

**REDE DE ENSINO DOCTUM
UNIDADE JOÃO MONLEVADE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JENNIFFER CRISTINA DA SILVA
GUILHERME VIEIRA BARBOSA**

**EXECUÇÃO DE PROJETO DE DRENAGEM EM PILHA DE ESTÉRIL: Revisão
bibliográfica e Estudo de caso da ampliação da Pilha de Estéreis 06 (PDE-06)
da mina do Andrade**

**JOÃO MONLEVADE
2018**

**JENNIFFER CRISTINA DA SILVA
GUILHERME VIEIRA BARBOSA**

**EXECUÇÃO DE PROJETO DE DRENAGEM EM PILHA DE ESTÉRIL: Revisão
bibliográfica e Estudo de caso da ampliação da Pilha de Estéreis 06 (PDE-06)
da mina do Andrade**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
para obtenção do grau de bacharel em
Engenheiro Civil no curso de Engenharia Civil,
da Faculdade Doctum de João Monlevade.

Orientador(a): Prof. M. Sc. Rieder de Oliveira
Neto

JOÃO MONLEVADE

2018

JENNIFFER CRISTINA DA SILVA
GUILHERME VIEIRA BARBOSA

EXECUÇÃO DE PROJETO DE DRENAGEM EM PILHA DE ESTÉRIL: Estudo de caso da ampliação da Pilha de Estéreis 06 (PDE-06) da mina do Andrade

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para obtenção do grau de bacharel em Engenheiro Civil no curso de Engenharia Civil, da Faculdade Doctum de João Monlevade.

João Monlevade, 06 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Rieder de O. Neto

Prof. Orientador: Me Rieder de Oliveira Neto

Ladir Antônio da Silva Júnior

Banca Examinadora: Me. Ladir Antônio da Silva Júnior

Wagner Cavaliere de Souza

Banca Examinadora: Me. Wagner Cavaliere de Souza

RESUMO

É inegável o papel da mineração na sociedade moderna, praticamente tudo que nos cerca e sustenta nosso modo de vida é produto ou sub-produto da indústria mineral. Estéril um aglomerado de minerais sem ou com baixo valor econômico, no qual é retirado da área de lavra para garantir acesso ao minério a ser explorado, nas minas de céu aberto ele é depositado como um aterro, de forma um talude, denominado pilha de estéril. O presente trabalho é uma revisão bibliográfica, conceitos e normas técnicas ligadas a área de geotécnica e a projetos de pilhas de estéril, além de apresentar um projeto de ampliação do processo de drenagem da Mina do Andrade, realizada pela empresa Statum Geotecnia Ltda em 2017. Foi realizado levantamento de campo, análise da geologia da área, e a estabilidade das pilhas. Além disso, o estudo de caso apresentou a elaboração do projeto de drenagem engloba canaletas de berma e canais periféricos. Com o estudo, pode se concluir que é de suma importância os cuidados com o manejo dos recursos hídricos devem abranger todo o volume que impactar e/ou for impactado pelo empreendimento. Para garantir que o monitoramento esteja presente em toda extensão da lavra o uso de ferramentas de controle se faz indispensável.

Palavras-chave: Pilha de estéril; drenagem; mecânica dos solos; geotécnica, mineração.

ABSTRACT

The role of mining in modern society is undeniable, and virtually everything that surrounds us and sustains our way of life is a product or by-product of the mineral industry. Sterile is a cluster of minerals with no or low economic value, in which it is removed from the mining area to ensure access to the ore to be exploited. In open pit mines it is deposited as a landfill, in the form of a slope called the sterile pile . The present work is a review of bibliography, concepts and technical standards related to the geotechnical area and the projects of sterile piles, besides presenting a project to expand the drainage process of the Andrade Mine, carried out by the company Statum Geotecnia Ltda in 2017. Field survey, area geology analysis, and battery stability were performed. In addition, the case study presented the elaboration of the drainage project encompasses berm canals and peripheral canals. With the study, it can be concluded that it is extremely important that the management of water resources must cover all the volume that impacts and / or is impacted by the enterprise. In order to ensure that monitoring is present throughout the mining process, the use of control tools becomes indispensable.

Keywords: Sterile cell; drainage; soil mechanics; geotechnical, mining.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de estruturas do solo.....	16
Figura 2 - Horizontes constituintes do solo	17
Figura 3 - Distribuição das exportações por produto (1º semestre/2014)	19
Figura 4 - Distribuição da CFEM	20
Figura 5 - Estrutura de pilha de estéril	29
Figura 6 - Croqui da fase de lançamento do método ascendente de disposição de estéril.....	31
Figura 7 - Configuração de pilhas de estéril.....	32
Figura 8 - Representação dos drenos	37
Figura 9 - Tipos de sistema de drenagem.....	39
Figura 10 - Mina do Andrade- Mapeamento das pilhas de estéril.	42
Figura 11 - Solo aluvionar na drenagem principal com blocos de gnaiss.....	45
Figura 12 - Solo Coluvionar.....	46
Figura 13 - Afloramento de Gnaiss.....	47
Figura 14 - Afloramento de Saprolito de Gnaiss.....	47
Figura 15 - Depósito de lixo.....	48
Figura 16 - Bermas iniciais da Pilha.	48
Figura 17 - Localização da Seção AA	49
Figura 18 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção AA – Superfície freática normal	50
Figura 19 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção AA – Superfície freática crítica.....	51
Figura 20 - Drenagem Interna complementar - Seção típica.....	52
Figura 21 - Localização da Seção AA e da Seção BB	61
Figura 22 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção AA.....	62
Figura 23 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção BB.....	63
Figura 24 - Curva de descarga do sistema extravasor existente.....	65
Figura 25 - Proteção do depósito de lixo – figura esquemática.....	66

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 - Resumo do Sistema Unificado de Classificação de Solos	16
Tabela 1 - Produção de Minério e geração de estéril / milhões de toneladas	21
Tabela 2 - Principais características da PDE-6	42
Tabela 3 - Parâmetros dos levantamentos de reconhecimento geológico e geotécnico da pilha PDE-06	43
Tabela 4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento e pesos específicos	50
Tabela 5 - Fatores de Segurança obtidos	51
Tabela 6 - Quantis de Altura de Chuva (mm)	53
Tabela 7 - Relação Intensidade – Duração – Frequência – Estação Andrade	54
Tabela 8 - Características Físicas das Área de Contribuição das Estruturas de Drenagem Superficial	56
Tabela 9 - Síntese dos Cálculos da Vazão de Projeto do Sistema de Drenagem Superficial	56
Tabela 10 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico da Berma Crítica	57
Tabela 11 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico – Trecho Fundo Liso	58
Tabela 12 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico – Trecho em Degrau	58
Tabela 13 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico das Bacias de Dissipação	59
Tabela 14 - Principais características da Bacia 15	60
Tabela 15 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento e pesos específicos	62
Tabela 16 - Fatores de Segurança obtidos	63
Tabela 17 - Volumes Característicos do Reservatório	64
Tabela 18 - Síntese dos Cálculos da Vazão de Projeto do Sistema Extravasor Existente	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS'

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
CFEM	Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
EI	Energia interna ou de pressão
FOB	Livre a bordo
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMM	Conselho Internacional de Mineração e Metais
ISRM	Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas
NRM	Normas Reguladoras de Mineração
PAE	Plano de Aproveitamento Econômico
REM	Relação estéril-minério
ROM	Minério Bruto Lavrado
SPT	Teste de penetração padrão
US	Pesquisa Geológica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	15
3.1 MECÂNICA DOS SOLOS	15
3.2 CENÁRIO DA MINERAÇÃO NO BRASIL	18
3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS DE EXTRAÇÃO – ESTÉRIL	22
3.5 PROJETO DE PILHA DE ESTÉRIL A CÉU ABERTO.....	25
3.5 DRENAGEM EM PILHAS DE ESTÉRIL.....	35
3.5.1 Elementos de drenagem aplicados em pilhas de estéril	36
4.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO.....	40
4.2 METODOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO	42
4.2.1 Geologia da Pilha PDE-6	42
4.2.1.1 Solo Aluvionar	44
4.2.1.2 Solo Coluvionar	45
4.2.1.3 Afloramento de Gnaisse	46
4.2.1.4 Afloramento de Saprolito de Gnaisse	47
4.2.1.5 Lixão.....	48
4.2.1.6 Material Depositado.....	48
4.2.2 Análise da estabilidade da PDE-6	49
4.2.3 Sistema de Drenagem Interna	52
4.2.4 Sistema de Drenagem Superficial	52
4.2.4.1 Estudos Hidrológicos.....	53
4.2.4.2 Concepção do sistema de drenagem	55
4.2.4.3 Características físicas	55
4.2.4.4 Vazão de Projeto	56
4.2.4.5 Estruturas de Drenagem	57
4.2.4.6 Bacia de dissipação.....	59
4.2.5 Sistema de Contenção de Sedimentos	60
4.2.6 Dimensionamento do Reservatório	63
4.2.7 Avaliação Hidráulica do Sistema Extravasor Existente	64

4.2.8 Proteção do depósito de lixo	66
5 CONCLUSÃO	68
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que é de grande importância o papel da mineração na sociedade atual, praticamente tudo que nos cerca e sustenta no dia-a-dia é produto ou sub-produto da indústria mineral.

Minas Gerais, é o estado minerador mais importante do Brasil, extraído cerca de mais de 180 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, o que corresponde a 49,65% das exportações de minério de ferro e por 42,7% de ouro do Brasil (IBRAM, 2016).

Produtos necessários para atender as exigências da população, principalmente os relacionados à alimentação, saúde, moradia e vestuário, são provenientes do ramo mineral. Entretanto, a atividade de mineração produz grande quantidade de resíduos, destaca-se os resíduos sólidos de extração, os quais são denominados como estéril, é os designados rejeitos que provêm de resíduos sólidos do tratamento/beneficiamento do minério (IBRAM, 2016).

Na exploração dos recursos naturais através da mineração a céu aberto são produzidos basicamente dois tipos de material, minério e estéril. O minério é aquele de interesse econômico, normalmente enviado para uma planta de tratamento para adequar suas características ao mercado consumidor. Para o aproveitamento do minério, o mesmo é submetido a um processo de decapeamento da camada inicial de solo e a remoção do material conhecido como estéril (PETRONILHO, 2010). A relação entre a quantidade de material estéril necessária para acessar cada tonelada de minério é conhecida como relação estéril-minério, ou REM, por sua sigla. Curi (2014) destaca que este deve ser descartado criteriosamente, geralmente empilhado em local apropriado.

Pilhas de estéril são formadas pela disposição de materiais distintos e sem valor comercial agregado. Tais, podem ser compostas por solos e/ou rochas provenientes, ou não, de uma mesma matriz litológica. Entretanto, mesmo em se trate de pilhas de estéril homogêneas quanto ao tipo de material disposto, não é possível atribuir o mesmo adjetivo às suas características hidráulicas.

No Brasil, a responsabilidade sobre a destinação ou disposição final de resíduos é do gerador. Tal responsabilidade decorre do princípio do “poluidor pagador” estabelecido na Lei nº 6938/1981, que estabeleceu a Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981).

O projeto e o planejamento de uma pilha de estéril estão sujeitos a aprovações legais, como as normas de disposição de estéril, rejeito e produtos das NRM – Normas Reguladoras de Mineração da ANM – Agência Nacional de Mineração que substituiu a partir de 28/11/2018 o DNPM – Departamento Nacional da Produção Mineral, e a NBR 13029 (ABNT, 2017) que especificam requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projeto para disposição de estéril. E devido à escassez de áreas adequadas para disposição de estéril, é de suma importância a realização de um plano bem elaborado de manejo do mesmo.

De acordo com Rehm *et al.* (1980), a formação de pilhas do tipo descendentes onde os fragmentos de granulometrias maiores tendem a rolar para base do talude, em quanto, os fragmentos médios e pequenos tendem a permanecer na crista, é conhecida como ponta aterra e é muito praticada em minas de céu aberto.

Estruturas de pilhas de estéril, podem sofrer diversos tipos de patologias são as principais: colapsos se submetidas a abalos por tremores de terra, se o sistema de drenagem for mal dimensionado 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).

As características hidráulicas são propriedades difíceis de ser estimadas, entretanto, possuem grande importância para o entendimento dos sistemas de percolação da água no interior das pilhas de estéril (SALIBA, 2007). Em muitas situações, problemas hidráulicos, são os principais responsáveis por problemas de estabilidade de pilhas, podendo ocorrer devido ao acúmulo de água no interior da pilha associados por mudanças nas propriedades hidráulicas do estéril, visto que com o passar do tempo, existe a possível ação de intemperismo e carregamento de materiais mais finos, formando regiões de baixa permeabilidade (SALIBA, 2007).

O presente trabalho teve por objetivo fornecer conhecimentos básicos e fundamentos necessários para elaboração e execução de um projeto de pilhas de estéril de acordo com as normas de segurança e ambientais, em prol de uma

execução adequada e do atendimento requisitos básicos e da empresa Statum Geotecnia Ltda, relata como resultados o projeto de drenagem executado em contrato celebrado junto a ArcelorMittal Brasil AS. expressar a importância da drenagem nesses tipos de estruturas.

2 OBJETIVOS

De acordo com o contexto apresentado, os objetivos foram subdivididos em geral e específicos de modo a direcionar o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho, tem por objetivo contextualizar sobre elementos de um projeto de pilha de estéril e apresentar resultados do projeto de execução da drenagem da pilha de estéril 06 (PDE-06) da mina do Andrade na cidade de Bela Vista de Minas, Minas Gerais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Por objetivos específicos, a fim de se alcançar o objetivo geral, pode-se detalhar:

- a) revisar conceitos fundamentais de mecânica dos solos aplicado à pilha de estéril além de elucidar terminologias técnicas específicas desse segmento da Engenharia Civil;
- b) caracterizar o cenário nacional com dados atuais acerca da mineração brasileira evidencia tanto a produção do minério quanto do estéril gerado;
- c) caracterizar o estudo de caso desde a implantação da drenagem da pilha de estéril até o cenário atual que demandou ampliação da mesma;
- d) apresentar dados técnicos como projetos, prazos, procedimentos construtivos etc. Visando contribuir cientificamente sobre a temática que se encontra, ainda, escassa em termos de publicações literárias.

3 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Os principais conceitos abordados neste trabalho são apresentados a seguir.

3.1 MECÂNICA DOS SOLOS

Os solos tem origem da fragmentação da crosta terrestre, denominado rocha. A fragmentação e decorrente de agentes físicos e químicos. Variações de temperatura provocam trincas, nas quais penetra a água, que reage quimicamente os minerais. A água que penetra nas trincas ou fendas, entre outros fatores físicos, exerce elevadas tensões a rocha ao se solidificar devido ao congelamento (PINTO, 2000).

Ruellan (1988) identifica que a palavra solo origina-se do Latim solum = suporte, superfície, base. A concepção de solo depende do conhecimento adquirido a seu respeito, de acordo com o meio no qual se relaciona nas atividades humanas.

A Mecânica dos Solos é a aplicação das leis da mecânica e da hidráulica aos problemas de engenharia relacionados com os sedimentos e outros depósitos não consolidados de partículas sólidas produzidas pela desintegração mecânica ou química das rochas, prescindindo do fato de conterem ou não elementos constituídos por substâncias orgânicas (Caputo, 1996, p.10 apud TERZAGHI).

A estrutura de um solo pode ser considerada o arranjo e ordenamento das partículas no interior da massa de solo, variando-se o arranjo, varia-se a estrutura do solo, sendo que, o arranjo depende diretamente do tamanho e forma dos grãos, bem como a constituição química dos minerais presente nos grãos.

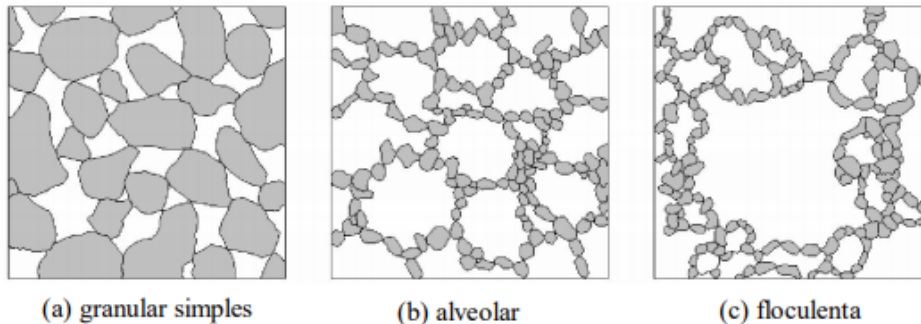
Considerando a ampla gama de fatores que influem na sua formação, os solos podem ter composições químicas muito distintas, a começar pela rocha-mãe, que pode ser ígnea, sedimentar ou metamórfica, com diferentes perfis mineralógicos. Nos solos, os componentes minerais podem ser divididos em dois grupos:

- (i) minerais primários, que provêm da rocha mãe e não sofreram modificação química; e

- (ii) minerais secundários, produtos da transformação ou decomposição dos minerais primários durante a pedogênese (Lawton, 1963).

