drenagem.

Fonte: Carvalho, 2009.

2.2.4. Análise da Estabilidade de Pilha de Estéril

A instabilidade de taludes e a possibilidade de ruptura em uma pilha de estéril representam fatores críticos que devem ser cuidadosamente analisados, de forma a garantir a segurança do depósito e das áreas adjacentes, as quais podem ser profundamente afetadas quando da ocorrência de movimentos de massa ao longo da estrutura.

À medida que aumenta a taxa de disposição de estéril e a pilha se torna maior, aumenta a possibilidade de rupturas, devido ao aumento das tensões ali

impostas (Kent, 1992). Quando essas tensões superam a resistência do material constituinte da pilha, inicia-se o processo de ruptura no maciço.

Assim, são necessárias análises constantes da estabilidade do depósito, pois uma eventual ruptura pode causar, além de grande impacto ambiental, a interrupção das operações de mina, prejudicando desse modo, todo o planejamento econômico do empreendimento, além da possibilidade de perdas de vidas humanas. A figura 8 mostra um exemplo de ruptura de pilha de estéril de grande porte.



Figura 8: Exemplo de ruptura em pilha de estéril.

Fonte: Petronilho, 2010.

De acordo com Caldwell *et al.* (1985), durante a atividade de mineração, uma pilha de estéril não é completamente estável. Em virtude disso, o monitoramento da estabilidade da estrutura é realizado para que seja possível adotar medidas mitigatórias para evitar as consequências indesejáveis de uma potencial ruptura.

Segundo Kent (1992), a escolha do método de análise de estabilidade de um depósito de estéril deve considerar os possíveis modos de ruptura, além dos parâmetros relacionados à resistência do material e às poropressões exercidas

pela água no interior da pilha. O principal objetivo dessa análise é a determinação da possibilidade de mobilização de massa ao longo dos taludes.

Diversos parâmetros interferem na segurança de uma pilha de estéril, dos quais pode-se citar: a topografia do local, a geometria do depósito, a taxa de disposição e a altura dos bancos, as propriedades geotécnicas, o método de construção, hidrologia e hidrogeologia e as forças sísmicas (Orman *et al.*, 2011).

Em concordância com Orman *et al.* (2011), os principais modos de ruptura (figura 9) são: escorregamento superficial, escorregamento por fluxo superficial, ruptura rotacional circular, ruptura basal e translação de bloco.

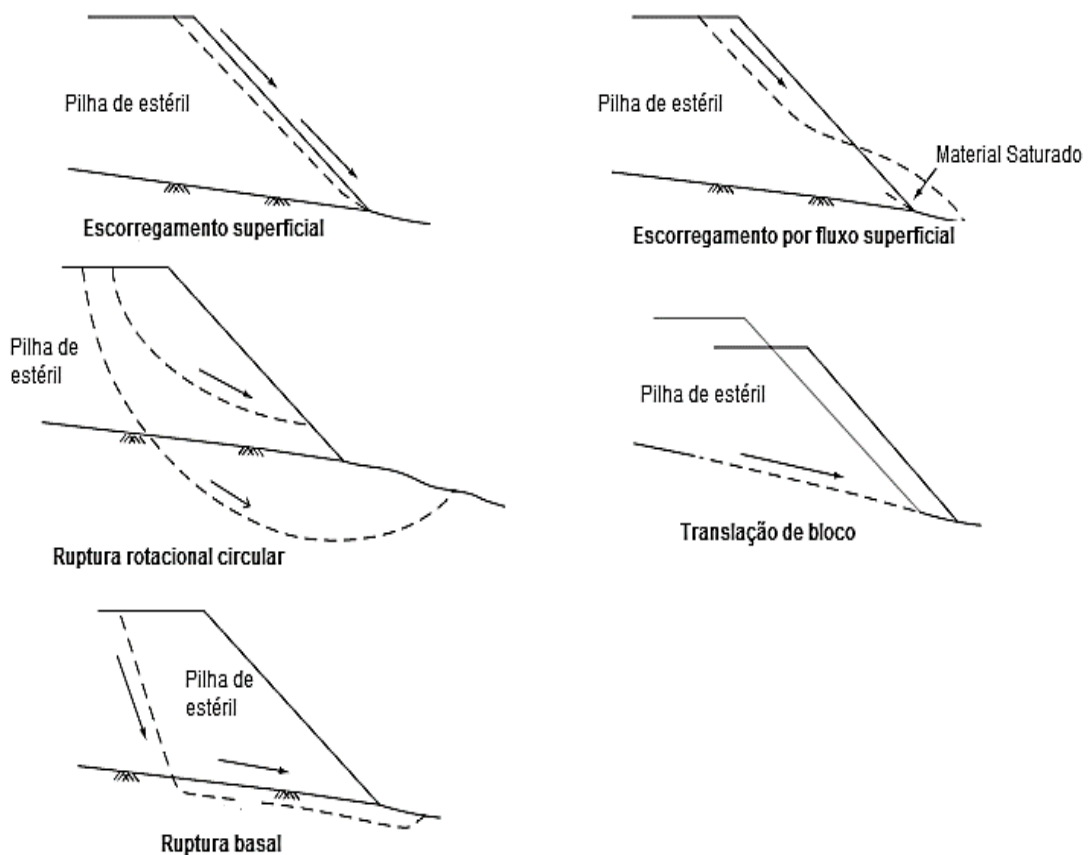


Figura 9: Modos de ruptura em pilhas de estéril.

