

Dissertação de Mestrado

**DESENVOLVIMENTO DE GEOMETRIA PARA EMPILHAMENTO DE
REJEITOS DESAGUADOS DE MINÉRIO DE FERRO**

ESTUDO DE CASO PARA OS REJEITOS GERADOS NA INSTALAÇÃO DE
TRATAMENTO DE MINÉRIOS ITABIRITÍCOS (ITM-I) EM OPERAÇÃO NA
MINA DO PICO




PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO – MARÇO DE 2017

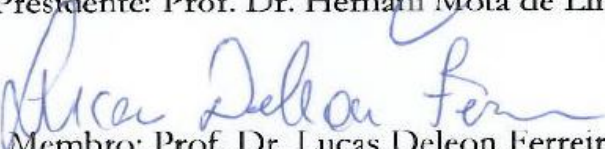
DESENVOLVIMENTO DE GEOMETRIA PARA EMPILHAMENTO DE REJEITOS DESAGUADOS DE MINÉRIO DE FERRO – ESTUDO DE CASO PARA OS REJEITOS GERADOS NA ITM-I DA MINA DO PICO.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Geotecnia**.

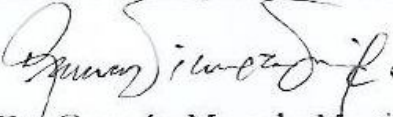
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 09/03/2017, pela Banca Examinadora composta pelos membros:



Presidente: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima



Membro: Prof. Dr. Lucas Deleon Ferreira



Membro: Dr. Germán Marcelo Martins Vinueza Freire

B664d Boccamino, Guilherme Denardi.

Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito desaguados de minério de ferro [manuscrito]: Estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico / Guilherme Denardi Boccamino. - 2017.

110f.: il: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota Lima.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Minérios de ferro - Resíduos. 2. Drenagem. 3. Minério de ferro – Resíduos - Armazenamento. I. Lima, Hernani Mota. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU:62413

Catálogo: www.sisbin.ufop.br

“Senhor se a tua presença não for conosco, não nos faças subir daqui,

Êxodo 33:14-15”

DEDICATÓRIA

Dedico esta conquista à minha família, pela paciência, compreensão e apoio durante o período de desenvolvimento deste projeto. Em especial aos meus pais, por tudo que fizeram e por sempre acreditarem em mim, pois nunca mediram esforços para a minha formação pessoal e profissional. Aos meus avós e demais familiares que sempre estiveram presentes na minha vida, agradeço a todos pelos momentos e ensinamentos compartilhados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Hernani, pela orientação de forma objetiva, pela pronta disponibilidade sempre que precisei e por compartilhar seus conhecimentos comigo.

Aos professores do NUGEO da Escola de Minas da UFOP, que contribuíram, cada um de sua forma, para meu crescimento como Engenheiro.

Aos professores Lucas Deleon e Germán Vinueza pelas considerações prestadas de forma clara e objetiva.

À VALE S.A por ser uma grande escola para mim, por disponibilizar dados técnicos para o desenvolvimento do presente trabalho e por me ceder o tempo precioso para assistir as aulas.

Agradeço aos amigos e profissionais da VALE, especialmente aos que contribuíram diretamente para a elaboração desta dissertação.

Agradeço a Lari por todo apoio prestado durante o período do mestrado.

Agradeço aos irmãos da Republica Necrotério, atuais moradores e ex-alunos, pela boa fase que compartilhamos juntos, por todos ensinamentos e amizades ali adquiridos.

Agradeço à toda turma do Mestrado do NUGEO, pelas amizades formadas, pelos conhecimentos transmitidos e pelos bons momentos compartilhados.