Segundo Terzaghi (1950) , os solos são definidos conforme seus arranjos estruturais sendo assim os mais comuns: granular simples, alveolar ou em favo e floclenta. Tais tipos são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de estruturas do solo



Fonte: Terzaghi (1950)

Em relação as dimensões das partículas, França (2003) notou em seu trabalho que não são muito variáveis, sendo designadas pelas frações: pedregulho, areia, silte e argila. Sendo que os limites dessas frações podem apresentar pequenas variações de acordo com a Norma ou escala utilizada.

Terzaghi (1973) aponta que os solos se divide em três tipos, os de granulometria grossa, os de granulometria fina e os solos orgânicos. Além disso os distinguem em seis grupos, pedregulhos, areias, siltes inorgânicos e areias finas, argilas inorgânicas e solo orgânico.

Assim o Quadro 1, apresenta o resumo do sistema unificado de classificação dos solos de acordo com Terzaghi.

Quadro 1 - Resumo do Sistema Unificado de Classificação de Solos

Classificação Geral	Tipos principais
Solos grosso	Pedregulho ou areia (solos arenosos)
Solos finos	Siltes ou argila
Solos altamente orgânicos	Turfa

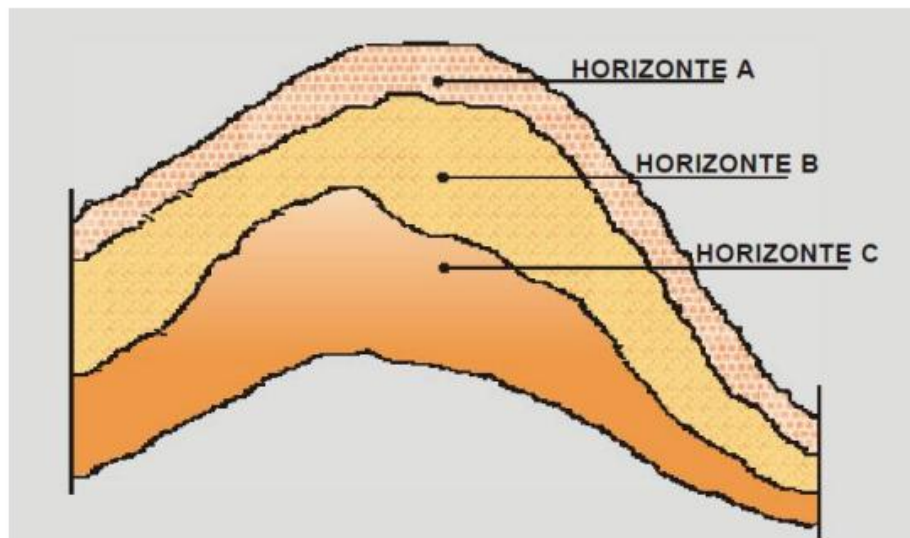
Fonte: adaptado Terzaghi (1973)

A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6502 (ABNT, 1995), menciona que as dimensões constituintes das frações de solo da crosta terrestre

são: pedregulho, partículas com dimensões entre 60,0 a 2,0 mm; areias possuindo dimensões entre 2,0 a 0,06 mm, siltes com dimensões entre 0,06 e 0,002 mm e inferiores a 0,002 m são designadas as argilas.

Macedo (2004), afirma que a característica do solo, da crosta terrestre estão distribuídos em três camadas, denominadas de horizonte. As camadas do solo são apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Horizontes constituintes do solo



Fonte: Macedo (2004)

Os horizontes possuem propriedades que resultam em efeitos atuantes no solo, como por exemplo a textura, a cor, consistência, atividade biológica e o tipo de agregado presente. Além disso, a natureza e o número de horizontes são variáveis, é podem ser completo ou não (CASTRO,1991).

Para Lozano (2016), é importante conhecer a composição, a estrutura do solo, seus índices físicos e propriedades como resistência, compressibilidade, permeabilidade, entre outras, pois nos projetos são necessárias essas propriedades para o dimensionamento adequado para seus fins usuais.

O maciço rochoso é um termo utilizado para descrever todos os componentes inerentes à rocha e ao seu comportamento geomecânico. Os componentes constitutivos do maciço incluem a formação geológica, a presença de feições estruturais como falhas, dobramentos, contatos geológicos, entre outros, a qual o estado de tensões a que o maciço é submetido *in-situ*, a presença de água subterrânea na rocha, e a resistência da mesma às diversas solicitações como

compressão, tração e cisalhamento. A caracterização do maciço é a forma encontrada para tentar compreender a influência da combinação de todos esses fatores e prever o comportamento geomecânico da rocha intacta quando submetida a novas condições decorrentes da atividade minerária ou da construção civil.

Segundo Gerscovich (2016), os taludes quando as naturezas podem ser classificadas como: naturais e artificiais. Em relação a forma o talude pode ser de face plana ou curvilínea (côncava ou convexa), o formato será escolhido para favorecer o fluxo superficial da água, além disso, explica que os taludes artificiais são formados por meio de cortes em encostas de escavação ou de lançamento de aterros, de solo ou de rejeitos.

Através das sondagens, é possível recolher amostras e analisa-las, determinando-se por exemplo: a resistência e a condutividade hidráulica do solo.

De acordo com Pereira (2009), as pilhas de estéril permite a passagem de água em seu interior através do efeito de percolação, essa condutividade hidráulica dentro da pilha e um fator de risco crítico para esse tipo de estrutura, a sondagem permite também determinar as propriedades do material, inferir o nível de água (NA).

Através de resultados obtidos a partir das análises das amostras, pode-se obter todo o perfil geológico-geotécnico do solo, então é possível compará-lo com o perfil geológico-geotécnico regional.

3.2 CENÁRIO DA MINERAÇÃO NO BRASIL

De acordo com Goedert e Corrêa (2004), o solo é entendido pelo ramo da mineração como o detrito que cobre as rochas, a qual deve ser retirado para acessar o subsolo e extrair o produto mineral, sendo necessário a remoção da camada superior denominada de estéril, sendo o descarte executado geralmente em forma de pilhas e bota-fora próximas a áreas da mina (FORNASARI FILHO et al., 1981; PILLON et al. 2010).

A mineração é o conjunto de atividades e processos cujo objetivo é a extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais. Para o entendimento das questões relacionadas à geração e disposição de resíduos da mineração é necessário apresentar alguns conceitos básicos e os processos fundamentais da mineração.

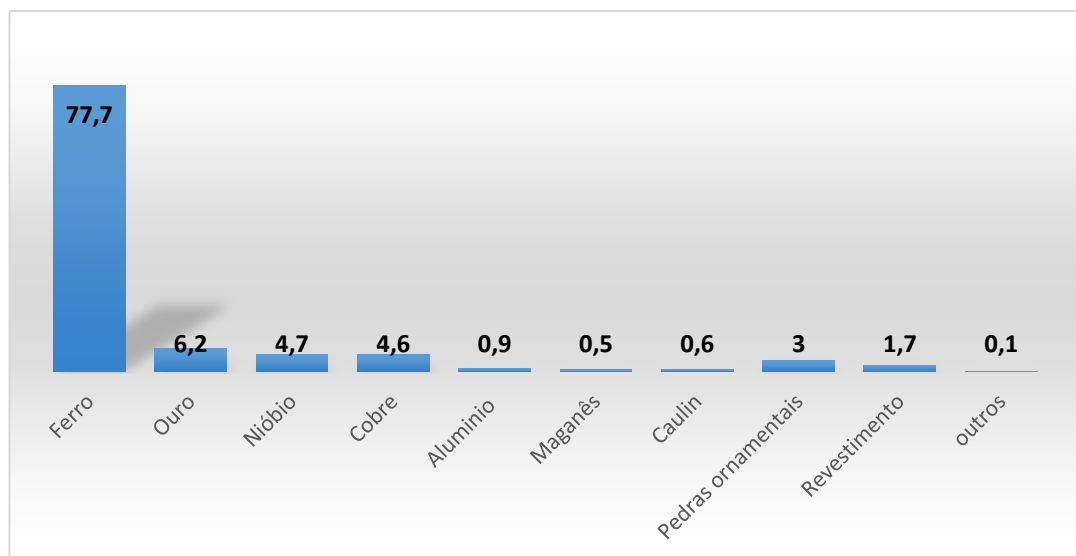
De acordo com o (ICMM, 2014), o Brasil foi um dos maiores produtores mundiais de minérios. O Ferro, destaca-se como um dos materiais minerais produzidos no país, destacam-se o ferro, o ouro, o nióbio, o cobre, a bauxita e o manganês.

O setor minerário exerce importante papel na economia brasileira, pois colabora para o aumento do produto interno bruto (PIB), assim como para geração de empregos diretos e indiretos (QUARESMA, 2014).

De acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral, o minério de ferro é o mineral metálico com maior volume de produção. Já entre os minerais não metálicos, os agregados para construção civil (brita, cascalho, areias e calcário). A indústria extrativa mineral no Brasil correspondeu, somente no segundo semestre de 2014, a 16% das exportações nacionais. Destes, somente o minério de ferro é responsável por 12% das exportações brasileiras (DNPM, 2014).

A Figura 3 apresenta conforme dados disponíveis pela (DNPM, 2014), na composição das exportações da indústria extrativa mineral no período do primeiro semestre do ano de 2014 e mostra que a participação do minério de ferro é de 77%.

Figura 3 - Distribuição das exportações por produto (1º semestre/2014)



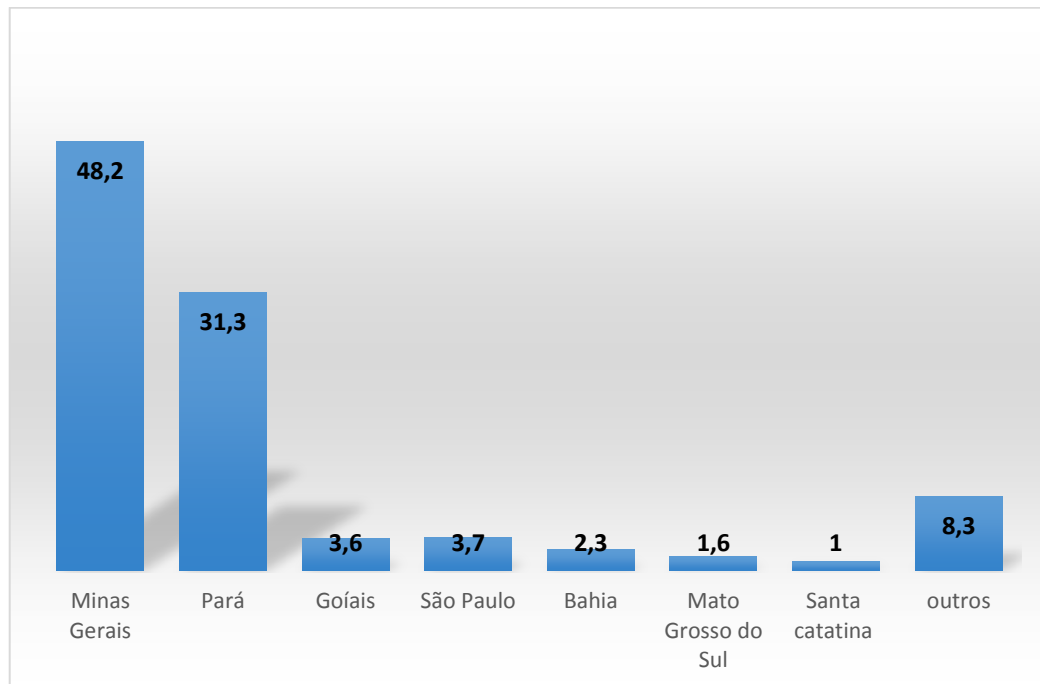
Fonte: Adaptado (DNPM, 1º/2014)

O Brasil é o segundo maior fornecedor mundial de minério de ferro, atrás apenas da Austrália, segundo pesquisa realizada por (USGS, 2013).

Conforme (DNPM, 2014) os estados com as maiores arrecadações foram Minas Gerais (48%) e Pará (31%), grandes produtores de minério de ferro. No

ranking dos dez municípios que mais geraram receitas de Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM) nove municípios são produtores de minério de ferro, sendo 8 pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, conforme Figura 4. Juntos, estes municípios arrecadam mais de 65% de toda a CFEM nacional.

Figura 4 - Distribuição da CFEM



Fonte: Adaptado (DNPM, 2014)

Conforme (IBRAM, 2016) o Brasil exportou um volume de mais de 394 milhões de toneladas de bens minerais, gerando divisas de US\$ *Free On Board* (FOB) 21,6 bilhões. Em 2016, esse valor correspondeu a 11,6% das exportações totais do país e a 33,8% do saldo da balança comercial.

Na mineração, destaca-se como principal fator de riscos e impactos ambientais a existência de:

- a) Resíduos sólidos de extração, em geral deixados na área da própria mina, o chamado estéril;
- b) Resíduos do tratamento/beneficiamento, chamados de rejeito. A gestão desses resíduos inclui o planejamento e a destinação dos resíduos gerados, seja a adequada disposição, seja a recuperação ou o reaproveitamento,

além do monitoramento das estruturas de deposição e dos resíduos depositados.

A Tabela 1, Sustentabilidade Socioambiental da Mineração (2018), apresenta dados da geração de estéril e da produção de minério de ferro no Brasil, com base nos relatórios anuais de lavra apresentados em estimativas de produção futura.

Tabela 1 - Produção de Minério e geração de estéril / milhões de toneladas

Ano	Produção beneficiada no Brasil	Produção beneficiada em MG	Estéril Brasil
2010	298	207	255
2011	372	260	321,5
2012	398	275	343
2013	401	277	347
2014	386	265	333,5
2015	420	275	356
2016	430	283	360
2017	470	280	380
2018	520	280	405
2019	530	290	415
2020	540	300	420
2021	540	300	425
2022	550	310	435
2023	550	310	435
2024	560	320	445
2025	560	320	445
2026	560	320	445
2027	570	330	455
2028	570	330	455
2029	580	340	465
2030	580	340	465
Soma	8110,0	4653,0	6455,0

Fonte: Sustentabilidade Socioambiental da Mineração 2018.

No Brasil, a predominância de lavra a céu aberto é absoluta, sobretudo, em virtude dos megaprojetos de minérios metálicos, principalmente minério de ferro. Os minérios podem ser explorados a seco ou via úmida por meio de métodos de lavra a céu aberto ou subterrâneo. Os principais métodos de lavra a céu aberto são aqueles de exploração a seco, qual seja: lavras por bancadas (*open pit mining*), lavra em tiras ou fatias (*strip mining* ou *open cast mining*) e lavras de pedreiras (*quarry mining*) (CURI, 2017).

3.3 RESÍDUOS SÓLIDOS DE EXTRAÇÃO – ESTÉRIL

Cetesb (2002), define resíduo como qualquer material inútil, indesejável ou descartado, na forma sólida, líquida ou gasosa, de origem domiciliar, industrial, agrícola, comercial, de serviços ou de serviços de saúde.

No ramo da mineração, o estéril de minério é considerado como um material proveniente do decapeamento superficial da lavra, são denominados estéril e devem ser mantidos na própria mina, em geral em pilhas, ou utilizados no preenchimento de cavas exauridas (IBRAM, 2016).

Forgearini (2015) define como estéril um aglomerado de minerais sem ou com baixo valor econômico, no qual é retirado da área de lavra para garantir acesso ao minério a ser explorado.

O estéril, geralmente é classificado como resíduo não perigoso inerte (classe, II-B). No entanto, é importante ressaltar que, depende da natureza mineralógica do estéril, este material pode ser classificado como não inerte ou mesmo perigoso.

Borma e Soares (2002), define que a composição mineralógica dos rejeitos está diretamente ligada à qualidade do efluente. As reações entre minerais dependem da composição mineralógica do rejeito e das propriedades químicas da água, como o pH e o oxigênio dissolvido.

Pode-se citar o fenômeno que o estéril pode ser composto por minerais sulfetados, encontrados naturalmente em ambientes redutores, que quando expostos na superfície podem resultar em impactos importantes como a geração de drenagem ácida e a liberação de metais (LUZ et al., 2004).

O estéril da mineração pode ser classificado como estéril ou espólio e como rejeito, também conhecido como "*finings Waste rock*". A diferença fundamental está no tamanho das partículas. De acordo com Younger et al. (2002), o estéril apresenta tamanho de grãos entre 1 mm – 50 mm; enquanto os rejeitos podem ser caracterizados como apresentando grãos finos (< 1 mm). Além disso os estéreis da mineração normalmente são secos em pilhas enquanto os rejeitos são depositados em bacias de decantação em forma de polpa (YOUNGER et al., 2002).

O Instituto Brasileiro de Mineração, determina que os estéreis são geralmente aqueles materiais que:

- a) não existe possibilidade de aproveitamento econômico (estéril-franco ou estéril-nato);
- b) não possuem valor econômico ou seu valor não é momentaneamente significativo (minério marginal);
- c) não possuem rota de processo industrial conhecida (minério não-processável);
- d) não atendem às especificações de qualidade da rota de processo implantada (minério contaminado).