Fonte: Adaptado de Orman *et al.*, 2011.

O modo de ruptura do tipo escorregamento superficial é o mais comum de ocorrer em pilhas de estéril, onde acontece o deslizamento de uma fina camada de material paralela à face do talude. É tipicamente originada nas cristas dos

bancos e geralmente decorre após uma forte precipitação, o que contribui para aumentar as poropressões em um depósito com baixa permeabilidade.

O escorregamento por fluxo superficial é explicado em virtude da entrada de grande quantidade de água na estrutura, provocando assim, a saturação do material, o qual desliza ao longo das encostas da pilha de estéril. Já a ruptura rotacional circular pode ocorrer em consequência do peso excessivo de material no depósito, assim como devido às características do estéril que o constitui (material frágil ou muito fino) e às altas poropressões. Pode se estender à fundação se o solo possuir baixa resistência.

Se uma pilha de estéril é colocada em terreno plano de solo competente, há menores probabilidades de ocorrer rupturas. No entanto, se o terreno plano é coberto por uma fina camada de material frágil, pode ocorrer ruptura basal. As chances de ocorrência desse tipo de ruptura são ainda mais acentuadas se o terreno é inclinado, ocorrendo, neste caso, a translação de bloco (Roberston *et al.*, 1985).

Diante do exposto, vale considerar que os estudos de estabilidade de depósitos de estéril, sempre enfatizam as situações mais desfavoráveis, adotando o fator de segurança mínimo para cada uma dessas condições.

2.2.5. Monitoramento de Pilhas de Estéril

Adicionalmente às análises de estabilidade das pilhas de estéril, é feito o monitoramento das mesmas a fim de se controlar o comportamento geotécnico dessas estruturas. Conforme a NRM 19 – “Normas Reguladoras para a Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos” – faz-se necessário que os depósitos de estéril sejam supervisionados por profissionais habilitados através do monitoramento da percolação de água, da movimentação, da estabilidade e do comprometimento do lençol freático.

Para isso, são utilizados alguns instrumentos, tais como medidores do nível de água (NA), piezômetros e marcos superficiais, que visam, respectivamente, definir a posição do nível de água, medir as poropressões e os

deslocamentos. A instalação destes instrumentos é comumente feita ao longo de uma seção representativa do depósito de estéril, para que, assim, os resultados sejam mais confiáveis.

De acordo com Robertson *et al.* (1985), o processo de monitoramento das pilhas de estéril não envolve apenas os fatores relacionados à estabilidade geotécnica. Deve-se considerar também, a vulnerabilidade do estéril frente às condições de oxidação, percolação, lixiviação e erosão.

Sob esta perspectiva, é fundamental mencionar que as pilhas de estéril que contêm materiais sulfetados podem sofrer oxidação quando expostas à ação conjunta do ar e da água, iniciando assim, a drenagem ácida. Tal fenômeno pode ser explicado pela dissolução de elementos químicos na água que se infiltra na pilha de estéril, resultando em uma água contaminada que, se desaguada aos cursos d'água naturais, pode comprometer seriamente o meio ambiente local.

Além da contaminação dos recursos hídricos, a drenagem ácida também pode comprometer a qualidade dos solos da região e, por isso, em pilhas de estéril deste tipo, deve ser feito o correto monitoramento das reações químicas e físicas no interior da estrutura e devem ser adotadas medidas mitigatórias que minimizem o impacto ambiental gerado nas áreas adjacentes.

2.3. METODOLOGIAS PARA DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL

A forma pela qual o estéril retirado da mina será disposto em um determinado local deve ser planejada e controlada de modo a proporcionar a máxima estabilidade e segurança da pilha de estéril, além de causar o mínimo impacto ao meio ambiente.

É importante considerar que, as atividades que demandam maior gasto econômico na disposição de estéril são, conforme Petronilho (2010, p. 29): “drenagem, proteção vegetal, retenção de finos gerados por carreamento de sólidos durante e após a formação da pilha, manutenção ao longo dos anos e transporte do estéril”. Dentre estas, a última possui maior influência e depende da disponibilidade dos equipamentos e dos perfis de tráfego.

Para construção de um depósito de estéril, usualmente são empregados os seguintes métodos:

- Método descendente;
- Método ascendente;
- Método por correia.

2.3.1. Método Descendente

Neste método, as pilhas são construídas sem nenhum controle geotécnico, ou seja, o estéril é simplesmente basculado a partir do ponto mais elevado da pilha (figura 10), não sendo feita a sua compactação e a preparação da base para a disposição do material.

Assim, a pilha construída por este método não apresenta um sistema de drenagem adequado e não possui proteção superficial dos taludes contra a erosão, o que a torna uma estrutura bastante instável e altamente susceptível a rupturas.