RESUMO

Os rejeitos são gerados a partir do beneficiamento das *commodities* dos minérios. No Brasil estima-se que em 2015 foram gerados cerca de 190 Mt de rejeitos derivados do processo de enriquecimento do minério de ferro. Segundo dados da Fundação Estadual do Meio Ambiente em Minas Gerais existem cadastrados no Banco de Dados Ambiental cerca de 150 barramentos para a contenção de rejeitos. O Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral, se apresenta como principal jazida brasileira, detentora de uma reserva lavrável de 17 bilhões de toneladas de minério de ferro, com teor médio de ferro de 49%, representando 10% da reserva lavrável mundial. Frente à está imensa jazida de minério de ferro e a capacidade produtiva instalada das mineradoras, associado a demanda pelo minério no mundo, pergunta-se: Quantas barragens ainda deverão ser construídas? Existem outras possibilidades de disposição de rejeitos? O presente estudo fundamenta sua pesquisa no empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro. O objetivo dessa pesquisa foi analisar o comportamento prático dos rejeitos de minério de ferro espessados e filtrados e propor uma geometria otimizada para o empilhamento seguro destes materiais. Nessa pesquisa avaliou-se um dado rejeito gerado em uma unidade industrial de beneficiamento de minério típica do quadrilátero ferrífero, separados em dois conjuntos - os rejeitos arenosos, derivados do processo de flotação e os rejeitos finos, derivados do processo de deslamagem. Para que os rejeitos possam ser empilhados uma rota de processo adicional para desaguar-los foi desenvolvida. Adotou-se um mecanismo para desaguar as lamas e outro para desaguar o rejeito da flotação, que representa 70% do rejeito total. Um filtro de disco a vácuo foi adotado para gerar um rejeito arenoso filtrado com um teor de umidade médio da ordem de 13%, que apresentou bons resultados nos empilhamentos experimentais. Por outro lado, o rejeito fino espessado e ou filtrado não apresentou boas características para empilhamento individual. Como solução, inseriu-se material rochoso estéril, de forma a permitir uma, disposição conjunta com o rejeito arenoso e as lamas.

Palavras-chave: Disposição de resíduos da mineração. Rejeitos de minério de ferro. Desaguamento de rejeitos de minério de ferro. Desenvolvimento de geometria. Diretrizes operacionais.

ABSTRACT

The tailings are generated from the processing of the commodities of the ores. In Brazil it is estimated that in 2015 190 Mt of tailings were generated, derived from the process of iron ore enrichment. According to data from the Fundação Estadual do Meio Ambiente em Minas Gerais there are registered in the database approximately 150 dams for containment of tailings. According to the data from the Departamento Nacional de Produção Mineral, the Quadrilátero Ferrífero in Minas Gerais has the main Brazilian mineral deposits, there is a reserve of 17 billion tons of iron ore, with average iron content of 49%, representing 10% of the world's mineable reserves. In face of this immense iron ore quarry and the production capacity of mining companies associated with the demand for ore in the world, brings us to a question, how many more dams should be built? Seeking new possibilities for the disposal of iron ore tailings, this study bases its research on stacking dewatered tailings of iron ore. To be analyzed in this research, tailings generated in Mina do Pico in Ore Treatment Facility were used, known as Instalação de Tratamento de Minérios Itabiríticos (ITM-I), separated into two sets, the sandy wastes derived from flotation process and fine tailings derived from desliming process. For these materials to be stacked, it is necessary to develop a further process route for accommodating them. Usually it adopts a mechanism to dewater sludge and other to dewater tailings generated from flotation, which represents 70% of total tailings. The sandy tailing filtrate by means of a vacuum disc filter located in Mina do Pico, generates a filtered material with an average moisture content of about 13%, showing good results in experimental landfill formed with this material. On the other hand the fine thickened tailings and/or filtered did not show good characteristics to be stacked individually, thus requiring additional shares for stacking.

Keywords: Disposal of mining tailings. Tailings iron ore. Dewatering of iron ore tailings. Development of geometry. Operational guidelines.