O volume de estéril gerado depende das características geológicas da região da lavra e é determinado pela relação entre o número de unidades de estéril a remover para cada unidade de minério bruto lavrado (ROM), designado como *stripping ratio*. Essa relação, além de ser utilizada para o cálculo do volume de estéril das frentes de lavra, serve ao planejamento da área e dos parâmetros de disposição desse resíduo (FORGEARINI, 2015).

Um dos principais impactos decorrentes do volume de estéril gerado diz respeito à alteração física da paisagem na mina. Em operação dos depósitos ou pilhas de estéril, tem avançado a adoção de critérios geotécnicos de controle.

Sustentabilidade Sociambiental da Mineração (2018), demonstra os dados apresentado pela CRU Internacional (2017), a *stripping ratio* média das minas brasileiras de minério de ferro foi de 1,2, em 2016. (IBRAM, 2016). Esse valor está abaixo da média mundial (1,44) e da Austrália (1,72), que eleva a média mundial. A baixa relação estéril/ROM observada no Brasil reflete as vantagens das formações geológicas brasileiras, que permitiriam maior participação de minas com aflorações de minério próximas à superfície.

Conforme os dados acima apresentado por Sustentabilidade Socioambiental da Mineração (2018), o Brasil tem uma baixa taxa de geração de estéril quando comparado aos demais países produtores. Apesar disso, os altos volumes de produção de minério de ferro foram responsáveis por um volume de estéril superior a trezentos milhões de toneladas em 2014, conforme dados compilados dos relatórios anuais de lavra apresentados ao DNPM, (2001).

O estéril proveniente da cava do minério deverá ser extraídos, identificados, removidos, transportados e estocados, geralmente sob formar de pilhas, que podem ser desenvolvidas por dois métodos, os ascendentes (de baixo para cima), ou os descendentes (de cima para baixo que são os métodos de ponta de aterro), devido a

heterogeneidade do estéril deverá ser analisado os seguintes critérios, coesão, ângulo de atrito, peso específico e ângulo natural de estabilidade dos materiais que englobam o estéril como um todo conforme (FORGERINI, 2015).

De acordo com a Norma Regulamentadora da Mineração - NRM 19, Forgearini (2015) descreve alguns aspectos relevantes a respeito da construção de pilhas de estéril são descritas na DNPM e estão apresentados a seguir:

- a) para a construção de depósitos de estéril, rejeitos e produtos deve ser antes realizado estudos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos;
- b) os depósitos de estéril devem ser construídos com dispositivos de drenagem interna de forma que não permitam a saturação do maciço;
- c) a estocagem definitiva ou temporária de estéril e materiais diversos proveniente da mineração deve ser realizada com o máximo de segurança e o mínimo de impacto no ambiente. A Norma Brasileira NBR 13029 (ABNT, 2006) assim como a sua versão atualizada da ABNT NBR 13029 ABNT, 2017) – Associação Brasileira de Normas Técnicas determina como deve ser executada a disposição de estéril em pilhas na mineração, deixa claro os melhores lugares para a disposição do material estéril, como dentro da própria cava da mina, ou o mais próximo possível, de preferência em áreas já degradadas e dentro dos limites legais do empreendimento.

Para Caputo (1996), a água é um dos fatores mais importantes em estudos de estabilidade. Na natureza a água pode e apresentar pressão positiva ou negativa e estar em movimento ou não (hidrostática) sob condição de fluxo. A influência água na estabilidade pode ser atribuída a:

- a) mudança nas pressões, altera a tensão efetiva e, conseqüentemente, a do solo;
- b) varia o peso da massa, em função de mudanças no peso específico;
- c) desenvolvimento de fluxo, gera erosões internas e/ou externas ;
- d) atua como resistência agente no processo de intemperismo, promove alterações nos minerais constituintes

O fluxo de água no terreno origina-se de muitas fontes, mas principalmente da chuva e da neve, como resultado do ciclo hidrológico, esquematicamente representado parte do volume de água precipitado atinge diretamente o solo, parte cai em rios, lagos e mares, e parte é interceptada pela vegetação. Do volume de água que é interceptado pela vegetação, parte retorna

para a atmosfera por evapotranspiração e o restante ou é absorvido pela própria vegetação ou cai no terreno. Do volume de água que cai na superfície do solo, parte infiltra e parte flui superficialmente (runoff) ou fica retido em depressões superficiais.

A infiltração de água no solo altera as condições de umidade da região não saturada, podendo inclusive alterar a posição da superfície freática (CAPUTO,1996).

3.5 PROJETO DE PILHA DE ESTÉRIL A CÉU ABERTO

As pilhas de estéril são estruturas geotécnicas formadas pela disposição e empilhamento dos materiais estéreis provenientes do processo de lavra, forma um talude. De modo geral, é possível afirmar que as pilhas de estéril são as estruturas de disposição de resíduos mais simples que existem, parecido com um aterro não controlado, de uma maneira geral (ANGLOGOLD ASHANTI, 2008).

A atividade de lavra condiz à extração do minério da crosta terrestre e durante o processo de lavra, é extraído também o estéril, material que não possui o mineral de interesse ou cujo teor do mineral de interesse fica abaixo da concentração econômica. Sabe-se que o processo de lavra pode ser realizado a céu aberto ou subterrâneo. Na maioria, as minas a céu aberto resultam em uma geração de estéril muito maior do que minas subterrâneas, já que nestas, a lavra se restringe ao próprio corpo de minério (SILVA *et al*, 2011).

A disposição de rejeitos em forma de pilha ainda é a técnica comumente usada no Brasil e requer grandes estruturas de terra para sua disposição. Além disso, sabe-se que esse tipo de disposição tem um grande potencial de impactar o meio ambiente no caso de ocorrência de algum sinistro (COSTA, 2017).

O estéril nas minas a céu aberto é extraído basicamente para dar acesso ao corpo de minério, denominando material proveniente de decapeamento. Normalmente, o estéril é representado por solos e rochas de naturezas diversas, com diferentes características granulométricas. Este material é, geralmente, disposto em estruturas denominadas pilhas de estéril (LUZ *et al.*, 2004).

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.

Segundo o trabalho de Silva *et al.* (2011), o sistema de deposição de estéril deve funcionar como uma estrutura projetada e implantada para acumular materiais, em caráter temporário ou definitivo, dispostos de modo planejado e controlado em condições de estabilidade geotécnica e protegido de ações erosivas, de modo mitigar a geração de resíduos e movimentos de massa. Vale ressaltar que, para Bates (2002), pilhas de estéril embora compostas por vários tipos de materiais, desde que não sejam argilas ou solos pantanosos, costumam ser estáveis.

O material estéril constituinte da pilha é muito heterogêneo, granulometricamente variando desde areia até matacões, entretanto, segundo Bates (2002), esta é uma característica inerente deste tipo de construção, pois é natural que haja uma menor atenção quanto aos processos de controle granulométrico nos desmontes de decapeamento.

A NBR 13029 (ABNT, 2017), que regulamenta os procedimentos que devem ser adotados para a construção de pilhas de estéril, foi publicada em 1993 e atualizada em 2017, sofrendo modificações na forma de abordagem das especificações construtivas, já que a primeira versão trazia recomendações específicas de ângulos de bermas, taludes e terreno de fundação, a versão atualizada recomenda apenas fatores de segurança. Porém, considera-se que a versão de 1993 apresenta importantes recomendações quanto às “boas práticas” aplicadas à pilha de estéril.

A heterogeneidade é um complicador no que diz respeito à determinação de propriedades como coesão e ângulo de atrito interno, dados indispensáveis ao cálculo do FS, que são fornecidos por tabelas de referência tradicionais somente para materiais de granulometrias específicas (COSTA, 2017).

Contudo, em um trabalho publicado por Zhou *et al.* (2013), dispôs diversos valores para coesão e atrito interno de misturas de materiais em construções hídricas na China. Daí, adotaram-se os menores valores citados, tendo em vista uma margem de segurança na estimativa, sendo a coesão de 10 KPa e o ângulo de atrito interno de 25°. O peso utilizado foi informado pela empresa, sendo de aproximadamente 19 KN/m.

Além disso, os projetos de pilha de estéril que definidos pela NBR 13029:2017, que estabelece a necessidade de estudos locacionais, hidrológicos e hidráulicos e geológico-geotécnicos. Os estudos hidrológicos e hidráulicos são utilizados para o dimensionamento de estruturas de drenagem, interna e externa

(superficial) da pilha e de estruturas de contenção de sedimentos (diques) que eventualmente venham a ser instaladas.

Forgearini, (2015, apud NBR 13029 (ABNT, 2006), menciona normatização e destacar as seguintes boas práticas, importantes no contexto do presente trabalho:

- a) altura máxima de bancos de 10 m;
- b) largura mínima de bermas de 6 m;
- c) altura máxima da pilha de 200 m;
- d) ângulo de taludes inferior ao ângulo de repouso do material;
- e) ângulo mínimo de inclinação longitudinal das bermas de 1% e transversal de 5%;
- f) leiras nas cristas dos bancos;
- g) sistema de retenção de sedimentos oriundos da erosão;
- h) execução da pilha de forma ascendente;
- i) disposição do material o mais próximo possível da cava, se possível, dentro da mesma ou em áreas já impactadas;
- j) deve-se evitar dispor o material em vales com inclinação superior a 18° , áreas de preservação permanente (APP), terrenos instáveis, áreas com vegetação nativa exuberante, áreas com solo fértil;
- k) fator de segurança para condições normais de superfície freática de 1,5;
- l) fator de segurança para taludes entre bermas de 1,5;
- m) bermas devem ter largura suficiente para atender às considerações de drenagem e garantir acesso de equipamentos de manutenção com segurança;
- n) aplicação de revestimento superficial (vegetação) em bermas, plataformas e taludes;
- o) a disposição de estéril, rejeitos e produtos devem ser previstas no Plano de Aproveitamento Econômico – PAE;
- p) a construção de depósitos de estéril, rejeitos e produtos deve ser precedida de estudos geotécnicos, hidrológicos e hidrogeológicos;

É essencial uma boa elaboração de projeto referente a pilhas, já que problemas com a instabilidade 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.

Conforme as dimensões da pilha de estéril aumenta, as tensões ali impostas torna-se maior a possibilidade de ruptura (KENT,1992). $FS < 1$.

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.

De acordo com Robertson et al (1985), são diversos os fatores que contribui para vulnerabilidade da pilha de estéril entre eles às condições de oxidação, percolação, lixiviação e erosão.

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, (2001) – “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.

Costa (2017), explica que em relação a drenagem em pilhas, os drenos, estruturas comuns a todos os métodos construtivos, são responsáveis por prevenir excessos de poropressão devido ao fluxo de água. As forças de poropressão são forças favoráveis ao movimento. Caso não haja eficiência no sistema de drenagem em direcionar o fluxo na barragem, podemos ter a ocorrência do fenômeno chamado *piping*, definido como a erosão interna que provoca a remoção de partículas do interior do solo, formando “tubos” vazios que provocam colapsos e escorregamentos laterais do terreno. Este fenômeno é descrito por Marques Filho e Geraldo (2002), ocorrendo em solos pouco coesos onde o gradiente hidráulico é maior que a coesão do solo.

O comportamento dos rejeitos pode ser definido através de estudos fundamentados na mecânica dos solos clássica, sendo que, as suas particularidades devem ser consideradas, pois os rejeitos são de formação recente e lançados logo depois de gerados. Os rejeitos devido a sua susceptibilidade a liquefação, erosão interna, *piping* e dificuldade de compactação devem ser analisados através de métodos geotécnico (LOPES, 2000).

Pelo mostrado, é indispensável a realização de estudos geológico-geotécnicos visando a caracterização dos materiais de uma pilha, objetivando as análises de estabilidade e o projeto geométrico. De acordo com Pulino (2010), são realizadas sondagens para caracterização geotécnica dos materiais presentes nas pilhas, ensaios de *Standard Penetration Test* (SPT), permeabilidade e determinação da profundidade do nível d'água.

As pilhas de estéril são geralmente construídas em talwegues ou encostas situadas nas proximidades imediatas da lavra de modo a minimizar os custos de transporte deste material. Outra possibilidade é dispor o material estéril em cavas vizinhas exauridas ou mesmo em áreas exauridas da cava.

O projeto de uma pilha de estéril deve conter basicamente o arranjo geométrico, o dimensionamento do sistema de drenagem (interna e superficial), as análises de estabilidade, o plano de monitoramento e o plano de desativação (PULINO, 2010).

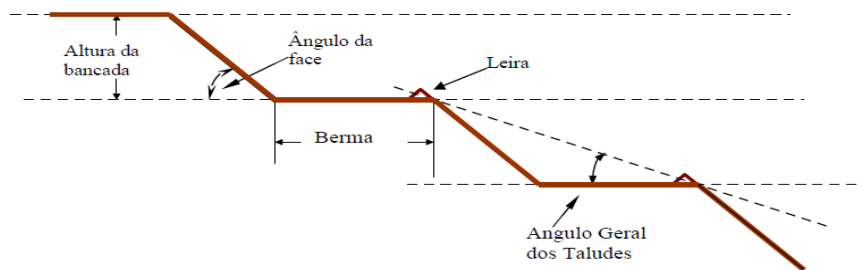
Segundo o trabalho realizado por Petronilho (2010), para o estudo do comportamento de uma pilha de estéril, são instalados diversos instrumentos ao longo de uma dada seção representativa do empilhamento. Esta instrumentação é composta geralmente por piezômetros e marcos superficiais, visa à medida de poropressões e qualidade da água subterrânea e de deslocamentos, respectivamente.

A estrutura de uma pilha de estéril, compreende basicamente os parâmetros geométricos: altura das bancadas, largura mínima das bermas e inclinação de taludes Figura 5. A geometria da pilha é condicionada basicamente pela topografia da área de implantação e pelas características geotécnicas do material estéril (GOMES, 2006).

Gomes (2006), apresenta o seguinte exemplo de geometria típica de pilha de estéril:

- a) altura de bancada: 10,0 m;
- b) largura das bermas: 5,0 m;
- c) ângulo de face do talude: 30°

Figura 5 - Estrutura de pilha de estéril



Fonte:Teixeira (2011)

Segundo Hawley *et al* (2003), o projeto de uma pilha de estéril possui vários desafios técnicos. Primeiramente em relação a qualidade das rochas, tais são variáveis, sendo mais de 50%, em geral, compostas por materiais com alta tendência para degradação mecânica e saturação. Além do material constituinte, a fundação da pilha, a sua locação em terreno adequado e preferencialmente perto da mina, as condições climáticas e de precipitação da área, a estabilidade da disposição de modo a se evitar uma ruptura ou deslizamento dos taludes da pilha.

Além disso, o autor destaca que questões relacionadas práticas de planejamento de mina, como controle de disposição do estéril, caracterização, rotas de transporte para cada tipo de estéril, sequenciamento da pilha com o plano da mina, controle de qualidade e restrições ambientais são essenciais.

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 (COSTA, 2017).

A atual versão da norma NBR 13029 (ABNT,2017), 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, este é o fator que determinante da altura máxima do depósito (CARVALHO, 2009).

O método construtivo adotado no estudo de caso é ascendente, destacado por Carvalho (2009), mostrado na Figura 6 conforme a NBR 13029 (ABNT,2017). O método consiste em formar banco no fundo de um vale em direção à cabeceira, a partir do basculamento do estéril pelos caminhões, com posterior operação de espalhamento por tratores de esteira. O próprio tráfego dos equipamentos provoca a compactação do material, preconizado como suficiente para a estabilização da pilha.

Figura 6 - Croqui da fase de lançamento do método ascendente de disposição de estéril.



Fonte: Vale (2000).

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 (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).

Ressalta-se 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 (COSTA, 2017).

Os sistemas de drenagem externa ou de superfície objetiva a condução como das águas do escoamento superficial para fora da estrutura, evitando o acúmulo de água na superfície da pilha e, conseqüentemente, a infiltração, além de minimizar a ocorrência de processos erosivos. Como exemplos de estruturas típicas de drenagem superficial de pilhas de estéril tem-se as canaletas, descidas d'água e dissipadores de energia. Já o sistema de drenagem interna de pilhas de estéril possui como objetivo evitar o acúmulo de água no interior da pilha, drenando a água que infiltra, evitando, assim o aumento da poropressão e melhorando sua estabilidade geotécnica, destaca-se estruturas mais usuais de drenagem interna o tapete drenante e o enrocamento de pé (PULINO, 2010).