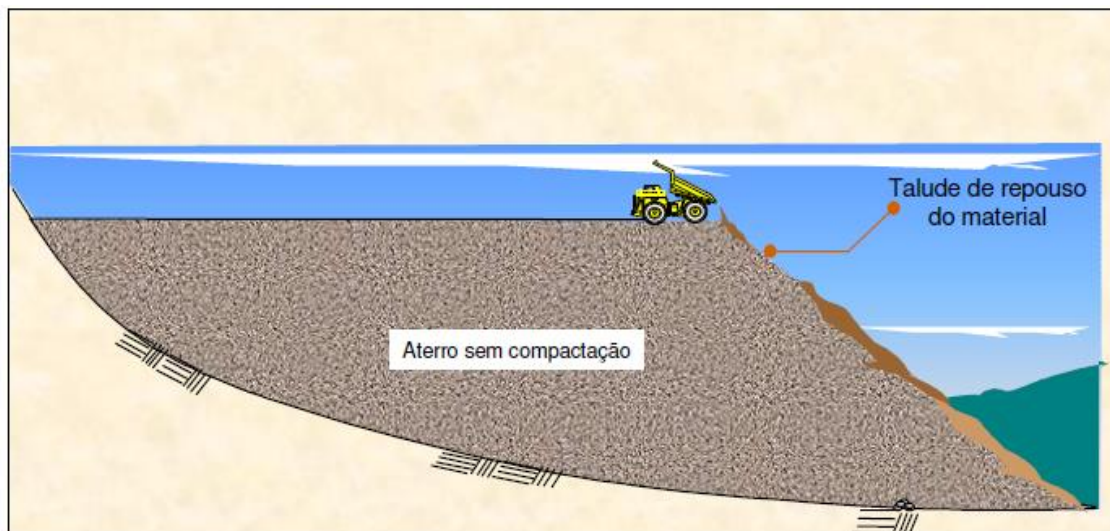


Figura 10: Representação do método de disposição descendente.

Fonte: Carvalho, 2009.

Segundo Carvalho (2009), apesar do método ser ilusoriamente mais econômico, por reduzir a distância de transporte, o mesmo não atende às

condições mínimas de segurança. Devido a isto, este tipo de depósito somente deve ser construído onde o terreno de fundação apresenta alta resistência e o material a ser disposto é bastante granuloso, pois se o estéril for constituído de grande quantidade de finos, estes por estarem soltos, podem ser carregados para os cursos d'água situados próximos à pilha.

2.3.2. Método Ascendente

O método ascendente é o mais indicado para construção de uma pilha de estéril, em virtude de proporcionar maior segurança e estabilidade à mesma.

De acordo com Petronilho (2010), a disposição do estéril é realizada de jusante para montante, isto é, do fundo do vale em direção às cabeceiras. O estéril é basculado por caminhões, gerando pilhas com altura de 2,0 a 3,0 metros. Em seguida, o material das pilhas é nivelado com o auxílio de um trator de esteira, formando camadas de 1,0 e 1,5 metros de espessura, as quais são compactadas pelo próprio tráfego dos equipamentos, o que é suficiente para estabilizar a pilha. A figura 11 mostra o exemplo deste método de disposição.



Figura 11: Representação do método ascendente de disposição do estéril.

Fonte: Carvalho, 2009.

As bancadas formadas devem possuir 10 metros de altura e a largura mínima das bermas deve ser de 6 metros. Após a formação das mesmas, é

executado o retaludamento (figura 12) com o trator de esteira, o que é feito com o objetivo de suavizar o ângulo de repouso e aumentar assim, a estabilidade da pilha por meio da compactação da camada superficial (Carvalho, 2009).

Cabe ressaltar que neste método são adotados sistemas de drenagem adequados, bem como é realizada a proteção superficial dos taludes, o que também contribui para a maior segurança da pilha.



Figura 12: Etapa de retaludamento com trator de esteira.

Fonte: Petronilho, 2010.

2.3.3. Método de disposição por correia

Além dos métodos ascendente e descendente, convencionalmente adotados na mineração para disposição de estéril, a construção da pilha pode se dar também pelo método de correias, também chamado de ‘empilhamento por *stacker*’. Neste caso, são utilizados sistemas de correias transportadoras, as quais, além de transportar o material, realizam a sua disposição (figura 13).

A utilização do método se explica pela maior velocidade de alteamento do material, porém,

O método de disposição por correia forma um depósito de material aparentemente fofo (solto) e por isso compressível, com características geomecânicas e hidráulicas que precisariam ser melhor examinadas para um projeto adequado de disposição em termos de segurança e economia (Nunes, 2014, p. 25).

As elevadas velocidades na disposição do estéril apresentam como consequência os elevados índices de vazios no material depositado. Além disso, não há compactação dos taludes, visto que não há tráfego de equipamentos sobre os mesmos. Isto posto, as pilhas formadas por este método, podem apresentar problemas de estabilidade geotécnica (Nunes, 2014).



Figura 13: Método de disposição de estéril por correia.

Fonte: Petronilho, 2010.

2.4. CONFIGURAÇÃO DAS PILHAS DE ESTÉRIL

Segundo Aragão (2008), a configuração de um depósito de estéril influencia diretamente na sua estabilidade e pode ser dos seguintes tipos: aterro em vale, aterro transversal a um vale, aterro em encosta, aterro de crista e pilha (figura 14).

A configuração do tipo aterro em vale compreende a disposição do estéril em um vale, preenchendo o mesmo parcial ou totalmente. O depósito de estéril é tipicamente construído através da disposição do material de jusante para montante do vale, seguindo a inclinação do mesmo (*U.S. Environmental Protection Agency, 1995*).