Lista de Figuras

- Figura 1.1 - Mapa-múndi com os principais depósitos de minério de Ferro de idade pré-cambrianos. (Takehara 2004)27
- Figura 2.2 – Principais atividades realizadas no processo de enriquecimento do minério de ferro30
- Figura 2.3 – Exibe a evolução do comportamento dos materiais desaguados. (PORTES, 2013)31
- Figura 2.4 – Espessador convencional em operação na ITM-I. (Arquivo fotográfico, VALE S.A, 2016)33
- Figura 2.5 – Espessador de alta capacidade em operação na Mina do Pico, 201735
- Figura 2.6 - Filtro a disco em operação na Mina do Pico, 201737
- Figura 2.7 – Filtro de Tambor. (Imagem de relatório de projeto, VALE S.A, 2017)38
- Figura 2.8 – Filtro de correia. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)38
- Figura 2.9 - Filtro Prensa em operação na Mina do Pico, 201739
- Figura 2.10 – Taxa unitária de filtração (kg/h/m^2) x (w%) teor de umidade da torta para filtro de disco convencional, filtro horizontal e disco cerâmico. Rejeitos provenientes da etapa de flotação. (GUIMARÃES, 2011)40
- Figura 2.11 – Taxa unitária de filtração (kg/h/m^2) x (w%) teor de umidade da torta para filtro prensa horizontal, prensa vertical e hiperbárico. (GUIMARÃES, 2011)41
- Figura 2.12 – Taxa unitária de filtração (kg/h/m^2) x (w%) teor de umidade da torta filtro prensa vertical, filtro hiperbárico e filtro de pressão horizontal. (GUIMARÃES, 2011)41
- Figura 2.13 – Peneira desaguadora. (Imagem de relatório de projeto, VALE S.A, 2017)42
- Figura 2.14 – Tubos formados com geotêxtil (geoforma) preenchidos com rejeito. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)43

| | |
|---|----|
| Figura 2.15 – Ilustra a formação das paliçadas com o geotêxtil. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016) | 43 |
| Figura 2.16 – Exibe os elementos que estão diretamente ligados no desaguamento Eletrocínético. Fonte: (FERREIRA, 2016) | 44 |
| Figura 2.17 – Forças de reação causadas pela aplicação de um potencial elétrico no rejeito. (FERREIRA, 2016) | 45 |
| Gráfico 2.18 – Eficiência do desaguamento em função do aumento do potencial elétrico e do teor de sólidos na polpa. Fonte: (FERREIRA, 2016) | 45 |
| Figura 2.19 – Planta piloto para desaguamento de rejeitos de minério de ferro. (Arquivo fotográfico, VALE S.A, 2016) | 46 |
| Figura 2.20 – Índice de vazios máximos e mínimos para o rejeito arenoso. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 48 |
| Figura 2.21 - Distribuição granulométrica do rejeito arenoso. (Dados de Projeto Vale) | 49 |
| Figura 2.22 – Aterro experimental formado com os rejeitos arenosos da ITM-I, filtrados e empilhados em camadas máximas de 4 m. (Dados de Projeto Vale) | 50 |
| Figura 2.23 – Ilustra a formação do aterro em camadas. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 50 |
| Figura 2.24 - Variação da coesão efetiva com a densidade relativa – ensaios triaxiais CD e CU – rejeito de flotação gerado na ITM-I. (Dados de Projeto Vale) | 51 |
| Figura 2.25 – Variação do ângulo de atrito efetivo com a densidade relativa – ensaios triaxiais CD e CU – rejeito de flotação ITM I Pico. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 51 |
| Figura 2.26 – Lama espessada, aterro formado em camadas. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 53 |
| Figura 2.27 – Lama espessada e filtrada na planta piloto instalada na mina do Pico. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 54 |
| Figura 2.28 – Aterro formado com os rejeitos finos filtrados. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 54 |
| Figura 3.1 – a) Frasco de areia; b) balão de borracha; c) densímetro nuclear. (SANTOS, 2004) | 58 |