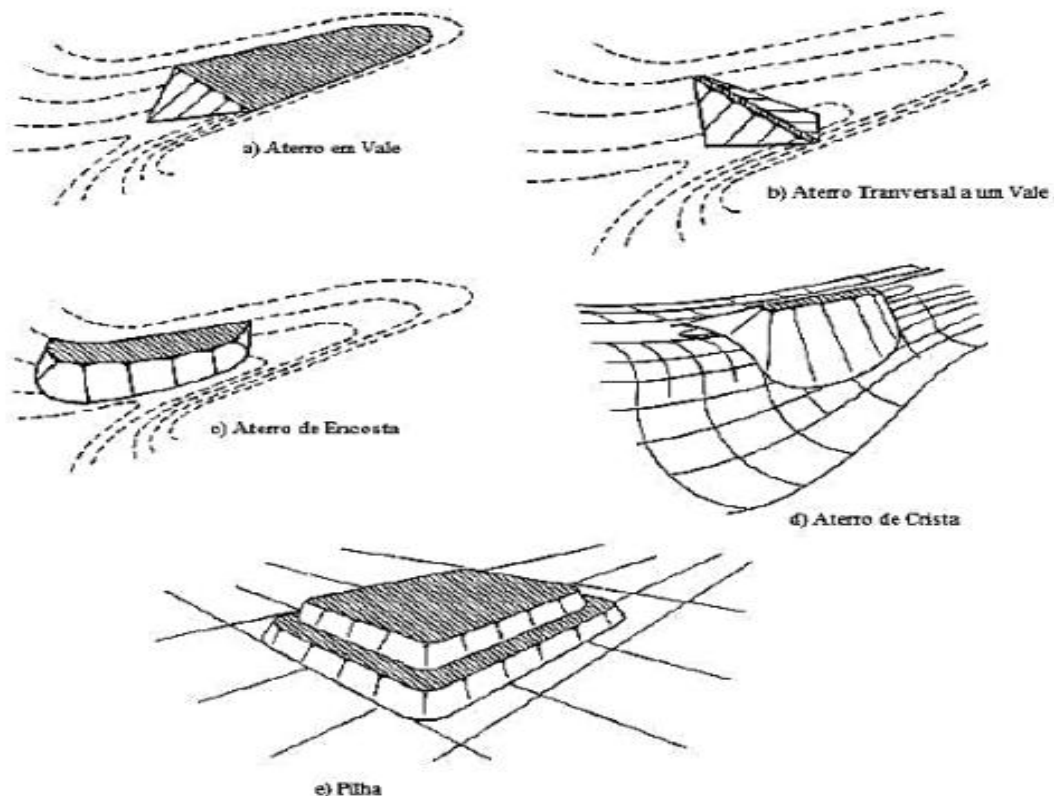
Segundo Carvalho (2009), o método ascendente, é o mais recomendado pela norma técnica NBR 13029 (ABNT, 2017). Os bancos são formados a partir do fundo de um vale em direção à cabeceira, a partir do basculamento do estéril pelos caminhões, com posterior operação de espalhamento por tratores de esteira. O próprio tráfego dos equipamentos provoca a compactação do material, preconizado como suficiente para a estabilização da pilha.

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.

A configuração do tipo aterro em vale compreende a disposição do estéril em um vale, preenche 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*). É apresentado na Figura 7 as principais configurações de pilha de estéril existentes.

Figura 7 - Configuração de pilhas de estéril



Fonte: Aragão (2008)

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 está 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).

Antes que se inicie a formação da pilha, deverá ser procedida a limpeza da fundação que consistirá do desmatamento e destocamento da área, como também a remoção do solo superficial rico em compostos orgânicos que deverá ser reaproveitado em outras áreas para recobrimento de taludes que serão revegetados. A remoção deste solo mole também favorece a estabilidade pois esta camada pode funcionar como um lubrificante entre a fundação e o material disposto. No fundo dos vales deverão ser executados os serviços de drenagem e desvio dos cursos d'água existentes. Caso ocorram cursos d'água perenes sob a pilha, os mesmos deverão ser captados e desviados através de tubulações adequadas, ou drenados com blocos de rocha, envolvidos por transições filtrantes (COSTA, 2017).

A instalações de drenos, em alguns casos, para aumentar a estabilidade pode ser necessária a execução de um tapete drenante no contato com a fundação, próximo à primeira bancada. Todos os drenos de fundo deverão ser conduzidos até o enrocamento de pé, cuja função é evitar erosões e taludes de praia. Após terminadas as obras de infra-estrutura o estéril poderá ser empilhado (COSTA, 2017).

De acordo com Eaton et al. Aragão (2018), os depósitos espessos de solos orgânicos ou turfosos devem ser removidos favorecendo assim a estabilidade, pois estas camadas podem funcionar como uma superfície desfavorável entre o terreno de fundação mais resistente e o material da pilha. Quando os depósitos de solos moles são pouco espessos e a remoção seria a opção óbvia, análises devem ser realizadas a fim de se verificar se o processo de disposição de estéril deslocará ou adensará, suficientemente, o terreno de fundação fraco. Caso positivo, a remoção ou outras medidas de remediação podem ser evitadas.

Ressalta-se que de acordo com Hashui (1990), a escolha do método construtivo mais adequado está associada a diversas questões, tais como, as características geotécnicas dos depósitos, a utilização a área, os prazos construtivos e os custos envolvidos.

3.5 DRENAGEM EM PILHAS DE ESTÉRIO

A água de origem pluvial pode causar danos diversos às grandes obras de engenharia (como estradas, pilhas de material estéril e cavas de mineração) e tem potencial devastador em centros urbanos se for negligenciada (CANHOLI, 2014).

Para Ricardo (2007), os sistemas de destinação de estéril em forma de pilhas, possuem como característica básica o lançamento dos resíduos no solo sem preocupação com a compactação das células diárias, como plataformas, formando uma massa de resíduos disforme sem geometria definida adquirir aspecto visual negativo, bem como outros inconvenientes. Para adequação e garantia da estabilidade da pilha, necessário o levantamento morfológico atualizado das condições do local, cadastrando todos os elementos importantes para a elaboração do projeto de caracterização da área destacando principalmente os cursos d'água.

O levantamento planialtimétrico da área mostra em planta a situação atual do relevo do maciço, área total das pilhas, bem como todas as interferências locais e entorno através de curvas de nível de metro a metro em escala compatível (RICARDO, 2007).

Este estudo é condição básica para fundamentar os outros serviços a serem desenvolvidos para a efetivação do projeto de caracterização da área, em especial para a amarração dos furos de sondagens mecânicas, geofísica, reconfiguração da geometria final do maciço, drenagens projetos finais, etc.

Ricardo (2007) cita que através do levantamento planialtimétrico, todos os cursos d'água no local e entorno devem ser levantados fornecendo o sentido de caminamento das águas. Outro elemento importante no cadastramento das águas superficiais são os canais de drenagens naturais que alimentam os cursos d'água e que geralmente são interceptadas pelos aterros causando impactos em toda a área e entorno.

À medida que as áreas de disposição aumentam em função da evolução da pilha, aumentam também o volume de águas que escoam superficialmente, justificando assim a elaboração de um projeto que contemple o aumento da capacidade hídrica dos canais e cursos d'água existente (RICARDO, 2007).

Canholi (2014) apontam que sistemas de drenagem superficial são complexos e compostos por diversos componentes distintos, cada qual responsável por uma ação específica. Khatsuria (2014) destaca o correto dimensionamento de cada uma

dessas estruturas hidráulicas que compõem um sistema de drenagem, afirma que para o correto comportamento do todo, cada peça deve estar correspondendo corretamente.

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 (COSTA, 2017).

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 (COSTA, 2017).

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, necessário o uso de manta geotêxtil (*Bidim*) para evitar a colmatação da drenagem (COSTA, 2017).

3.5.1 Elementos de drenagem aplicados em pilhas de estéril

Os primeiros drenos verticais utilizados eram de areia que posteriormente foram substituídos por drenos pré-fabricados, denominados drenos fibroquímicos e

geodrenos. Os drenos de areia foram utilizados inicialmente em fins de 1920, na Califórnia, Estados Unidos, e no ano de 1970, começaram os pré-fabricados (VARAKSIN, 2010).

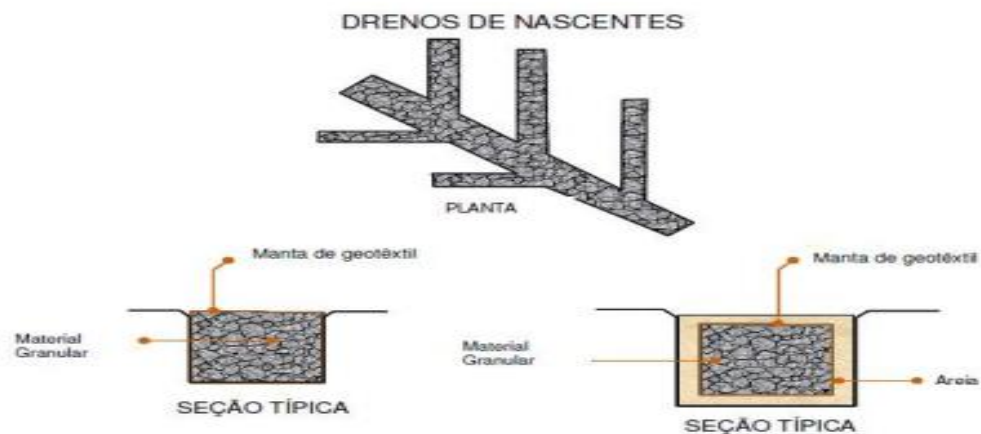
A execução dos drenos requer cuidados especiais para minimizar o amolgamento em solo em volta dos drenos, o qual leva a uma indesejável redução da sua permeabilidade, e evitar o seccionamento dos próprios drenos quando da retirada dos tubos do terreno. Esses problemas podem reduzir a zero a eficiência dos drenos (VARAKSIN, 2010).

A água, como agente ativo, atua no processo de erosão através do efeito de infiltração e de escoamento. Em pilhas de estéril, as águas irão infiltrar mais comumente, nas fraturas, permiti a movimentos é remoção de materiais quando a umidade excessiva provoca a perda de coesão do solo, exce os limites de plasticidade ou de liquidez (GOMES, 2001). No caso das as águas de escoamento, elas veiculam pela superfície do terreno, em enxurradas de forma difusa, laminar ou concentrada, provocando a formação de ravinas, que podem evoluir para voçorocas.

O controle da drenagem sobre as pilhas de estéril é importante, especialmente em épocas de chuva e regiões com elevados índices pluviométricos. A água não deve escorrer livremente, especialmente para o lado externo do barramento, provocando erosões que podem progredir rapidamente (RICARDO, 2007).

De acordo com Carvalho (2009), os drenos assumem a forma de uma espinha de peixe Figura 8 e é conveniente que os mesmos sejam direcionados até o enrocamento de pé, com a finalidade de evitar erosões.

Figura 8 - Representação dos drenos



Fonte: Carvalho (2009)

Costa (2017) cita que 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.

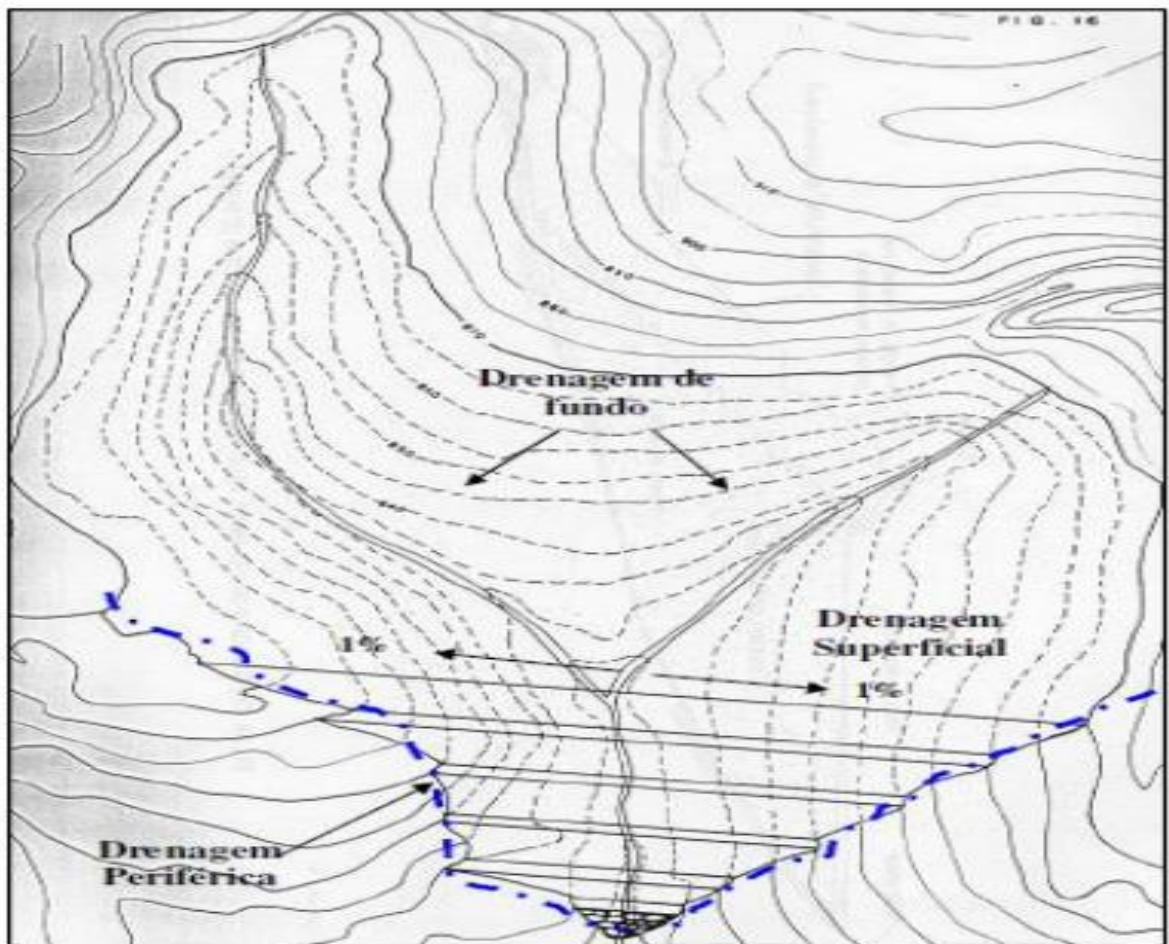
Tais dispositivos captam a água e a direcionam para fora do depósito, de forma que não haja comprometimento da estrutura. Os mais comuns são as canaletas, descidas d'água e dissipadores de energia. A ausência desses sistemas acarreta sérias consequências na segurança da pilha, uma vez que, a água infiltrada 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, é 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 (COSTA, 2017).

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 9, 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.

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 9 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 9 - Tipos de sistema de drenagem.



Fonte: Carvalho, 2009.

4 METODOLOGIA

A pesquisa qualitativa se preocupa com a compreensão das variáveis de um evento, e não com a frequência de ocorrência. O método do estudo de caso encaixa-se como uma abordagem qualitativa e é frequentemente utilizado para coleta de dados na área de estudos de organizações, entre as vantagens da utilização do estudo de caso podemos citar a oportunidade de se desenvolverem novas teorias, além de aprofundar a compreensão de eventos reais e contemporâneos (CAUCHICK, 2010).

Foram obtidos dados através de revisão bibliográfica, acompanhamento técnico do projeto e pesquisa com profissionais da área, sendo que o acompanhamento da execução do projeto durou 06 meses.

Os dados e informações coletados, foram sistematizados de acordo com o seu grau de significância e de relevância.

Para conclusão das análises, foram realizadas investigações geotécnicas através da literatura, visando fornecer subsídio para interpretação dos resultados obtidos pelo projeto de execução do sistema de drenagem da pilha de estéril 06 (PDE-06) da mina do Andrade.

4.1 APRESENTAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A pilha de estéril 06 (PDE-06) está implantada na mina do Andrade, no município de Bela Vista de Minas (Minas Gerais), próximo à cidade de João Monlevade e distante cerca de 125 quilômetros da capital mineira.

A origem do nome da mina é atribuída ao antigo proprietário da área, um tropeiro chamado Sr. Andrade (Castro, 2014). No ano de 1935 o referido tropeiro vendeu a área da mina ao Grupo Belgo (antiga Companhia Siderúrgica Belgo Mineira), que a operou até 1972. A partir deste ano, a mina do Andrade passou a ser gerenciada pela Minerações Trindade S.A (SAMITRI), antiga mineradora do grupo, até que, em 2000, a SAMITRI foi vendida à Vale VRD e a mina voltou a ser administrada pelo Grupo Belgo. Regionalmente, a área em questão está localizada no Quadrilátero Ferrífero. Segundo Zenóbio (2000), o Quadrilátero Ferrífero é composto por três unidades litoestratigráficas, conforme a coluna estratigráfica proposta por (ENDO,1997).

A primeira unidade litoestratigráficas é formada pelo Complexo Metamórfico, que contém o embasamento cristalino, seguida das sequências vulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt*, representadas pelo Supergrupo Rio das Velhas. Na terceira unidade, sobreposta discordantemente, apresentam-se as sequências de plataformas do proterozóico inferior, que correspondem ao Supergrupo Minas, Grupo Sabará e Grupo Itacolomi, terminando com coberturas sedimentares mais recentes, denominadas de Bacias do Gandarela e Fonseca. A área de estudo do presente relatório constitui-se basicamente por litotipos atribuídos ao Grupo Sabará (Super grupo Minas), onde afloram xistos e gnaisse.