Uma variação deste tipo de configuração consiste no depósito do tipo aterro transversal a um vale. Neste caso, o estéril é disposto de um lado a outro do vale, transversalmente à drenagem. Para evitar o acúmulo de água na estrutura, devem ser estabelecidas disposições específicas para promover a captação de água através ou em torno do depósito (*BC Mine Waste Rock Pile Research Committee, 1991*).

O depósito de estéril do tipo aterro de encosta é construído em um terreno inclinado e não bloqueia qualquer curso de drenagem principal. Deste modo, sua inclinação é a mesma da inclinação da fundação. Já o depósito do tipo aterro de crista é construído na crista de um cume, sendo que a estrutura se estende para baixo, seguindo a inclinação do terreno. Por fim, a configuração do tipo pilha designa o depósito construído pelo empilhamento de montes de material em uma superfície horizontal ou moderadamente inclinada (U.S. Environmental Protection Agency, 1995).

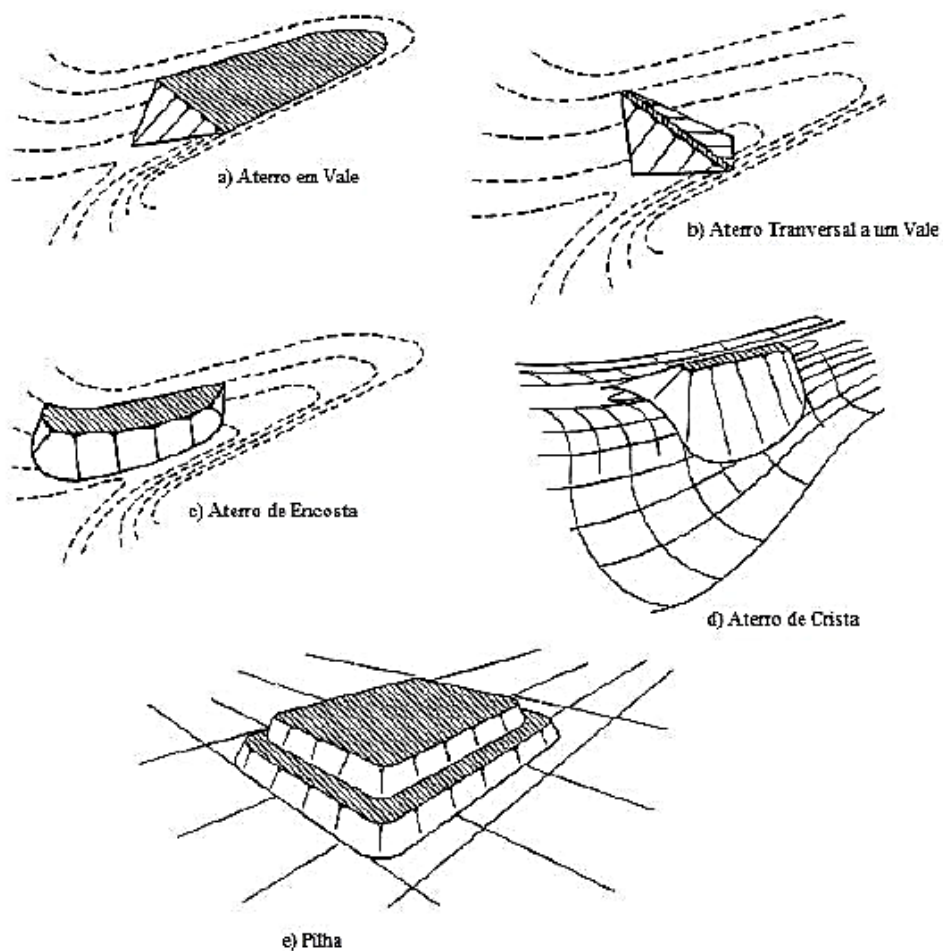


Figura 14: Configurações de pilhas de estéril.

Fonte: Aragão, 2008.

2.5. OPERAÇÃO DAS PILHAS DE ESTÉRIL

De acordo com Aragão (2008), durante a construção de um depósito de estéril, o material deve ser disposto, preferivelmente, ao longo do comprimento da crista, tornando esta a mais longa possível e minimizando assim, a elevação da pilha. Dessa forma, a estabilidade da estrutura é favorecida. Ademais, o desenvolvimento da pilha deve ser feito em vários setores, não sendo a disposição do estéril concentrada em um único local.

É ideal também, que os materiais rochosos grosseiros sejam colocados no leito de cursos d'água de futuras expansões ou separados para uso futuro, visando promover a drenagem de fundo e aumentando a resistência ao cisalhamento da estrutura. Em contrapartida, os materiais mais finos e de baixa resistência, devem ser dispostos nas porções superiores do depósito de estéril e fora das zonas de escoamento superficial (Aragão, 2008).

Cabe ressaltar que o projeto de uma pilha de estéril deve sempre considerar os objetivos a longo prazo que podem ser exigidos para reabilitação da área utilizada para disposição do material. Tais objetivos compreendem assegurar a estabilidade e o controle de erosões a longo prazo e garantir que a água proveniente da pilha seja desaguada com qualidade ao meio ambiente local e que seja possibilitado o uso futuro das áreas afetadas. Considerar esses objetivos traz como benefícios ao empreendimento: a redução dos custos, o aumento da estabilidade de curto prazo na construção do depósito de estéril e a minimização de problemas operacionais (Bohnet & Kunze, 1990 *apud* Aragão, 2008).