- Figura 3.2 – Comportamento de areias fofas e compactas durante o cisalhamento. (Freire Neto 2009)59
- Figura 3.3 – Linha do índice de vazios críticos. (FREIRE NETO, 2009)60
- Figura 3.4 – Ilustra as relações de comportamento para areias densas e fofas, onde: (a) Tensão x Deformação; (b) Índice de vazios x Deformação; (c) Volume x Deformação. (MILONAS 2006)63
- Figura 4.1 - Ilustra a imagem de um dispositivo de drenagem interna em desenvolvimento, evidenciando as transições filtrantes. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)67
- Figura 4.2 – Ilustra a formação geométrica de uma pilha de rejeitos espessados com o ponto de lançamento da pasta no centro da estrutura. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)68
- Figura 4.3 – Formas para a disposição de pastas. (LANDRIALT, 2002)69
- Figura 4.4 – Ilustra a formação do cone na disposição de rejeito espessado. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)69
- Figura 4.5 – Ilustra a formação padrão de uma pilha com rejeitos filtrados70
- Figura 4.6 - Empilhamento de rejeitos de minério de ferro desaguado em baias. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)71
- Figura 4.7 – Ilustra o método construtivo dos taludes. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)72
- Figura 4.8 – Configuração final de uma pilha formada com material estéril, estrutura localizada QF. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)72
- Figura 4.9 – Metodologia de formação da pilha com rejeitos de minério de ferro alternados com estéril. Em azul o rejeito, em alaranjado o estéril e em verde a fundação da pilha75
- Figura 4.10 – Disposição compartilhada entre rejeito arenoso filtrado e material estéril. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)75
- Figura 4.11 – Formação da pilha associando os rejeitos desaguados com o material estéril, dispostos em regiões individualizadas da pilha. Tem-se em vermelho a lama espessada, em azul o rejeito arenoso filtrado, em alaranjado o material estéril e em verde a fundação da pilha76
- Figura 4.12 – Ilustra a sequência construtiva da pilha. Em amarelo a drenagem interna, em azul o rejeito arenoso filtrado, em vermelho a lama espessada e em alaranjado o material estéril77

| | |
|--|-----|
| Figura 5.1 - Geometria típica de um empilhamento. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A) | 84 |
| Figura 5.2 – Arranjo da Pilha com o traçado da seção principal | 85 |
| Figura 5.3 – Seção P | 85 |
| Figura 6.1 – Comparativo visual das seções projetadas | 90 |
| Figura 6.2 – Apresenta o FS=2.01 para o empilhamento proposto com a seção P1. Disposição conjunta entre estéril e rejeito arenoso filtrado | 92 |
| Figura 6.3 – Seção P2, FS=1.78, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado | 93 |
| Figura 6.4 – Seção P2, FS=1.53 resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática | 93 |
| Figura 6.5 – Seção P3, FS=1.86, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado | 94 |
| Figura 6.6 – Seção P4, FS=1.61, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado | 95 |
| Figura 6.7 – Seção P4, FS=1.31, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática | 96 |
| Figura 6.8 – Seção P5, FS=1.74, formação da pilha com o rejeito arenoso filtrado | 97 |
| Figura 6.9 – Seção P5, FS=1.31, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática | 97 |
| Figura 6.10 – Formação da pilha utilizando a lama espessada, o rejeito arenoso filtrado e o material estéril | 98 |
| Figura 6.11 – FS=1.56 - Analise de estabilidade com a elevação hipotética da linha freática para a formação da pilha com o rejeito fino espessado, rejeito arenoso filtrado e com a utilização do material estéril | 98 |
| Figura 6.12 – Seção P5 instrumentada | 99 |
| Figura 6.13 – Seção P6, FS=2.42, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado | 101 |
| Figura 6.14 – Seção P7, FS=1.66, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado | 102 |
| Figura 6.15 – Seção P7 – FS=1.32 - Resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática | 102 |

Figura 6.16 – Seção P8, FS=1.958. Resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado103

Figura 6.17 – Seção P8 – FS=1.32 - Resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática103