Situando-se em uma região a noroeste da lavra do Pico, porção da margem esquerda do vale do córrego da Derrubada e a jusante do paiol de explosivos, ocupando uma área total aproximada de 3,9 hectares (VOGBR, 2006).

Conforme Statum Geotecnia Ltda, a área está inserida no sinclinal Andrade onde a foliação representa a feição estrutural de maior importância na segmentação do maciço, condicionando a distribuição dos litotipos, cujos contatos estão conformados por essa feição. Devido ao intenso tectonismo de empurrão, os contatos entre os litotipos são marcados por falhas com direção aproximadamente NW–SE oblíqua em relação à direção da foliação.

As análise feitas pela Statum Geotecnia Ltda, identificaram as decorrência das falhas de empurrão, os contatos constituem superfícies de baixa resistência ao cisalhamento. Mesmo em regime dúctil, essas falhas favorecem a existência de uma zona mais deformada, estirada, milonitizada e cominuída, as quais propiciam a atuação dos processos intempéricos, em sua extensão, gera zonas métricas de resistência mais baixa do que os litotipos circundantes. Além dos contatos, é de se esperar a ocorrência de planos de menor resistência no interior dos litotipos, condicionados pelas falhas de empurrão superimpostas à foliação.

De acordo com depoimentos de ex-funcionários da SAMITRI (VOGBR, 2006) não foi executado nenhuma drenagem interna nesta pilha, em razão da mesma não ter sido implantada sobre áreas saturadas ou sobre surgências de água subterrânea.

A Figura 10, mostra a área referente ao estudo de caso.

Figura 10 - Mina do Andrade- Mapeamento das pilhas de estéril.



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2 METODOS E ANÁLISE DO ESTUDO DE CASO

Após o início da disposição dos estéreis, com a utilização da melhor técnica de compactação, foram realizados ensaios triaxiais pela empresa Statum Geotecnia Ltda, para obtenção dos parâmetros de resistência geotécnicos afim de verificar se estes estão condizentes aos adotados nas análises de estabilidade do presente projeto. A Tabela 2 apresenta características da Pilha 6 (PDE 06).

Tabela 2 - Principais características da PDE-6

Área ocupada pela Pilha (m ²)	427.240
Volume da Pilha (m ³)	9.321.976
Elevação máxima (m)	880

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

4.2.1 Geologia da Pilha PDE-6

A caracterização da área da Pilha de Disposição de Estéril (P06) foi realizada com base em um reconhecimento geológico-geotécnico através de sondagens, com

objetivo de caracterizar a fundação das áreas de estudo, além das unidades já depositadas na pilha atual.

Para cada ponto cartografado, os solos identificados foram caracterizados quanto à granulometria, plasticidade, cor e origem. Nos afloramentos rochosos foram levantados parâmetros como grau de resistência e grau de alteração, de acordo com os critérios que são baseados nas recomendações sugeridas pela ISRM (International Society for Rock Mechanics, 1981). As informações contém os parâmetros levantados do reconhecimento geológico-geotécnico são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros dos levantamentos de reconhecimento geológico e geotécnico da pilha PDE-06

Nome	Descrição	Cor	Plasticidade	Origem
P01	Colúvio silte arenoso com grânulos e cascalho de quartzo (pedra de mão). Cor variegada em amarelo e vermelho.	Variegada	Baixa	Coluvionar
P02	Solo silte arenoso vermelho na drenagem e afloramento de gnaiss W2/R4 com bandamento 280/50. No perfil da drenagem aparece também cerca de 2m de depósito de lixo.	Vermelho	Baixa	Aluvionar
P03	Solo arenoso com argila.	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P04	Solo arenoso com argila.	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P05	Solo arenoso com argila. 10 m a frente do ponto aflora na estrada gnaiss como do ponto P02.	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P06	Solo arenoso com argila com pequenos grânulos de quartzo.	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P07	Contato entre colúvio silte arenoso e saprolito de gnaiss de cor branco e avermelhado.	Variegada	Baixa	Coluvionar/ Saprolito
P08	Contato entre colúvio silte arenoso com clastos de quartzo e saprolito de gnaiss de cor branco e avermelhado.	Variegada	Baixa	Coluvionar/ Saprolito
P09	Solo silte arenoso com clastos de quartzo (pedra de mão)	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P10	Solo silte arenoso com grânulos de quartzo	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P11	Afloramento de Gnaiss W1/R4 com bandamento 250/45	Vermelho/ Amarelo	Baixa	Rocha/In Situ
P12	Solo silte arenoso vermelho na drenagem	Vermelho	Baixa	Aluvionar

P13	Solo silte arenoso com clastos de quartzo (pedra de mão)	Vermelho	Baixa	Coluvionar
P14	Solo silte arenoso vermelho na drenagem	Vermelho	Baixa	Aluvionar
P15	Saída do dreno de fundo em solo silte arenoso com grânulos de quartzo	Vermelho	Baixa	Coluvionar

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

Durante os levantamentos da área foram delimitados seis domínios geológico-geotécnicos distintos: solo aluvionar, solo coluvionar, afloramento de gnaiss, saprolito de gnaiss, depósito de lixo e material depositado.

4.2.1.1 Solo Aluvionar

Para Salomão e Antunes (1998) os solos aluviões são materiais constituídos por materiais eruditos, retrabalhados e transportados pelos cursos d'água nos seus leitos e margens. Além disso, são depositados nos fundos de lagoas e lagos, sempre associados a ambientes fluviais. As variações no meio dos materiais e a capacidade de transporte dos cursos d'água refletem-se na formação de camadas com características distintas. Cada camada representa uma fase de deposição e, conseqüentemente, tem espessura, continuidade lateral, mineralogia e granulometria particulares, assim o solo aluvionar é altamente heterogêneo, possuindo camadas distintas.

Este tipo de solo é composto por sedimentos transportados e depositados pelas águas das chuvas. O transporte é feito dos pontos mais altos do relevo até vales e depressões. Este tipo de solo é composto por sedimentos transportados e depositados pelas águas das chuvas. O transporte é feito dos pontos mais altos do relevo até vales e depressões.

O solo aluvionar identificado encontra-se restrito nos locais de drenagem perene, onde ocorrem pequenas planícies de inundação e áreas de brejo. O material apresenta predominantemente textura silto-arenosa com argila, de coloração avermelhada e com plasticidade baixa. Na Figura 11 ilustra-se a presença deste solo na área de implantação da pilha.

Figura 11 - Solo aluvionar na drenagem principal com blocos de gnaiss



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2.1.2 Solo Coluvionar

As solos coluviões são definidos como depósitos de materiais inconsolidados, normalmente encontrados recobrimdo encostas íngremes, formados principalmente pela gravidade e também pela água (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Estes tipos de solos, constituem depósitos compostos por misturas de solo e blocos de rocha pequenos (15-20 cm), sendo normalmente encontrados recobrimdo encostas de serras, como a Serra do Mar (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Estes materiais têm como característica importante sua baixa resistência ao cisalhamento, podendo apresentar movimentos lentos como o rastejo (*creep*) e sendo, frequentemente, envolvidos pela maioria dos escorregamentos das encostas destas regiões. Estes solos são compostos predominantemente por materiais bastante homogêneos, com granulometria mais fina, tais como areias argilosas e argilas arenosas.

Sua espessura é bastante variável, de apenas 0,5 m até 15-20 m. Uma das características importantes destes solos é apresentar, quase sempre uma estrutura porosa, baixos valores de SPT (1 a 6 golpes) e colapso de estruturas, quando submetidos a saturação e ao carregamento (SALOMÃO & ANTUNES, 1998).

Esses solos, são compostos por partículas que foram transportadas do local de origem são chamados de solos sedimentares ou transportados. As características desses solos variam conforme o agente de transporte. Solos coluvionares são solos transportados por gravidade que, desde grandes pedaços de rocha até pequenas

partículas, por isso são bastante heterogêneos granulometricamente. Esse domínio geológico-geotécnico é o que mais predomina na área de estudo. Ocorre principalmente nas encostas da área da pilha P06 e em boa parte do traçado do canal Figura 12. Apresenta uma textura silto-arenosa (areia fina a média) com um pouco de argila e presença de pedregulhos de quartzo, cor avermelhada e plasticidade baixa.

Figura 12 - Solo Coluvionar



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2.1.3 Afloramento de Gnaisse

Os afloramentos de gnaisse ocorrem principalmente na drenagem principal e nas áreas escavadas. No geral, o gnaisse apresenta coloração branca e cinza, sendo composta essencialmente por minerais micáceos (biotita) e quartzo, a Figura 13 apresenta um afloramento de gnaisse. A rocha, de um modo geral, apresenta-se resistente e se encontra levemente alterada.

Figura 13 - Afloramento de Gnaisse



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2.1.4 Afloramento de Saprolito de Gnaisse

Os Saprolitos são parte do perfil de alteração de um solo em que aparece a rocha alterada, mas ainda mantendo muitas de suas estruturas e restos de minerais em processo de alteração, principalmente os feldspatos.

Os afloramentos de saprolitognaisse ocorrem principalmente nas partes mais altas da área mapeada como uma capa intemperizada da rocha sã que ocorre logo a baixo. No geral, o protolito apresenta coloração branca e vermelha, sendo composta essencialmente por minerais micáceos (biotita) alterados e quartzo apresentados na Figura 14. A rocha, de um modo geral, apresenta-se resistente e se encontra levemente alterada.

Figura 14 - Afloramento de Saprolito de Gnaisse



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2.1.5 Lixão

Ocorre na área mapeada um depósito de lixo já desativado, é mostrado Figura 15. Esse depósito da origem a um solo mal compactado e mal selecionado de muito baixa resistência e qualidade geotécnica.

Figura 15 - Depósito de lixo



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2.1.6 Material Depositado

Ocorre em toda área já depositada pela atual Pilha de Estéreis. Foram empilhados materiais de diversos tipos e resistências, como Gnaisses, Xistos, Quartzitos e em alguns pontos, itabiritos compactos. Estes últimos são utilizados para fortalecer pontos como estradas, acessos e drenagens operacionais. A Figura 16 mostras bermas iniciais da Pilha atual, na cota 760 m.

Figura 16 - Bermas iniciais da Pilha.

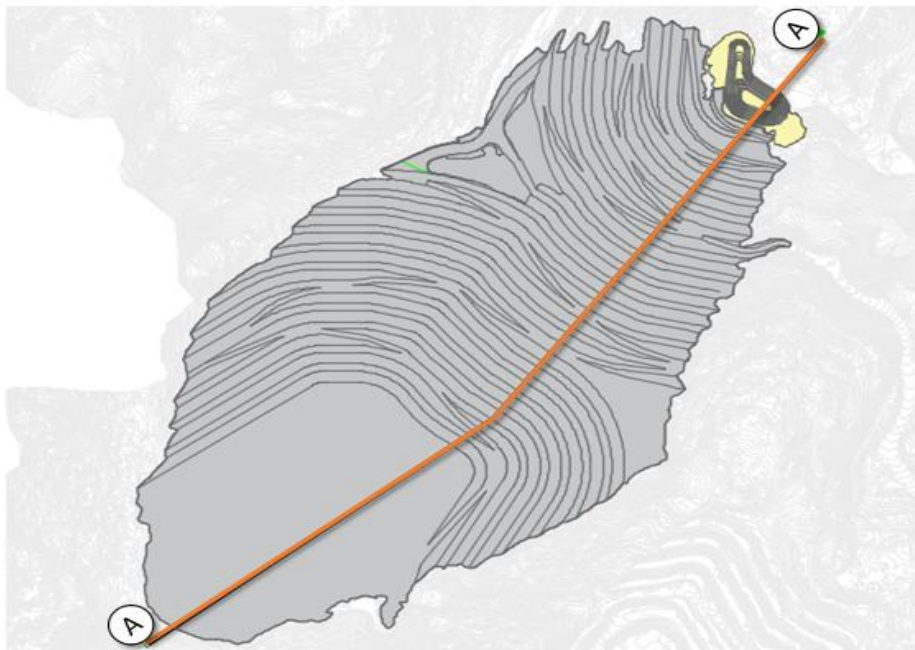


Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017).

4.2.2 Análise da estabilidade da PDE-6

As análises de estabilidade foram realizadas objetivando o atendimento aos requisitos normativos da ABNT NBR 13029:2017, que trata da elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. As análises de estabilidade foram realizadas na Seção AA, apresentada na Figura 17, considerando as superfícies freáticas normal e crítica. A Seção AA foi definida por ser a de maior altura, configurando o maior risco de ocorrência de ruptura.

Figura 17 - Localização da Seção AA



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

As análises computacionais de estabilidade foram realizadas pelo software Slide, versão 5.0, da Rocscience Inc., utiliza-se o método de equilíbrio limite de Bishop, sendo adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos a partir de projetos existentes e pela experiência da equipe Statum em situações semelhantes. Na Tabela 4 apresentam-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados nas análises.

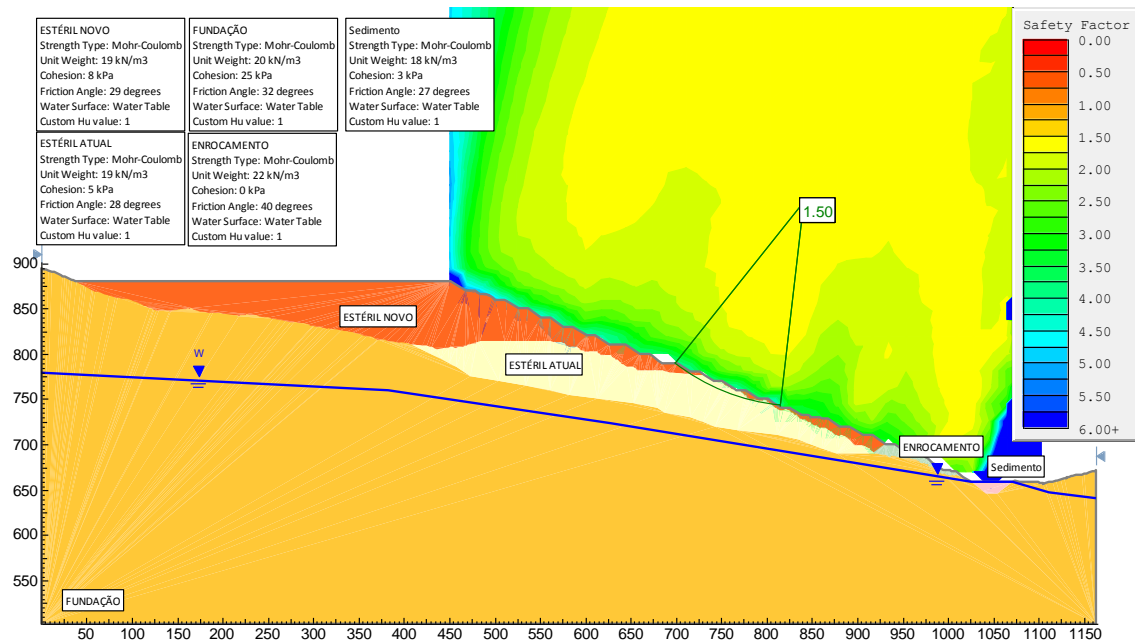
Tabela 4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento e pesos específicos

Material ⁰	Peso específico (KN/m ³)	Parâmetros de Resistência ao cisalhamento	
		c' (kPa)	Φ' (°)
Fundação	20,0	25,0	32
Enrocamento	22,0	0,0	40
Sedimento	18,0	3	27
Estéril Atual	19,0	5,0	28
Estéril Novo	19,0	8,0	29

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

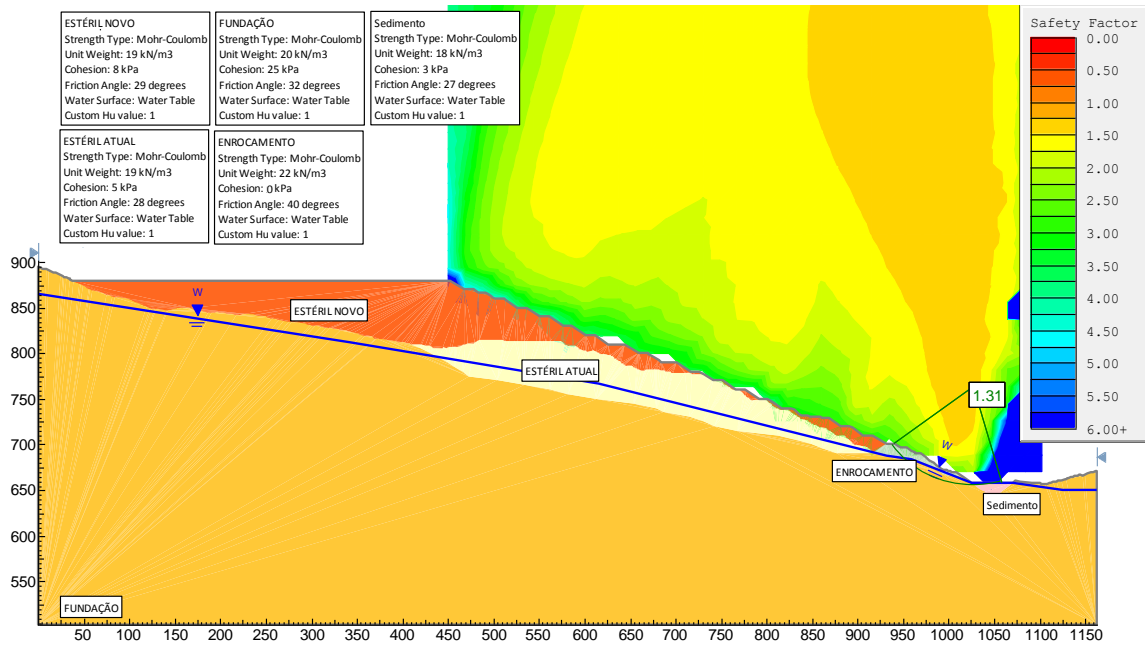
Os parâmetros de resistência foram validados mediante realização de ensaios laboratoriais visando a realização de novas análises de estabilidade com estes parâmetros atualizados. Os resultados das análises de estabilidade na Seção AA, para as condições de superfícies freáticas normal e crítica, são apresentados na Figura 18 e Figura 19, respectivamente.