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho iniciou-se a partir da análise de informações topográficas da região onde a mina de fosfato em estudo está localizada e da avaliação das restrições apresentadas pelos possíveis locais para a construção do depósito de estéril. Foi feita assim, a verificação se tais

locais estão inseridos em uma área de preservação permanente, se estão fora dos limites estabelecidos para a cava e, por último, e de menor importância, se a área requerida pertence ao empreendimento.

Com base em tal verificação, selecionou-se três áreas alvos para a construção do depósito de estéril e, então, foi feita a simulação do mesmo, utilizando para isso, o *software DataMine Studio OP*. Tal *software* possui ampla aplicação no planejamento de mina e permite projetar cavas e depósitos de estéril, avaliar seus respectivos volumes com base em um modelo de blocos, entre outras várias aplicações.

Primeiramente, determinou-se a cota ideal de trabalho, de forma a adequar a estrutura à topografia do local e, em seguida, foram definidos os parâmetros geométricos do depósito de estéril a ser projetado. Os seguintes critérios foram adotados:

- Ângulo individual de talude: 26°;
- Largura das bermas: 6 metros;
- Altura dos bancos: 10 metros.

Todos estes parâmetros foram estabelecidos em concordância com as especificações da NBR 13029.

Projetou-se então, o depósito de estéril nas três áreas escolhidas e, a partir desta projeção, foi gerada uma superfície do depósito e também, da topografia, o que possibilitou uma melhor visualização da conformação da estrutura na superfície topográfica.

Através das superfícies geradas, foi feita a estimativa do volume de material suportado pela pilha de estéril, ou seja, foi determinada a sua capacidade de armazenamento. Além disso, calculou-se a distância de transporte do centro de massa da cava da mina em questão até o centro de massa de cada um dos depósitos projetados. Tal distância corresponde à distância média de transporte (DMT).

Por fim, levando em consideração os parâmetros determinados (capacidade / volume e DMT) e o volume a ser depositado, definido pelo planejamento de lavra, foi feita a avaliação dos aspectos econômicos e

ambientais. A partir disso, determinou-se os locais que apresentam maior viabilidade para a disposição do material.

As etapas da metodologia podem ser sumarizadas na figura 15.

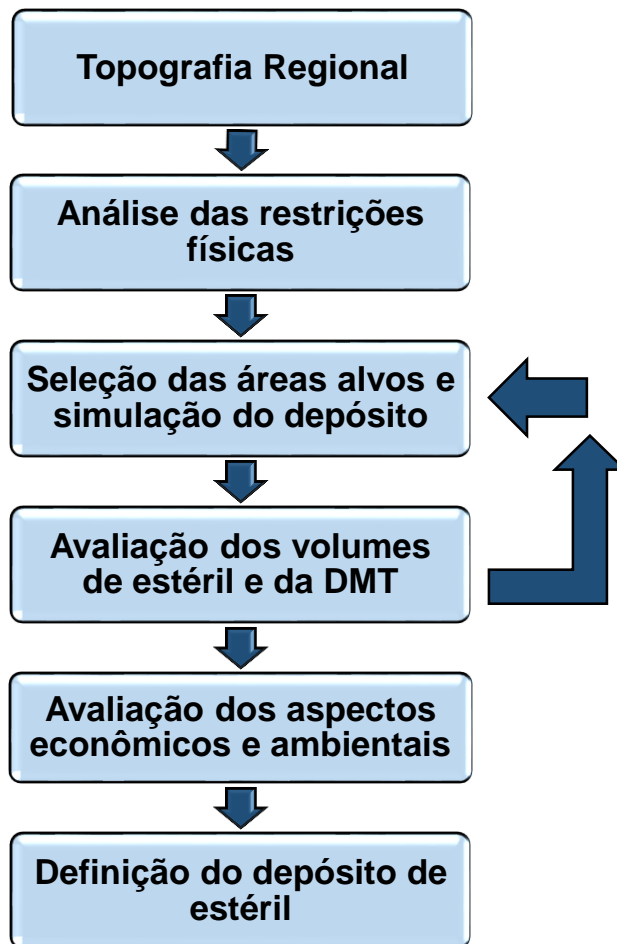


Figura 15: Etapas da metodologia adotada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A princípio, cabe ressaltar que as áreas escolhidas para a projeção dos depósitos de estéril podem não estar compreendidas totalmente dentro dos limites do empreendimento e possivelmente se encontram inseridas em amplas bacias de drenagem. A análise desses critérios se faz importante, pois os mesmos representam condições restritivas na escolha do local para disposição do estéril, podendo estas implicar em um plano de ações estratégicas para a

empresa, como compra de terras pleiteadas e verificação das mesmas perante aos órgãos ambientais.

O primeiro depósito de estéril, mostrado na figura 16, foi projetado a sudoeste da cava da mina de fosfato, em uma área caracterizada pela presença de um vale, o qual será totalmente preenchido pelo material a ser disposto. A estrutura possui altura máxima de 150 metros e o local para a sua projeção foi escolhido devido ao fato de estar situado nas proximidades dos limites da cava, visando assim, obter uma menor distância média de transporte (DMT).