Lista de Tabelas

- Tabela 2.1 – Composição mineralógica dos diferentes tipos de minério do QF. Rosiéri et al., (1991)28
- Tabela 2.2 - Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro. (Romeiro 1997)29
- Tabela 2.3 - Resumo dos parâmetros de compactação do rejeito arenoso para camada de formação do aterro com espessura de 1m. (Dados de Projeto Vale)48
- Tabela 2.4 – Exibe o resultado da análise granulo-química de uma amostra de rejeito de flotação da IMT-I da Mina do Pico. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)52
- Tabela 3.1 - Permeabilidade versus a granulometria do rejeito. (BOSSI, 2015)56
- Tabela 3.2 – Apresenta os índices de vazios verificados nos experimentos conduzidos por Bossi (2015)58
- Tabela 3.3 – Ângulo de atrito conforme graduação e compacidade do rejeito. (BOSSI, 2015)61
- Tabela 5.1 – Seções a serem analisadas86
- Tabela 5.2 – Parâmetros geotécnicos dos materiais a serem empilhados88
- Tabela 6.1 – Quadro resumo das análises realizadas nas seções apresentadas90

Lista de símbolos, nomenclaturas e abreviações

(PIB) – Produto Interno Bruto.

(Mt) – Milhões de toneladas.

(%) - Porcentagem.

(DNPM) – Departamento Nacional de Produção Mineral.

(Bt) – Bilhões de toneladas.

(CPMF) – Cadeia de Produção do Minério de Ferro.

(FEAM) – Fundação Estadual de Meio Ambiente.

(BDA) – Banco de Dados Ambiental.

(QF) – Quadrilátero Ferrífero.

(ITM-I) – Instalação de Tratamento de Minérios Itabiríticos.

(p) – Partículas.

(Km) – Quilômetros.

(NBR) – Norma Brasileira Regulamentadora.

(BIF's) – *Banded Iron Formation* – Formação Ferrífera Bandada.

(Fe) – Mineral Ferro.

(SiO₂) – Mineral Sílica.

(Fe₂O₃) – Mineral Hematita.

(FeO(OH)) - Mineral Goethita.

(FeO(OH).nH₂O) – Mineral Limonita.

(FeCO₃) – Mineral Siderita.

(Fe₃O₄) – Mineral Magnetita.

(FeTiO₃) – Mineral Ilmenita.

(FeS₂) – Mineral Pirita.

(Fe(1-x)) – Mineral Pirrotita.

(CaCO₃) - Carbonato de Cálcio.

(CaMg(CO₃)₂) – Carbonato de Cálcio e Magnésio.

(TiO₂) – Óxido de Titânio.

(ROM) – Run of Mine – Material Lavrado na Mina.

(LL) – limite de Liquidez.

(LP) – Limite de Plasticidade.

(ABNT) – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

(Cf) – Coeficiente de Forma.

(D10) – Diâmetro Efetivo das Partículas.

(K) – Coeficiente de permeabilidade.

(D15) – Valor no qual, 15% das partículas do material apresentam-se com diâmetro inferior.

(D50) - Valor no qual, 50% das partículas do material apresentam-se com diâmetro inferior.

(#) – Mesh, abertura das peneiras.

(Max.) – Máximo.

(Min.) – Mínimo.

(w%) – Teor de Umidade.

(log) – Logaritmo.

(σ') – Tensão Confinante.

(CR) – Compacidade Relativa.

(t) – Tempo.

- (t) – Tonelada.
- (ΔV) – Variação de Volume.
- (e) – Índice de Vazios.
- (Thickened tailings)* – Rejeitos espessados
- (Paste tailings)* – Rejeito em Pasta.
- (Wet cake tailings)* – Rejeito Filtrado a Úmido.
- (Dry cake tailings)* – Rejeito Filtrado a Seco.
- (Over Flow)* – Fluxo superior.
- (Under Flow)* – Fluxo inferior.
- (PH) – Potential Hidrogeniônico.
- (in situ)* – No local, no terreno.
- (Θ) – Teor de umidade volumétrica.
- (S) – Sucção mátrica.
- (n) – Porosidade.
- (kg) – Quilograma.
- (m²) – Metro quadrado.
- (h) – Hora.
- (Bags)* – Forma geométrica formada com geotêxteis.
- (EF) – Eletroforese, movimento das partículas.
- (EO) – Eletro-osmose, movimentação da água.
- (EM) – Eletromigração, movimento de elétrons.
- (t/h) – Tonelada por hora.
- (CU) – Coeficiente de Uniformidade.