Figura 18 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção AA – Superfície freática normal



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

Figura 19 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção AA – Superfície freática crítica



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

Os resultados obtidos nas análises apresentadas na Figura 18 e Figura 19 pela empresa Statum Geotecnia Ltda, mostram que os fatores de segurança obtidos atende ao requerido da ABNT NBR 13029:2017. Estes resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Fatores de Segurança obtidos

Seção	Situação	FS mínimo exigido	FS Obtido
A-A'	Superfície Freática Normal	1,50	1,50
A-A'	Superfície Freática Crítica	1,30	1,31

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

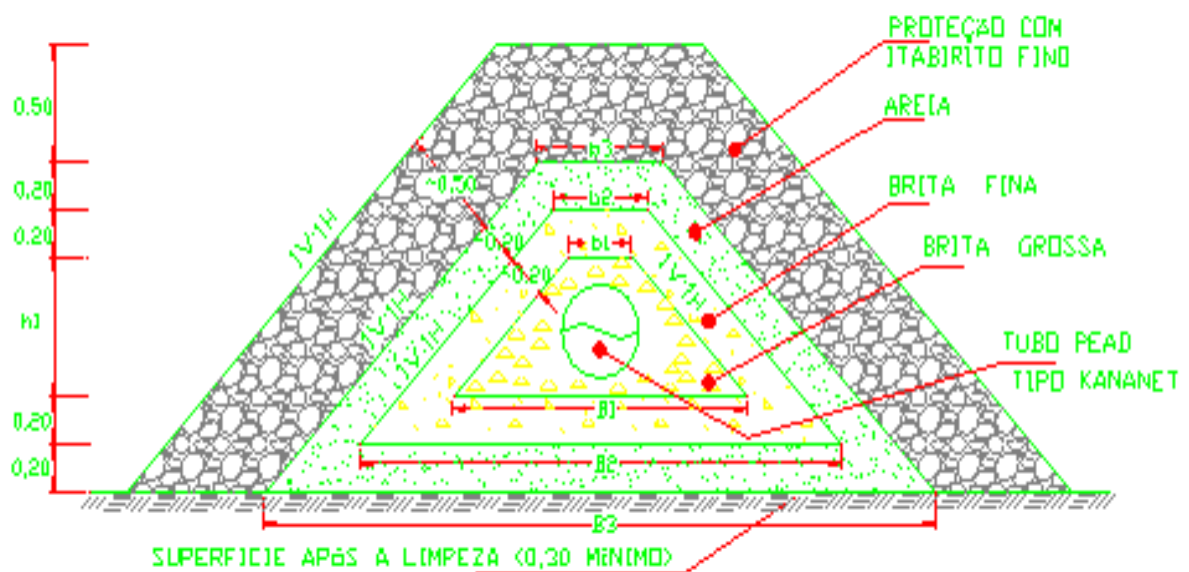
4.2.3 Sistema de Drenagem Interna

Conforme premissa da ArcelorMittal, devido a inexistência de *as-built* do sistema de drenagem interna foi considerada a mesma geometria considerada no Projeto Executivo da PDE-06 - Fase III. (Fase anterior).

Destaca-se ainda que por não se ter o cadastro da saída do dreno existente, deverá ser considerada a possibilidade de ajustes na ligação com o dreno a ser construído.

A drenagem interna apresentada visa complementar o dreno de fundo existente. A seção considerada no projeto foi obtida a partir do desenho 119AN-1710014_Rev0 e é apresentada na Figura 20.

Figura 20 - Drenagem Interna complementar - Seção típica



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

4.2.4 Sistema de Drenagem Superficial

O estudo da drenagem superficial foi separado em tópicos referente aos estudos hidrológicos realizados, concepção adotada, características físicas das pilhas e estruturas de drenagem utilizadas.

4.2.4.1 Estudos Hidrológicos

Os estudos hidrológicos foram elaborados com o objetivo de determinar as vazões de projeto para dimensionamento das diversas estruturas hidráulicas componentes do sistema. A mina do Andrade possui uma estação pluviométrica em atividade, com leituras diárias de precipitação e registros compreendidos Basicamente, a metodologia adotada nos estudos hidrológicos pode ser resumida na seguinte sequência:

- a) delimitação das áreas de contribuição à área de projeto;
- b) definição das características e parâmetros físicos das áreas de contribuição, tais como uso e ocupação do solo, declividades e comprimentos dos talwegues e respectivos tempos de concentração;
- c) aplicação do modelo transformação chuva-vazão para cálculo das vazões de projeto necessárias.

Os quantis de altura de chuva de projeto estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Quantis de Altura de Chuva (mm)

Duração	ALTURA PLUVIOMETRICA - P (mm)									
	Período de Retorno - T (anos)									
	2	5	10	20	25	50	100	500	1.000	10.000
5 min	12,2	15,1	16,7	18,1	18,5	19,7	20,8	25,3	27,2	33,5
10 min	19,1	24,5	27,7	30,4	31,1	33,4	35,4	42,9	46,1	56,8
15 min	24,2	32,2	36,9	41,0	42,3	45,6	48,5	58,8	63,2	77,9
20 min	27,7	37,0	42,6	47,5	48,9	53,1	56,6	68,6	73,8	90,9
25 min	30,4	41,0	47,4	53,0	54,6	59,4	63,7	77,2	83,0	102,3
30 min	32,9	44,4	51,5	57,9	59,7	65,2	70,1	85,0	91,4	112,6
1 h	40,7	53,6	61,7	69,8	72,2	79,5	86,7	105,1	113,0	139,3
2 h	50,5	67,2	72,9	88,7	92,0	102,2	112,2	136,0	146,2	180,2
4 h	61,5	82,4	96,4	109,8	114,2	127,5	140,7	170,6	183,4	226,0
6 h	68,4	91,8	107,5	122,6	127,4	142,3	157,2	190,5	204,9	252,5
8 h	73,8	99,2	116,1	132,6	137,9	154,2	170,3	206,5	222,0	273,6

10 h	78,3	105,1	123,1	140,4	146,0	163,2	180,3	218,6	235,1	289,7
12 h	82,3	110,4	129,2	147,4	153,2	171,1	189,0	229,1	246,3	303,5
14 h	85,8	115,2	134,6	153,6	159,5	178,2	196,7	238,4	256,4	315,9
24 h	100,6	134,5	156,9	178,4	185,2	206,2	227,0	275,2	295,9	364,7

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

De posse dos valores apresentados na Tabela 6 elaborou-se a Tabela 7 com a relação intensidade, duração e frequência (IDF) para as chuvas.

Tabela 7 - Relação Intensidade – Duração – Frequência – Estação Andrade

Duração	INTENSIDADE DE CHUVA - I (mm/h)									
	Período de Retorno - T (anos)									
	2	5	10	20	25	50	100	500	1.000	10.000
5 min	146,1	180,9	200,2	217,2	221,8	236,6	250,1	303,1	325,9	401,7
10 min	114,4	146,8	166,0	182,1	186,7	200,3	212,3	257,3	276,6	340,9
15 min	97,0	128,8	147,7	164,0	169,1	182,4	194,0	235,1	252,8	311,6
20 min	83,1	110,9	127,9	142,6	146,8	159,3	169,8	205,8	221,3	272,7
25 min	73,1	98,3	113,8	127,2	131,1	142,6	152,8	185,2	199,2	245,5
30 min	65,7	88,9	103,0	115,8	119,4	130,4	140,2	170,0	182,8	225,2
1 h	40,7	53,6	61,7	69,8	72,2	79,5	86,7	105,1	113,0	139,3
2 h	25,3	33,6	36,5	44,3	46,0	51,1	56,1	68,0	73,1	90,1
4 h	15,4	20,6	24,1	27,5	28,6	31,9	35,2	42,6	45,9	56,5
6 h	11,4	15,3	17,9	20,4	21,2	23,7	26,2	31,8	34,1	42,1
8 h	9,2	12,4	14,5	16,6	17,2	19,3	21,3	25,8	27,7	34,2
10 h	7,8	10,5	12,3	14,0	14,6	16,3	18,0	21,9	23,5	29,0
12 h	6,9	9,2	10,8	12,3	12,8	14,3	15,7	19,1	20,5	25,3
14 h	6,1	8,2	9,6	11,0	11,4	12,7	14,0	17,0	18,3	22,6
24 h	4,2	5,6	6,5	7,4	7,7	8,6	9,5	11,5	12,3	15,2

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

4.2.4.2 Concepção do sistema de drenagem

O sistema de drenagem superficial foi concebido com o objetivo de coletar as águas provenientes da área da pilha PDE-06 e adjacências e conduzi-las, de forma ordenada até o reservatório do dique de contenção de sedimentos, localizado a jusante da estrutura. Foram utilizadas as seguintes estruturas de drenagem para execução do projeto:

- a) Canaletas de Berma: tem a função de coletar e conduzir os escoamentos provenientes do talude e berma onde está instalada até os canais periféricos;
- b) Canais Periféricos (CP): tem como objetivo coletar e conduzir os escoamentos provenientes das canaletas de berma, e do contato da pilha com o terreno natural, até o dique de contenção de sedimentos;
- c) Bacias de Dissipação (BD): localizadas a jusante dos canais periféricos, são estruturas responsáveis pela dissipação de energia, visando reduzir o potencial erosivo das águas. Para a correta restituição da água ao terreno natural.

As estruturas de drenagem foram dimensionadas, considerando as premissas de tempos mínimos de recorrência dos eventos pluviométricos, conforme a NBR-13.029/06:

- (i) 100 anos para canaletas de bermas;
- (ii) 500 anos para os canais periféricos e bacias de dissipação.

4.2.4.3 Características físicas

As características físicas das áreas de contribuição englobam a determinação da área de drenagem, declividade média do terreno, comprimento do talvegue principal e do tempo de concentração.

As áreas de contribuição e os valores de declividade equivalente e tempo de concentração foram obtidos a partir da base topográfica atualizada disponibilizada pela ArcelorMittal.

Para as estruturas constituintes do sistema de drenagem superficial, as características físicas obtidas para as respectivas áreas de contribuição são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características Físicas das Área de Contribuição das Estruturas de Drenagem Superficial

Estrutura	Área (Km ²)	Comprimento do Talvegue (m)	Tempo de concentração (min)
CP-01	0,256	1117	10
CP-02	0,384	1212	15
Berma Crítica	0,014	587	10

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

4.2.4.4 Vazão de Projeto

A partir dos valores de precipitação supracitados e utilizando-se métodos indiretos de transformação chuva-vazão, foram determinadas as vazões de projeto para o dimensionamento do sistema de drenagem superficial da PDE P06.

Em virtude da magnitude da área de contribuição ser inferior a 2,5 km², as vazões de projeto foram determinadas segundo a aplicação do Método Racional (Pinheiro, 2010).

E para cálculo do tempo de concentração, adotaram-se o Método cinemático, para as áreas de contribuição no interior da pilha, considerando os valores de velocidade média para as bermas de 1,0 m/s e canais periféricos de 3,0 m/s;

O coeficiente de escoamento superficial admitido para o cálculo das vazões de dimensionamento das estruturas propostas foi de 0,45 para área de pilha e 0,25 para área de terreno natural. Na Tabela 9 são apresentadas as vazões de projeto para as diversas estruturas projetadas, utiliza o Método Racional.

Tabela 9 - Síntese dos Cálculos da Vazão de Projeto do Sistema de Drenagem Superficial

Estrutura	Tempo de retorno (anos)	C Ponderado	i (mm/h)	A (km ²)	Vazão de projeto (m ³ /s)
CP-01	500	0,40	257	0,256	7,33
CP-02	500	0,35	235	0,384	8,73
Berma Crítica*	100	0,45	212	0,014	0,38

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

4.2.4.5 Estruturas de Drenagem

As bermas da pilha foram projetadas de forma a operar como canaletas para interceptação e condução dos escoamentos provenientes dos taludes das bancadas superiores os canais periféricos. Estas estruturas foram projetadas com 10,0 m de largura, com declividade transversal de 5,0% e declividade longitudinal pode variar entre 0,5% e 3,0%.

A avaliação do funcionamento das bermas como canaletas de condução do fluxo foi realizada empregando-se o método racional e considerando o regime de escoamento permanente e uniforme. As verificações hidráulicas foram efetuadas empregando-se a equação de Manning. A síntese dos resultados da verificação hidráulica da berma de maior área de drenagem está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico da Berma Crítica

Estrutura	TR (anos)	Vazão (m ³ /s)	Coefficiente de rugosidade Manning (n)	Declividade Transversal (%)	Declividade Longitudinal (%)	Velocidade (m/s)	Profundidade (m)
Berma Crítica	100	0,38	0,022	5	0,5	0,73	0,22
					3	1,45	0,16

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

Foi previsto para projeto, leira de proteção na crista dos taludes da pilha de 0,50 m com o intuito de aumentar o nível de segurança da estrutura mediante aumento da capacidade de vazão, direcionando os escoamentos de forma a evitar fuga e ocorrência de processos erosivos na face dos taludes de jusante.

Os canais periféricos foram projetados em seção trapezoidal, em concreto (manta), os canais periféricos serão compostos por trechos sucessivos em fundo liso e degraus, em função das condições topográficas e de arranjos.

Para o dimensionamento hidráulico do trecho em fundo liso foi admitida hipótese de escoamento uniforme aplica-se a equação de Manning, apresentada anteriormente, para a determinação das dimensões da seção. O coeficiente de rugosidade adotado para o concreto foi de 0,015.

O dimensionamento hidráulico das estruturas em degraus foi realizado com auxílio do software SisCCoH1.0 – Sistema para Cálculos Aplicados à Engenharia Hidráulica, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos

Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Neste tipo de estrutura, buscou-se a condição de escoamento chamada de *skimmingflow* ou escoamento deslizante sobre turbilhões, onde a energia é, em grande parte, dissipada nos vórtices que se desenvolvem nas cavidades dos degraus.

Na Tabela 11 e na Tabela 12 apresentam-se os resultados obtidos de máxima e mínima declividade no dimensionamento realizado nos canais periféricos (CP-01 e CP-02).

Tabela 11 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico – Trecho Fundo Liso

Estrutura	Trecho	Q (m³/s)	Altura da Pared e (m)	Base (m)	Declividade %	Profundidade escoamento (m)	Borda livre (m)	Velocidade (m/s)
CP-01	Declividade mínima	7,33	1,00	2,00	0,5	0,93	0,07	3,21
	Declividade máxima		1,00	2,00	4,0	0,49	0,51	6,68
CP-02	Declividade mínima	8,73	1,20	2,00	0,5	1,03	0,17	3,36
	Declividade máxima		1,20	2,00	4,0	0,55	0,66	7,05

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

Tabela 12 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico – Trecho em Degrau

Estrutura	Trecho	Q (m³/s)	Altura da Pared e (m)	Base (m)	h degrau (m)	L degrau (m)	Declividade (%)	Profundidade escoamento (m)	Borda livre (m)	Velocidade (m/s)
CP-01	Declividade mínima	7,33	1,00	2,00	0,50	5,00	10	0,87	0,13	4,20
	Declividade máxima		1,00	2,00	0,50	0,65	76	0,78	0,23	8,89
CP-02	Declividade mínima	8,73	1,20	2,00	0,50	4,50	11	0,98	0,22	6,13
	Declividade máxima		1,20	2,00	0,50	0,75	66	0,85	0,35	9,05

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

4.2.4.6 Bacia de dissipação

A bacia de dissipação de energia foi projetada visa atenuar a velocidade do escoamento proveniente dos canais periféricos, a fim de restituir o fluxo de maneira adequada para o talvegue natural à jusante.

Para a verificação hidráulica destas estruturas, adotou-se a equação da altura conjugada e a formulação empírica para determinação do comprimento do ressalto hidráulico, constante na publicação “Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators” proposta pelo Bureau of Reclamation (1978).