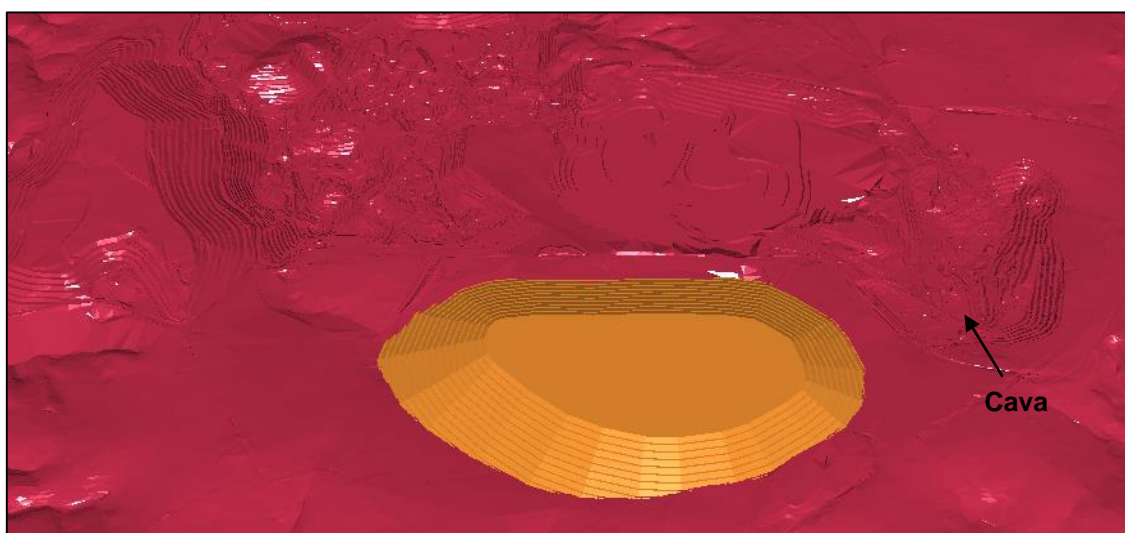


Figura 16: Pilha de estéril 1 inserida na topografia local.

A segunda pilha de estéril (figura 17) representa uma expansão do primeiro depósito projetado. Isso foi feito com o intuito de aumentar a área para a disposição do material e verificar o impacto desse aumento na capacidade de armazenamento. A altura do depósito em questão é de 110 metros e o local onde o mesmo foi projetado também é interceptado por vales, nos quais será feito o preenchimento com estéril.

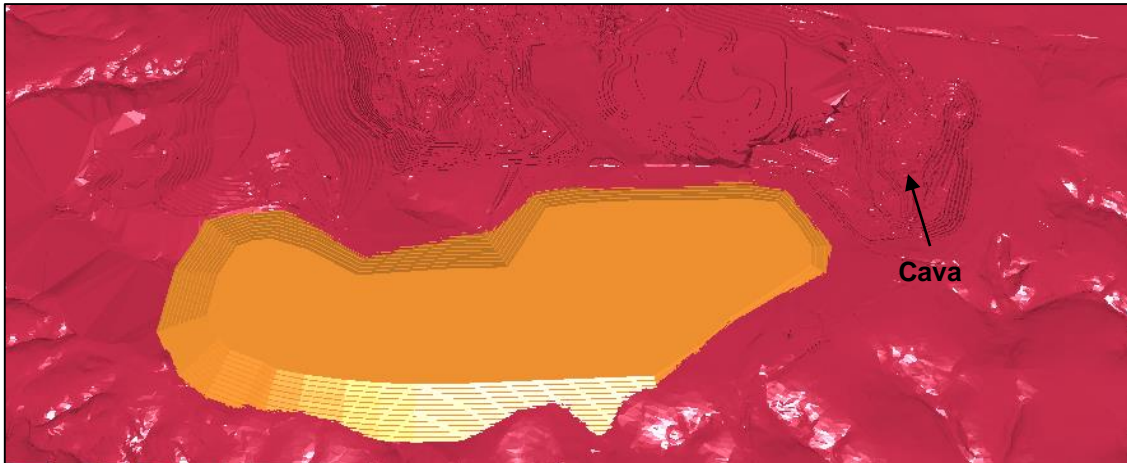


Figura 17: Pilha de estéril 2 inserida na topografia local.

Já a terceira pilha de estéril (figura 18) foi projetada de forma a preencher uma das cavas pertencente ao empreendimento do qual a mina de fosfato faz parte. Tal cava encontra-se exaurida e está localizada a oeste da mina considerada. A altura deste depósito é de 50 metros e, para a sua projeção, foi respeitada a configuração da cava, permitindo o adequado preenchimento das bancadas com material.



Figura 18: Pilha de estéril 3 inserida na topografia local.

A tabela 1 apresenta os dados da capacidade de armazenamento (volume) de cada um dos depósitos de estéril e suas respectivas distâncias médias de transporte (DMT) e a tabela 2 mostra os custos com o transporte para cada metro cúbico de material.

Tabela 1: Volume (m³) e DMT (Km) dos depósitos de estéril projetados.

DEPÓSITO DE ESTÉRIL	VOLUME (m ³)	DMT (Km)
1	105.746.606,45	3,62
2	197.094.238,28	4,47
3	10.241.333,01	3,99

Tabela 2: Custo de transporte do estéril por m³ em função da DMT.

DMT (Km)	R\$/ m ³
0 a 1,0	1,03
1,01 a 2,0	1,60
2,01 a 3,0	2,41
3,01 a 4,0	3,20
4,01 a 5,0	4,10

Fonte: Histórico de custos de uma empresa de mineração de fosfato.