(CC) – Coeficiente de Curvatura.

(CD) – Cisalhamento Drenado.

(CU) – Cisalhamento não Drenado.

(kPa) – Quilo Pascal.

(NUGEO) – Núcleo de Geotecnia.

(m/s) – Metros por Segundos.

(SPT) – Sondagem a percussão.

(~) – Aproximadamente.

(t/m³) – Tonelada por metro cubico.

(V) – Vertical.

(H) – Horizontal.

(γ) – Peso Específico.

(c') – Coesão.

(ϕ) – Ângulo de atrito.

(γ_n) – Peso Especifico natural.

(γ_{sat}) – Peso Especifico Saturado.

(FS) – Fator de Segurança.

(Seção P) – Seção Principal do Arranjo Geométrico.

(INA) – Indicador de Nível de Água.

(PZ) – Piezômetro.

(MV) – Medidor de Vazão.

(MS) – Marco Superficial.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO | 21 |
| 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO | 21 |
| 1.2. OBJETIVO | 24 |
| 1.3. RELEVÂNCIA | 24 |
| CAPÍTULO 2 – REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO | 26 |
| 2.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS DOS DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO | 26 |
| 2.2. BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO | 29 |
| 2.3. TÉCNICAS PARA DESAGUAMENTO DE REJEITOS | 30 |
| 2.3.1. ESPESAMENTO | 32 |
| 2.3.2. SEDIMENTAÇÃO E RESSECAMENTO | 35 |
| 2.3.3. FILTRAGEM | 36 |
| 2.4. DESAGUAMENTO DOS REJEITOS GERADOS NA ITM-I | 46 |
| 2.4.1. REJEITO ARENOSO (FLOTAÇÃO) | 47 |
| 2.4.2. REJEITO FINO (DESLAMAGEM) | 52 |
| CAPÍTULO 3 - PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DOS REJEITOS | 55 |
| 3.1. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE REJEITOS GRANULARES | 55 |
| CAPÍTULO 4 - DIRETRIZES OPERACIONAIS | 64 |
| 4.1. VARIÁVEIS DE CONTROLE | 64 |
| 4.1.1. TRANSPORTE DO MATERIAL | 65 |
| 4.1.2. DRENAGEM INTERNA E FUNDAÇÃO DA PILHA | 66 |
| 4.1.3. DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS ESPESADOS | 67 |
| 4.1.4. DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS FILTRADOS | 70 |
| 4.1.5. DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA. | 73 |
| 4.1.6. CONTROLE DO FLUXO DE ÁGUAS PLUVIAIS | 77 |
| 4.1.7. CONTROLE DE SEDIMENTOS | 79 |
| 4.1.8. CONTROLE DE POEIRA | 80 |
| 4.1.9. INSPEÇÃO E MONITORAMENTO | 81 |
| CAPÍTULO 5 – GEOMETRIAS A SEREM ANALISADAS | 84 |
| 5.1. CRITÉRIOS PARA MODELAR A GEOMETRIA | 84 |
| 5.2. CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DAS GEOMETRIAS PROPOSTAS | 87 |

| | |
|---|------------|
| CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DAS GEOMETRIAS PROJETADAS | 90 |
| 6.1. SEÇÃO P1 | 91 |
| 6.2. SEÇÃO P2 | 92 |
| 6.3. SEÇÃO P3 | 93 |
| 6.4. SEÇÃO P4 | 94 |
| 6.5. SEÇÃO P5 | 96 |
| 6.6. SEÇÃO P6 | 100 |
| 6.7. SEÇÃO P7 | 101 |
| 6.8. SEÇÃO P8 | 102 |
| CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES | 104 |
| 7.1. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS | 105 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 107 |

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A economia nos países em desenvolvimento é fortemente influenciada pela indústria de exploração de recursos naturais, como a extração mineral, a agricultura e a pecuária, atividades consideradas como setor básico da economia no país, pois promovem desenvolvimento, geram empregos e até o surgimento de novas cidades.