As estruturas foram concebidas em concreto armado com seção transversal retangular.

Foi considerada a lâmina de água na entrada da bacia obtida a partir do trecho final dos canais periféricos. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para o dimensionamento hidráulico das bacias de dissipação.

Tabela 13 - Síntese do Dimensionamento Hidráulico das Bacias de Dissipação

Variável	BD-01	BD-02
Vazão de Projeto (m ³ /s)	7,33	8,73
Velocidade estimada na entrada da bacia (m/s)	8,83	9,10
Número de Froude na entrada	4,38	4,19
Largura da bacia (m)	2,00	2,00
Altura da lâmina de água na entrada da bacia (m)	0,42	0,48
Altura da lâmina de água conjugada (m)	2,37	2,62
Comprimento da bacia mínimo necessário (m)	13,48	14,74
Altura da parede adotada (m)	2,70	2,70
Comprimento adotado da bacia de dissipação (m)	15,00	15,00

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

Visando a proteção do talude a jusante da bacia de dissipação foi considerada uma proteção em enrocamento. Apesar do sistema de drenagem da PDE-06-Fase IV não ser próximo ao depósito de lixo, a bacia de dissipação BD-01 apresenta uma borda livre adicional de 0,30 m conferindo assim uma maior proteção ao depósito.

4.2.5 Sistema de Contenção de Sedimentos

A PDE-06 está situada a montante da estrutura de contenção de sedimentos denominada Bacia 15. Por premissa, no presente projeto não foi considerada a possibilidade de alteamento desta bacia para aumento do volume de reservação da mesma.

Para aumento deste volume foi considerada a realização de escavação no entorno do reservatório atual da Bacia 15.

Caso não obtenha o volume necessário para contenção e sedimentação de todo o sedimento aportado pela Fase IV da PDE-06, foi solicitado pela ArcelorMittal a consideração de realização futura de estudos específicos de geração de sedimentos desta sub-bacia hidrográfica e, ainda, a avaliação de locais para construção de um novo sistema de contenção. Destaca-se que estas atividades não configuraram escopo do presente trabalho.

Neste contexto, para a Fase IV da PDE-06 obteve-se a necessidade do volume de reservar para a Bacia 15 de 70.000 m³. No entanto, considerando as premissas supramencionadas, foi possível a obtenção do 31.848 m³. As principais características da configuração final da Bacia 15 estão apresentadas na Tabela 14.

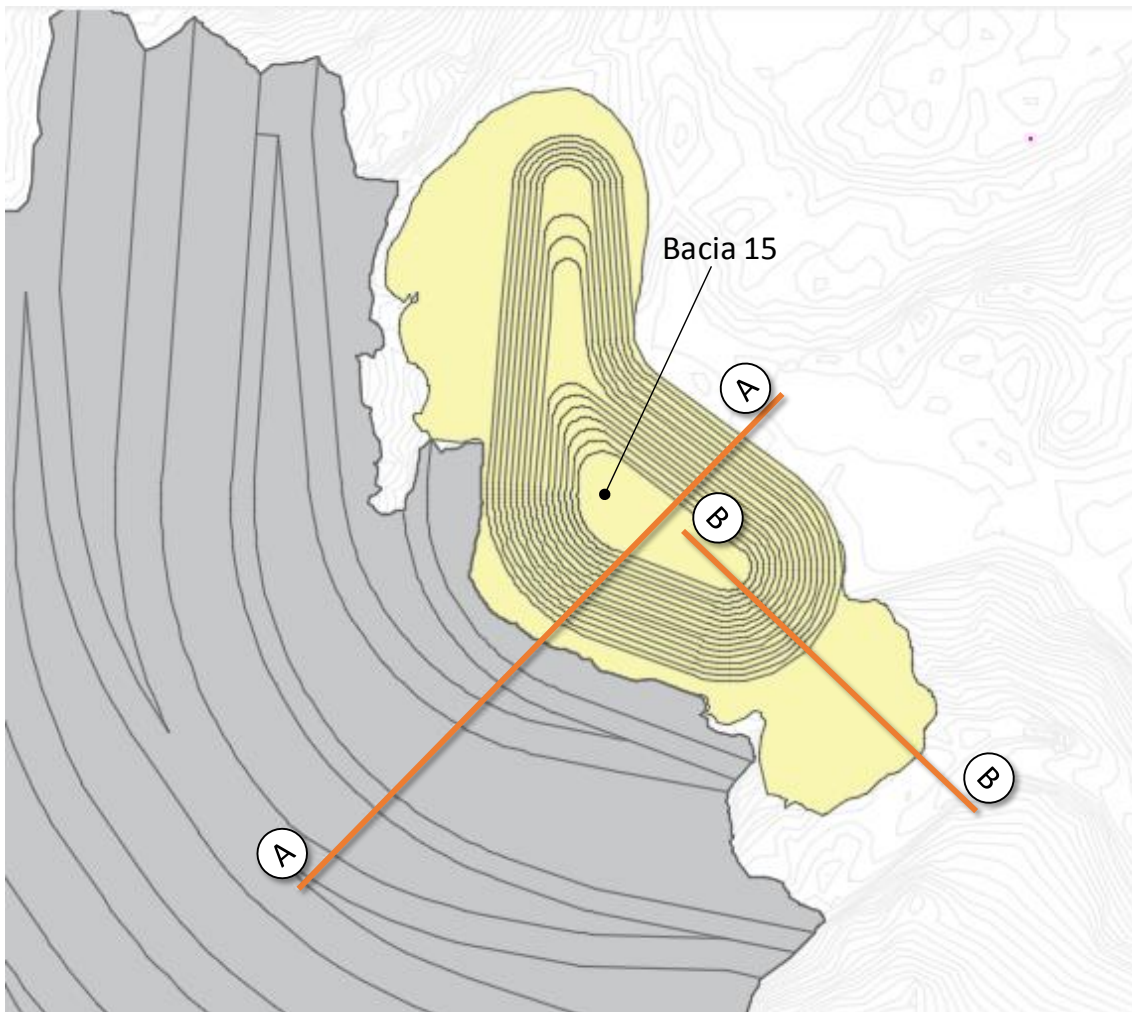
Tabela 14 - Principais características da Bacia 15

PDE-06 – Fase IV	
Área ocupada (m ²)	9.628
Volume (m ³)	31.848
Elevação máxima (m)	660 (crista do reservatório)
Inclinação do talude	1,3(H):1,0(V)
Altura do talude (m)	10,0
Largura da Berma (m)	3,0

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

As análises de estabilidade na Bacia 15 foram realizadas na Seção AA e Seção BB, pela empresa Statum Geotecnia Ltda, apresentada na Figura 21, considerando a condição mais crítica que é execução da limpeza do reservatório no período de seca.

Figura 21 - Localização da Seção AA e da Seção BB



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

As análises computacionais de estabilidade foram realizadas pelo software Slide, versão 5.0, da Rocscience Inc., utilizando-se o método de equilíbrio limite de Bishop, sendo adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos a partir de projetos existentes (e experiência da equipe Statum em situações semelhantes. Na Tabela 15 apresentam-se os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados nas análises.

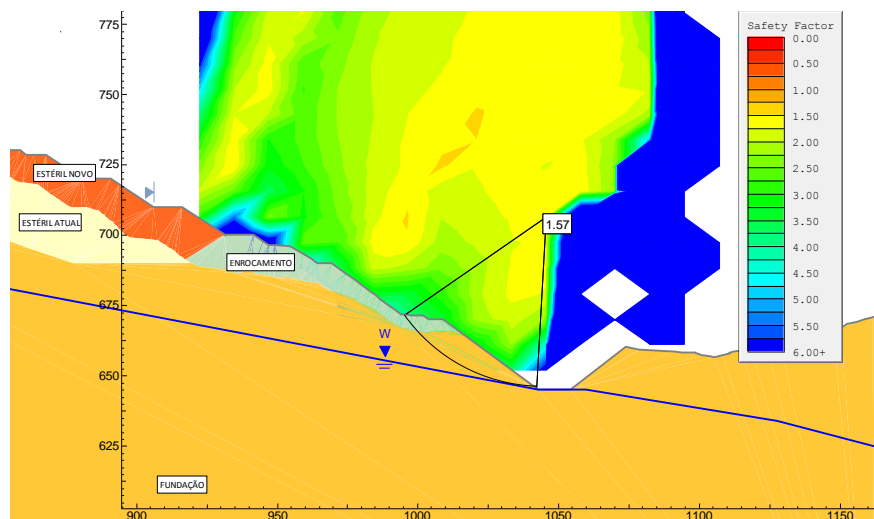
Tabela 15 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento e pesos específicos

Material	Peso específico □□ (KN/m ³)	Parâmetros de Resistência ao cisalhamento	
		c' (kPa)	Φ' (°)
Fundação	20,0	25,0	32
Enrocamento	22,0	0,0	40
Estéril Atual	19,0	5,0	28
Estéril Novo	19,0	8,0	29

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

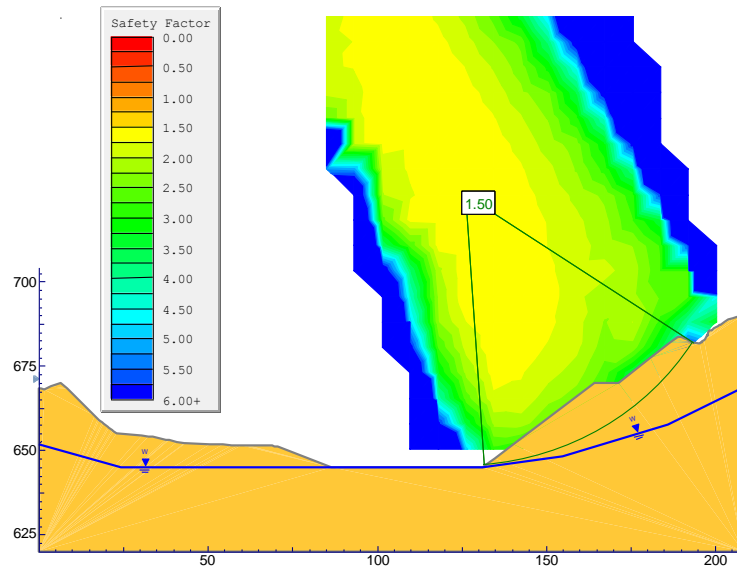
Os resultados das análises de estabilidade na Seção AA' e Seção são apresentados na Figura 22 e na Figura 23, respectivamente.

Figura 22 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção AA



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

Figura 23 - Análise de estabilidade geotécnica – Seção BB



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

Os resultados obtidos nas análises apresentadas na Figura 22 e Figura 23 mostram que os fatores de segurança obtidos atendem ao requerido em norma. Estes resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Fatores de Segurança obtidos

Seção	Situação	FS mínimo Exigido	FS obtido	Figura
AA	Após limpeza – período seco	1,50	1,57	Figura 22
BB	Após limpeza – período seco	1,50	1,50	Figura 23

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

4.2.6 Dimensionamento do Reservatório

O reservatório da Bacia 15 foi dimensionado para atender o volume de sedimentos provenientes da área da bacia hidrográfica de contribuição onde está inserido a PDE-06 – Fase IV e também para atender o volume de água de retenção (VD), destinado à fornecer o tempo necessário à sedimentação das partículas no interior do reservatório.

Vale ressaltar que o funcionamento do dique de contenção de sedimentos se baseia no processo de sedimentação, ou seja, separação, pela ação da gravidade,

do material em suspensão em função da vazão afluyente e velocidade de sedimentação da partícula.

O volume previsto para armazenamento dos sedimentos foi determinado considerando uma frequência de limpeza trimestral, e uma taxa de produção média de sedimentos igual a 150 m³/ha/ano para área da superfície da pilha e 60 m³/ha/ano para os sedimentos provenientes da bacia hidrográfica (área de terreno natural).

O volume para promover o tempo de retenção necessário para sedimentação das partículas foi estimado com base no volume de água resultante da passagem da vazão afluyente ao reservatório com TR 2 anos e duração de 24 horas, conforme indicado na publicação *Reservoir Sedimentation Handbook: Design and Management of Dams, Reservoirs and Watersheds for Sustainable Use* (Morris, Gregory L. e Fan, Jaihua, 1997). Na Tabela 17 são apresentados os volumes característicos previstos para contenção de sedimentos no reservatório da estrutura de contenção de sedimentos.

Tabela 17 - Volumes Característicos do Reservatório

Estrutura	Volume de Sedimentos (m³)	Volume de Retenção (m³)	Volume disponível (m³)	Volume Total Necessário (m³)
Bacia 15	3.123,98	66.224,75	31.848,00	69.348,73

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

Em não se obtendo o volume necessário para contenção e sedimentação de todo o sedimento aportado pela Fase IV da PDE-06, foi solicitado pela ArcelorMittal a consideração de realização futura de estudos específicos de geração de sedimentos desta sub-bacia hidrográfica e, ainda, a avaliação de locais para construção de um novo sistema de contenção. Destaca-se que estas atividades não configuraram escopo do presente trabalho.

4.2.7 Avaliação Hidráulica do Sistema Extravasor Existente

O vertedouro é caracterizado por uma soleira vertente sobre o maciço do dique. A soleira vertente na El. 670,00 sendo a crista da Bacia 15 na El. 672,00. A calha do vertedouro é do tipo soleira espessa e possui largura de 12,00 m.

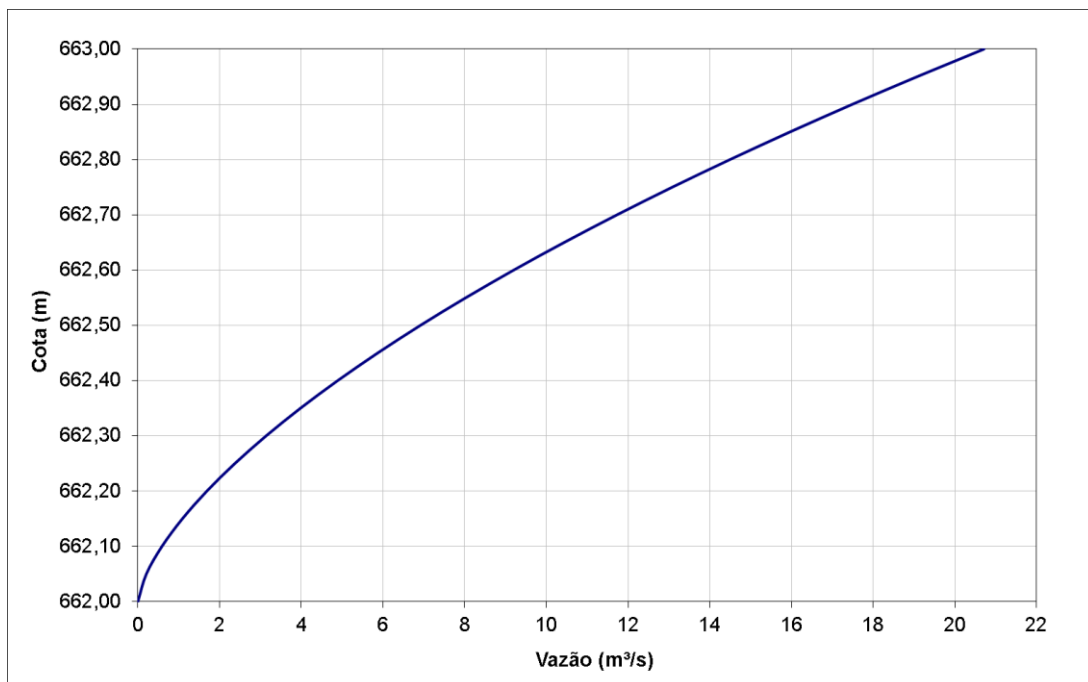
Foi realizada a verificação de capacidade de descarga do vertedouro do dique para as cheias com tempos de recorrência de 1.000 e 10.000 anos. As cheias utilizadas foram definidas pelo Método Racional já descrito anteriormente e as vazões apresentadas na Tabela 18. Na Figura 24 é apresentada a curva de descarga do sistema extravasor existente.