De acordo com o planejamento de lavra, o volume de estéril a ser depositado até o fim da vida útil da mina equivale a 55 milhões de metros cúbicos. Com base em tal informação e, utilizando os dados apresentados nas tabelas 1 e 2, foi possível calcular o custo total com o transporte do material até cada local de empilhamento. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 3.

Tabela 3: Custo total com o transporte de estéril.

DEPÓSITO DE ESTÉRIL	DMT (Km)	CUSTO TOTAL (R\$)
1	3,62	176.000.000,00
2	4,47	225.500.000,00
3	3,99	32.772.265,63

A partir dos resultados descritos, observa-se que o segundo depósito de estéril projetado apresenta a maior capacidade de armazenamento. Todavia, a distância média de transporte (DMT) é maior, e como consequência, o custo de operação torna-se superior àqueles obtidos com os depósitos 1 e 3.

É importante salientar que parte da segunda pilha de estéril encontra-se inserida dentro da área de preservação permanente (APP) da Mata da Cascatinha, o que, por conseguinte, já restringe a sua implantação no local escolhido, visto que tal área não poderá ser ocupada. Ainda dentro deste contexto, outro aspecto que merece importância é o fato da estrutura em questão também ocupar uma parte da propriedade de terceiros e isto certamente envolverá ações de compra e venda de terrenos.

Além disso, este depósito de estéril está situado ao lado de uma rodovia de considerável movimento e sua construção poderá gerar um impacto visual bastante significativo na região. Vale lembrar também que, para a implantação de uma pilha de estéril de tamanha dimensão, é necessário um trabalho maior para o preparo da fundação e isso influencia diretamente nos custos, os quais tendem a ser ainda mais altos, não somente na fase inicial, mas também, na etapa final da vida útil do depósito, quando devem ser realizados trabalhos para reabilitação da área.

Portanto, apesar da segunda alternativa locacional conseguir atender aos objetivos do planejamento de lavra, não se mostra viável sob a perspectiva ambiental, visto que ocupa um espaço territorial protegido e que não pode ser modificado e, além disso, requer uma área muito extensa para a sua construção.

Dentro do âmbito econômico, a pilha de estéril 2 também apresenta notável desvantagem para a empresa, pois os benefícios de possuir uma maior capacidade de armazenamento implicam em maiores custos, tanto nos aspectos referentes ao preparo e recuperação da área, quanto na compra de terrenos ocupados por terceiros. Logo, estes custos adicionais podem não ser compensatórios, uma vez que acrescentam em muito os custos com o transporte do estéril.

No que concerne ao depósito de estéril 1, verifica-se que o mesmo apresenta a menor DMT e ocupa uma área menor comparado à segunda estrutura projetada. Estas características podem contribuir para minimizar os custos com a preparação da superfície para disposição do material e com a recuperação da área no futuro ao fim das atividades do empreendimento. No entanto, a sua implantação também requer a utilização de domínios pertencentes a outrem, o que poderá demandar que a empresa desenvolva novos planos estratégicos de custos, uma vez que esta condição envolve a compra de glebas já ocupadas.

É importante destacar que a referida pilha de estéril também se localiza ao lado da rodovia e vale a mesma observação feita para o segundo depósito de estéril acerca do impacto visual que pode ser gerado na região.

Por fim, a terceira pilha de estéril apresenta algumas vantagens, posto que não se faz necessário realizar a degradação de áreas para alocação do material e se encontra dentro dos limites do empreendimento. Deste modo, a empresa não terá custos com compra ou licenciamento de áreas junto aos órgãos ambientais e com a preparação da fundação para a disposição do estéril.

É imprescindível destacar que este depósito pode ser considerado como parte da recomposição da topografia original do terreno e está posicionado sobre uma área já degradada pela mineração. Assim, esta alternativa locacional torna-se bastante apreciada dentro do contexto ambiental, pois representa uma forma de reabilitar um local já deteriorado pela atividade de extração. Dessa maneira, é possível diminuir a área superficial a ser revegetada e, como consequência, reduzir o passivo ambiental e os custos com o fechamento da estrutura. Além do mais, tal método de disposição do estéril é esteticamente agradável em razão de não causar nenhum impacto visual.

Outro aspecto de grande relevância é a maior segurança que a disposição do estéril dentro da cava promove, pois, o material confinado entre as paredes da mina diminui a possibilidade de ocorrência de rupturas ao longo dos taludes.

À vista disso, o preenchimento da cava exaurida com o estéril pode trazer ganhos significativos ao empreendimento, tanto ambientais quanto econômicos,

e, dessa forma, os custos com o transporte do material podem ser compensados pelos benefícios mencionados. Contudo, apenas este depósito de estéril não atende às demandas do empreendimento, devido a sua menor capacidade, devendo, portanto, ser implantada outra estrutura de forma a satisfazer todo o volume requerido pela lavra.

5. CONCLUSÃO

Com base nos resultados expostos, conclui-se que a melhor opção é a terceira alternativa locacional e, após completado o seu volume, a implantação da primeira pilha de estéril se mostra a mais adequada, dado algumas condições, como por exemplo: restringir a estrutura aos limites do empreendimento, para assim, evitar os custos com compra de terras; e diminuir a altura do depósito, visando minimizar o impacto visual gerado na região. Assim sendo, é possível que o planejamento de lavra consiga alocar todo o volume de estéril retirado durante a fase de exploração, garantindo assim, a exequibilidade econômica do empreendimento.