Conforme consta no Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2012, o setor mineral tem grande importância social e econômica para o Brasil, respondendo por 4,2% do PIB e 20% das exportações brasileiras. Além disso, um milhão de empregos diretos estão associados à atividade de mineração, que está na base de várias cadeias produtivas.

Segundo dados do Departamento Nacional de Produção Mineral, em 2014 o Brasil foi o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo, com uma produção em massa equivalente a 411,8 Mt, com um teor médio de 63,5% de ferro, que representou 12,8% da produção mundial e gerou uma receita de R\$ 54,7 bilhões.

A relação média entre produto final e a geração de rejeito para o minério de ferro é da ordem de 2/1, segundo Abrão (1987). Esta correlação se assemelha ao observado nas instalações em operação atualmente no QF, onde, em média, um terço da massa que chega a usina é classificado ao final do processo como rejeito.

Utilizando a proporção de geração de rejeitos e à produção de minério de ferro, itens mencionados acima, estima-se que no Brasil, no ano de 2014 foram geradas 205,9 Mt de rejeitos derivados do processo de beneficiamento do minério de ferro e no mundo, estima-se que em 2014 foram gerados cerca de 1,6 bilhões de toneladas.

A Cadeia de Produção do Minério de Ferro (CPMF) envolve diversas atividades até que seu produto final, o minério, atinja o mercado. Em geral, existem três processos macros: a extração, o beneficiamento e a comercialização do produto. Outros processos não menos importantes são necessários e integram o fluxograma geral da CPMF. Exemplos destes processos são: pesquisa mineral, a lavra, disposição de estéril, alimentação da usina, adequação da granulometria do material, concentração do minério, adução de água, transporte do produto, transporte do rejeito, tratamento dos efluentes, entre outros.

E é a partir do processo de beneficiamento, etapa na qual se pretende a purificação do minério, que surgem os rejeitos, como um novo material inerente ao processo global. Em geral os processos de beneficiamento do minério envolvem a adição de água, por este fato, comumente os rejeitos são dispostos na forma de polpas e, por isso, são estocados em barragens.

Somente em Minas Gerais existem cadastradas no Banco de Dados Ambiental (BDA) 741 barragens, do total, 454 barragens são relacionadas às atividades mineradoras, e estima-se que 1/3, cerca de 150 barramentos são para a contenção de rejeitos. Esse número reflete parte da intervenção causada ao meio ambiente pela mineração e a disposição de rejeito até o momento atual no estado de Minas Gerais. (FEAM, 2013)

O Brasil detém a terceira maior reserva lavrável do mundo de minério de ferro equivalente a 23,2 bilhões de toneladas, sendo a região do Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais a principal jazida, detentora de uma reserva lavrável de 17 bilhões de toneladas de minério de ferro com teor médio de ferro de 49%, representando 10% da reserva lavrável mundial (DNPM, 2015). Esta imensa jazida frente ao cenário atual de operação das grandes empresas mineradoras produtoras de minério de ferro no Brasil, aliado a uma demanda elevada pelo produto no mundo, nos remete a uma dúvida: quantas estruturas deverão ser construídas para estocar todo rejeito que ainda será gerado?

Visando novas possibilidades diversos aspectos e soluções vêm sendo estudadas para adoção, entre as principais diretrizes destas novas ideias está a redução de custo, o aumento da capacidade de aporte de cada estrutura, maior aproveitamento da água, aumento de segurança, vantagens para o fechamento e menores chances de contaminação do meio ambiente. Neste cenário tem-se como alternativa a disposição de rejeitos desaguados, dispostos ao meio ambiente na forma de uma pilha.