Tabela 18 - Síntese dos Cálculos da Vazão de Projeto do Sistema Extravasor Existente

Estrutura	Tempo de retorno (anos)	C Ponderado	i (mm/h)	A (km²)	Vazão de projeto (m³/s)
Sistema extravasor existente	1.000	0,36	253	0,661	16,61
Sistema extravasor existente	10.000	0,36	312	0,661	20,48

Fonte: Adaptado (Statum Geotecnia Ltda,2017)

Figura 24 - Curva de descarga do sistema extravasor existente



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

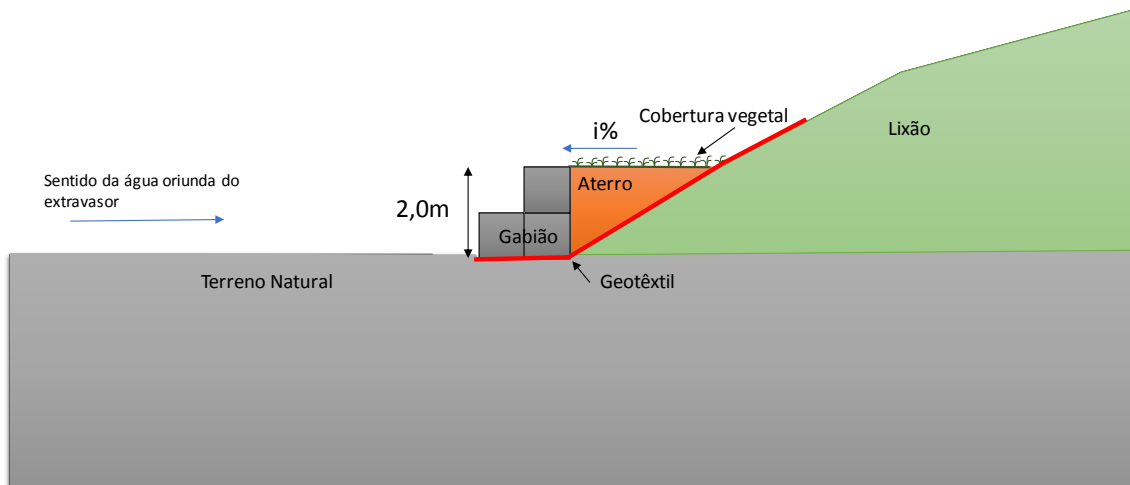
Conclui-se que o vertedouro do Dique tem condições de extravasar a cheia milenar com uma borda livre de 0,13 m e a cheia decamilenar sem borda livre em relação à crista da Bacia 15 (El. 672,00).

4.2.8 Proteção do depósito de lixo

Por solicitação da ArcelorMittal foi considerada a concepção conceitual da proteção do depósito de lixo, situado a jusante do dique (Bacia 15), para fins de mitigação do desenvolvimento de processos erosivos através do contato direto das águas oriundas do sistema extravasor do dique. Esta proteção visa mitigar riscos ao depósito de lixo na região onde este poderia ser impactado pela drenagem oriunda do dique da PDE-06, e desnecessário portanto, considerada a proteção de todo o depósito.

Para esta proteção foi considerada a construção de uma estrutura em gabião, juntamente com o preenchimento por aterro em solo compactado. Na interface entre o aterro e o depósito de lixo foi considerada a colocação de um geotêxtil. Na Figura 25 é apresentada o esquema da proteção proposta.

Figura 25 - Proteção do depósito de lixo – figura esquemática



Fonte: Statum Geotecnia Ltda (2017)

A escolha pela proteção em gabião deve-se ao fato da estrutura ser armada, monolítica, flexível, permeável e autodrenante. Adicionalmente, por ter rochas naturais como principal material componente, apresenta uma grande durabilidade e com a utilização de arame galvanizado possui elevada resistência à corrosão e ferrugem.

Em linhas gerais, a solução apresentada para a proteção promoverá condições de proteção da região do depósito de lixo, onde este poderia ser impactado pelas águas aportadas pelo dique da PDE-06, e não se apresenta como uma solução rígida que demandaria manutenções regulares.

O aterro considerado entre o gabião e o depósito de lixo evitará o acúmulo de água nesta região e promoverá condições de plantio de uma cobertura vegetal visando harmonizar a estrutura ao entorno.

Já o geotêxtil terá a finalidade de evitar o transporte de sedimentos do depósito de lixo para o interior do aterro ou da estrutura de gabião, evita o carreamento deste material para o talvegue a jusante da estrutura.

5 CONCLUSÃO

As atividade de mineração na Mina do Andrade em Bela Vista de Minas, próximo a capital Mineira, pertencente ao grupo ArceloMittal teve início 1935, o processo de retirada do minério é conhecido como lavra a céu aberto, considera uma atividade que gera uma grande quantidade de estéril, devido a necessidade da prática de decapamento do solo, que é a retirada da cobertura para alcançar o minério. A mina encontra-se em plena atividade de exploração. O minério extraído da mina do Andrade está classificado de boa qualidade com uma relação estéril/ROM = 1,2 abaixo da média mundial que é 1,44, torna-se economicamente viável sua extração. Surge então a necessidade da ampliação da pilha de estéril PDE 06. Foi necessário um estudo de caso e a contratação da Empresa Statum Geotecnia Ltda, especializada em análises de geotecnia, essa análise foi fiel aos detalhes da normas da ABNT NBR 13029:2017, NRM 19 e das Lei Federal Nº12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos, entre outras que norteiam as responsabilidade deste tipo de empreendimento. O caso apresentado mostra que, independente do porte do empreendimento, os cuidados com o manejo dos recursos disponíveis são de extrema relevância no desenvolvimento produtivo e sustentável. No Brasil o estado exerce forte papel regulador no que se refere aos cuidados do meio ambiente. Os Fatores de segurança calculados em projeto pela Empresa Statum Geotecnia Ltda atenderam aos limites preconizados pela NBR 13029 (ABNT, 2017). Conforme a análise do projeto de ampliação da PDE 06, não promove impacto ao depósito de lixo a jusante da Bacia 15 e os estudos hidrológico-hidráulicos desenvolvidos visaram dimensionar as estruturas hidráulicas necessárias à operação da PDE-6 e avaliação do sistema extravasor existente na Bacia 15, observando as diretrizes das normas NBR 13028 (ABNT, 2017) e NBR-13029 (ABNT, 2017). As estruturas instaladas, como Leiras de proteção na crista dos taludes da pilha deverão ser construídas com o intuito de aumentar o nível de segurança da estrutura mediante aumento da capacidade de vazão, direcionando os escoamentos de forma a evitar fuga e ocorrência de processos erosivos na face dos taludes de jusante. Conforme a Empresa Statum Geotecnia Ltda, necessário o acompanhamento do projeto de conservação e a manutenção periódica do sistema de drenagem, ou seja, o conjunto de serviços que deverão ser realizados ao longo dos anos (limpeza dos dispositivos de drenagem e fora deles) é de fundamental

importância para manter as condições originais em que os mesmos serão construídos. Com tudo, os cuidados com o manejo dos recursos hídricos devem abranger todo o volume que impactar e/ou for impactado pelo empreendimento. Para garantir que o monitoramento esteja presente em toda extensão da lavra, o uso de ferramentas de controle se faz indispensável.

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: 20 setembro de 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 6502- **Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13029 - **Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril, em pilha, em mineração**. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 11682- **Estabilidade de Taludes**. Rio de Janeiro, 1991.

ANGLOGOLD ASHANTI. **Descomissionamento de Empreendimentos Minerários: O Projeto Mina Velha-MMV**. Apresentação realizada no Seminário de Encerramento de Minas IBRAM/FEAM. Belo Horizonte, Maio, 2008.

AZEVEDO, M. P. N. de. **Barragens de terra – Sistemas de drenagem interna**. 2005. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://docplayer.com.br/2199359-Barragens-deterra-sistemas-de-drenagem-interna.html>. Acesso em: 18 de setembro de 2018.

BATES, J. **Barragens de Rejeitos**. 1ª edição. São Paulo: Signus Editora, 122 pág. (2002).

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

Borma,L.S.; Soares,P.S.M. - **Resíduos Sólidos de mineração e drenagens ácidas**. In: TRINDADE,R.B.E; BARBOSA FILHO,O. Extração de ouro :princípio, tecnologia e meio ambiente. CETEM/MCT, Rio de Janeiro,2002

BRASIL. Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras

providências. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D97632.htm>. Acesso em setembro de 2018.

BRASIL, **Ministério de Minas e Energia**. Energia no mundo – matrizes e indicadores – anos ref. 2015-16. 2017b. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>. Acessado em: 01 de setembro de 2018.

CANHOLI, A.P. (2014) **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo, Editora Oficina de Textos, 2ª. Edição, 384p. Disponível em: https://www.ina.gob.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_551.pdf Acesso em :15 de set. 2018.

CAPUTO, Homero Pinto. Mecânica dos Solos e suas Aplicações, Fundamentos. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 1996.

CARVALHO, P.S.L; MESQUITA;REGIS;MEIRELLIS. Sustentabilidade Sociambiental da Mineração, BNDES Setorial 47. Mar 2018. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15361/1/BS47__Mineracao__FEC_HADO.pdf. Acesso em: 07 de out. 2018.

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: 17 de set. 2018.

CASTRO, C.A.A. **Estudo da técnica de anti-po com emilsao de xisto em pavimentos para baixo volume de trafego**. Dissertação de Mestrado. Faculdade Federal do Rio de Janeiro, 1991.

CARVALHO, M. G. A. **Estratégia ambiental pró-ativa: sequenciamento de lavra concomitantemente com a disposição de estéril dentro da mina**. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CAUCHICK MIGUEL, P. C. et al. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, ABEPRO. 2 ed., 2010.

CARVALHO, P. L. et al. **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-234, mar. 2014.

CETESB. **Manual para implementação de um programa de prevenção à Poluição** / CETESB.4. ed. São Paulo, 2002. Disponível em:

https://cetesb.sp.gov.br/consumosustentavel/wp-content/uploads/sites/20/2013/11/manual_implem.pdf. Acesso em: 18 de set. 2018.

COSTA, B.S. **SIMULAÇÃO DE ALTERNATIVAS LOCACIONAIS DE DEPÓSITO DE ESTÉRIL PARA UMA MINA DE FOSFATO**. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Minas. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2017.

CRU INTERNATIONAL. Iron Ore Cost Model 2017. (Acesso restrito a assinantes). CRU International, 2017.

CURI, A. **Lavra de minas**. 1ª ed. São Paulo: Oficina de textos, 2017. 462 p

DNPM, **Departamento Nacional de Produção Mineral. Normas**

Regulamentadoras de Mineração – NRM 19. Rio de Janeiro, pág. 74 - 82. (2001).

Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-237-em-18-10-2001-do-diretor-geral-do-dnpm>. Acesso em: 15/set/2018.

ENDO, I. **Regimes tectônicos do arqueano e proterozóico no interior da placa sanfranciscana**: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais. 1997. 243p. Tese (Doutorado em Geotectónica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

FORGEARINI, G.R; NETO, R.N; SOUZA, L.H; ABICHEQUER, L.A; GONÇALVES, I.G. **Metodologia de avaliação ambiental na análise de alternativas locais de pilhas de estéril**. *Revista Monografias Ambientais*. Disponível em: <file:///C:/Users/admin/Downloads/18714-86031-1-PB.pdf>. Acesso em 15 set. 2018.

FRANÇA, F. C. **Estabilidade química de solo para fins rodoviário**: Estudo de caso com o produto. RBI Grande 81 – Viçosa UFV, 2003. Disponível em: <http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9669/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 15 de set. 2018.

GERSCOVICH, M.S. **Estabilidade de Taludes**, 2009. Faculdade de Engenharia Departamento de Estruturas e Fundações. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/31534410/estabilidade-de-taludes-2ed-deg>. Acesso em 15 set. 2018.

GOEDERT, W.J. CORREA, R. S. **Usos, degradação e qualidade do solo**. In: CORRÊA, R. S. BAPTISTA, G. M. M. (Org.). *Mineração e áreas degradadas no*

cerrado. Brasília: Universa, 2004.

GOMES, F.S. **Estudo da Erodibilidade e Parâmetros Geotécnicos de um Solo em Processo Erosivo**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Tecnologia e Geociências. Mestrado em Engenharia Civil, 2001.

GOMES. R. C. **Caracterização Tecnológica e Sistemas de Disposição de Resíduos de Mineração**. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da Escola de Minas – Universidade Federal de Ouro Preto. Junho, 2006.

HAWLEY, P. M.; OCHOA, X.; SHARON, R. Design of the Pierina waste dump, Canadian Institute of Mining, **Metallurgy and Petroleum**, USA 2003. v.34, p- 16-24.

IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**, 2016. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>. Acessado em: 15 de setembro de 2018.

INTERNATIONAL COUNCIL ON MINING AND METALS – ICMM. The role of mining in national economies. 2. ed. London, 2014.

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/Kent 1992.pdf>. Acesso em: 11 set. 2018.

Khatsuria. R.M. (2004) **Hydraulics os spillways and energy dissipators**. Editora Marcel Dekker– 10. Ed – New York; Disponível em: https://www.ina.gov.ar/congreso_hidraulica/resumenes/LADHI_2018_RE_551.pdf. Acesso em: 18 de set. 2018.

LAWTON, K. **Composición química de los suelos**. In: BEAR, F.E. Química del Suelo. Madrid: Ediciones Interciencia, 1963. p.63-100.

LOPES, F.R. **Métodos Numéricos em Geotecnia**, Notas de Aula, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 1995.

LOZANO, M. H. - **Revista Fundações & Obras Geotécnicas**, Pág 22-23, Ano 6, Nº 70. Editora Rudder, julho de 2016.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Estudo da mineração no Brasil. Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2004.

MACEDO. **Solos modificados com cimento** – efeito no módulo de resiliência e no dimensionamento de pavimentos. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2004.

MARQUES FILHO, P. L., & GERALDO, A. (1998). **Barragens e Reservatórios**. In: A. M. dos S. Oliveira & S. N. A. de Brito (Ed.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE.

DNPM, **Departamento Nacional de Produção Mineral**. Normas Regulamentadoras de Mineração – NRM 19. Rio de Janeiro, pág. 74 - 82. (2001). Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-no-237-em-18-10-2001-do-diretor-geral-do-dnpm>. Acesso em: 15/set/2018.

NRM 19 - **Disposição de Estéril, Rejeitos e Produtos**, Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/admin/Downloads/18714-86031-1-PB.pdf>. Acesso em: 15 de set, 2018.

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.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Bruna_Starling_Costa.pdf. Acesso em: 15 set. 2018.

PETRONILHO, M. R. **Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco**. Dissertação de Mestrado, (Programa de pós graduação em geotécnica). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

PILLON, C. N.; MIURA, A. K.; ALBA, J. M. F. Agricultura no contexto da recuperação de áreas mineradas. **Recuperação de Áreas Mineradas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. v. 2, p. 31-46.

PINTO, Curso Básico de Mecânica dos Solos, em 16 Aulas. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2000. Disponível em : Docum J.M. 2018

PULINO, M.A. **ÍNDICES DE ESTIMATIVA DE CUSTOS DE FECHAMENTO DE PILHAS DE ESTÉRIL E BARRAGENS DE REJEITOS**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2010.

QUARESMA, L. F. Perfil da mineração de ferro. Relatório técnico In: BRASIL, Ministério de Minas e Energia – MME/ Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM.2014.

REHM, B.W. GROENEWOLD, G.H., e MORIN, K.A. **Hydraulic properties of coal and related materials, Northern Graet Plains**, Groundwater, 1980.

RICARDO, H. D. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação**. 3ª. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2007.

Ruellan, A. **Pedologia e desenvolvimento: A Ciência do Solo ao serviço do desenvolvimento**. In: Moniz, A.C. (ed.) A responsabilidade social da Ciência do Solo. Campinas, SBCS, 1988.

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.pucRio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=10680@1. Acesso em: 15 out. 2018.

SALOMÃO, F.X & ANTUNES F.S. **Solos em Pedologia- Geologia de Engenharia.Oliveira S.A.& Brito S.A** (eds.) Associação Brasileira e Geologia de Engenharia- ABGE, São Paulo, Brasil

SILVA, A. P. M., VIANA, J. P., CAVALCANTE, A. L. B. **Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração**. Caderno de Diagnostico (2011).

STATUM GEOTECNIA LTDA. **Projeto Operacional Executivo para ampliação da Pilha de Estéreis 06 (PDE-06)**. Relatório Técnico. Belo Horizonte, 2017.

TEIXEIRA, M. B. **Estudo numérico do comportamento mecânico de pilhas de estéril de mineração**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011

TERZAGHI, K. **Theoretical soil mechanics**. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1943, 1973.

TERZAGHI, K. **Mechanisms of Landslides, Engineering Geology** (Berkey) Volume, Geological Society of America, 1950. Disponível em: ps://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/wellington-luiz-periera.pdf. Acesso em: 20 de set. 2018.

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: 19 setembro de 2018.

VALE. **RELATÓRIO ANUAL 2013**. Disponível em <http://www.vale.com/brasil/PT/investors/Annual-reports/20F/Paginas/default.aspx>. Acessado em 14 de setembro de 2014.

VARAKSIN, S. **Vaccum consolidation, vertical drains for the environment friendly consolidation of very soft polluter muda t the Airbus A-380 factory site**. In: Symposium on new techniques for design and construction in soft clays. Guarujá, SP, 2010.

Younger, Paul, Banwart, Steven A, Hedin, Robert, S. Mine Water: Hydrology, Pollution, Remediation. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Dividions**, ASCE 98 709- 725.

ZHOU, J., SHI, C, XU, F. Geotechnical Characteristics and Stability Analysis of Rock-Soil Aggregate Slope at the Gushui Hydropower Station, Southwest China. Hindawi Publishing Corporation - **The Scientific World Journal**. Artigo, 16 pág. (2013)

ZENÓBIO, A.A. **Avaliação geológico-geotécnica de encostas naturais rochosas por meio de classificações geomecânicas: área urbana de Ouro Preto (M.G.) – Escala 1:5.000**. 2000. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.