Entretanto, considerando uma possível expansão da mina de fosfato e, por consequência, um aumento do volume de estéril a ser depositado, a segunda alternativa pode representar uma ação estratégica para a empresa. Isso significa que, se necessário, tal estrutura poderá ser implantada desde que sejam respeitadas todas as limitações do local.

Vale ressaltar que as análises feitas consideraram apenas os aspectos ambientais e aqueles referentes aos custos de movimentação de estéril, não sendo levados em conta os aspectos geológicos, geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos da fundação do terreno. Em uma fase posterior ao projeto conceitual, ou seja, no projeto de viabilidade do depósito de estéril, o qual envolve estudos mais complexos, tais fatores devem ser considerados, para somente assim, ser possível verificar se os locais escolhidos realmente se adequam para a implantação desse tipo de estrutura.

6. REFERÊNCIAS

ARAGÃO, G. A. S. **Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2470>. Acesso em: 27 set. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13029: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração**. Rio de Janeiro, 1993.

AZEVEDO, M. P. N. de. **Barragens de terra – Sistemas de drenagem interna**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Anhembí Morumbi, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://docplayer.com.br/2199359-Barragens-de-terra-sistemas-de-drenagem-interna.html>. Acesso em: 12 out. 2016.

BC MINE WASTE ROCK PILE RESEARCH COMMITTEE. **Mined Rock and Overburden Piles**. Investigation & Design Manual. Interim Guidelines, May 1991, 128p.

CALDWELL, J. A. et al. **Simplified stability analysis**. In: McCARTER, M.K. & SOCIETY OF MINING ENGINEERS OF AIME. Design of non – Impounding Mine Waste Dumps. New York, 1985, chapter 6, p 47 – 61. Disponível em: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Caldwell1985e.pdf>. Acesso em: 20 out. 2016.

CARVALHO, M. G. A. de. **Estratégia ambiental pró-ativa: Sequenciamento de lavra concomitante com a disposição de estéril dentro da mina**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-03072009-150534/pt-br.php>. Acesso em: 25 ago. 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Normas Regulamentadoras de Mineração – NRM 19: Disposição de estéril, rejeitos e produtos**. Rio de Janeiro, 2001, p. 79 – 83.

FONTES, M. P. **Pilhas de estéril - Planejamento e Construção**. 2015. Anotações de aula. Departamento de Engenharia de Minas e Construção Civil, CEFET-MG, Araxá, MG, Brasil.

FONTES, M. P. et al. **Alternativas para deposição de estéril para a Mina do Barreiro**. In: 8º Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto, 2014, Belo Horizonte. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00005678.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2016.

JUNIOR, I. P. **Caracterização geotécnica e análise da estabilidade de taludes de mineração em solos da Mina de Capão Xavier**. 2005. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005. Disponível em: <http://locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/3708/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 31 out. 2016.

KENT, A. Coal mine waste dumps in British Columbia stability issues and recent developments. **International Mine Waste Management**, Vancouver, Canada, p 10 – 18, 1992. Disponível em: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Kent1992.pdf>. Acesso em: 20 out. 2016.

NUNES, D. R. **Comportamento geotécnico de pilha de estéril formada pelo método de disposição por correia**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3618>. Acesso em: 09 out. 2016.

ORMAN, M. et al. **Waste Piles and Dumps**. In: SOCIETY FOR MINING, METALLURGY, AND EXPLORATION, INC. SME – Mining Engineering Handbook.3rd ed. United States of America: Peter Darling, 2011. v.1, p 667 – 680.

PEREIRA, W. L. **Análise da estabilidade da pilha de estéril do Correia - mina de Gongo Soco - para implantação da Ferrovia estrada de ferro Vitória Minas – EFVM**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2458>. Acesso em: 10 out. 2016.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análises de risco**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2356>. Acesso em: 02 set. 2016.

PIRES, L. C. **Estudo de alternativas locacionais de pilhas de estéril como estratégia de sustentabilidade**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/6420>. Acesso em: 21 out. 2016.

PULINO, A. M. **Índice de estimativa de custos de fechamento de pilhas de estéril e barragens de rejeito**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/836M.PDF>. Acesso em: 09 out. 2016.

ROBERTSON, A. MacG et al. **Mine Waste Disposal: An Update on Geotechnical and Geohydrological Aspects**.1985. Vancouver, Canada, 1985, 24 p. Disponível em: <https://www.rgc.ca/files/publications/mine.pdf>. Acesso em 11 out. 2016.

SALIBA, F. P. M. **Avaliação hidrogeotécnica da fundação da pilha de estéril nº 5 da Mina do Andrade – Bela Vista de Minas (Minas Gerais)**. 2007. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=10680@1. Acesso em: 09 out. 2016.

TEIXEIRA, M. B. **Estudo numérico do comportamento mecânico de pilhas de estéril de mineração**. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2401>. Acesso em: 21 out. 2016.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **The Design and Operation of Waste Rock Piles at Noncoal Mines**. 1995. Washington, July, 1995, 53p. Disponível em: <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=91004KHB.TXT>. Acesso em: 15 out. 2016.