Face a realidade de questionamentos da sociedade com a prática de disposição de rejeitos em barragens, o desaguamento dos rejeitos ganhou uma conotação técnica, de relevância, como incremento de segurança nos sistemas de disposição de rejeitos, justificado pelos últimos acidentes ocorridos com barragens no estado de Minas Gerais, na região do Quadrilátero Ferrífero, um em 2014 e outro em 2015.

Entretanto não se pode afirmar que a pilha formada com rejeitos desaguados seja mais segura que uma dada barragem de rejeito, pois a segurança de um sistema de disposição de rejeitos está diretamente ligada ao projeto, a implantação e a operação do sistema projetado. Deve-se prever as premissas e parâmetros técnicos construtivos e operacionais do sistema e a equipe que irá realizar tais atividades deverão fazê-las com disciplina e rigor técnico, pois se o projeto falhar e não se prever todas as interferências ou se for previsto, mas não for executado de maneira correta, seja lá qual for a técnica adotada para a disposição, o risco de falha existirá.

Entende-se que a estrutura formada com os rejeitos desaguados, espessados e ou filtrados, dispostos no meio ambiente na forma de uma pilha, apresenta um menor dano potencial ao meio ambiente, quando comparado com o dano potencial de uma barragem, consideradas as mesmas proporções de massa de rejeito disposta e a mesma localização das estruturas.

Neste contexto, busca-se analisar o comportamento prático dos rejeitos de minério de ferro espessados e filtrados e propor uma geometria otimizada para o empilhamento seguro destes materiais. Os rejeitos de minério de ferro são distintos e para cada caso deve ser realizado um estudo específico. Nesta dissertação estudar-se-ão os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minério de ferro itabiríticos, em operação na Mina do Pico, denominada como ITM-I.

Do rejeito total gerado nesta instalação de beneficiamento do minério de ferro, 70% do material apresentam predominância do diâmetro das partículas (p) distribuídas na seguinte faixa granulométrica ($0,02\text{mm} < p < 0,15\text{mm}$), constituídos basicamente de silte e areia, sendo esta fração do rejeito, classificado como rejeito arenoso ou rejeito de flotação. Os 30% restantes do rejeito gerado, são classificados como rejeito fino ou lama e apresentam predominância do diâmetro das partículas distribuídas na seguinte faixa granulométrica ($0,001\text{mm} < p < 0,02\text{mm}$), constituída basicamente de silte e argila.

Embasado no comportamento e nos parâmetros geotécnicos do rejeito arenoso filtrado, da lama espessada e do material estéril lavrado neste empreendimento, busca-se aqui desenvolver uma geometria otimizada que apresente elevada capacidade volumétrica e que seja segura para o empilhamento destes materiais. As variações de geometria serão aplicadas no ângulo de face dos taludes, na altura dos bancos e no espaçamento entre

eles. As técnicas construtivas e o conjunto de medidas e controle para realizar tais empilhamentos de maneira segura também serão alvo de estudo no presente trabalho.

1.2. OBJETIVO

A geometria de uma pilha é definida, em termos técnicos, pelos seguintes itens: altura dos bancos, espaçamento entre eles e pela inclinação de face dos taludes projetados. As diferentes combinações possíveis entre estas três variáveis afetam diretamente a capacidade volumétrica da pilha, a estabilidade física dos taludes e a condição de operação e manutenção da pilha. Dessa forma, o presente estudo busca desenvolver uma geometria otimizada que seja segura do ponto de vista da estabilidade física dos taludes e que apresente elevada capacidade volumétrica, estando dentro dos padrões regulamentados, conforme consta na NBR 13029 (ABNT, 2006).

O objetivo específico do presente trabalho consiste em desenvolver uma geometria para empilhar o rejeito arenoso e, o objetivo geral se desdobra em caracterizar o comportamento e os parâmetros geotécnicos dos materiais a serem utilizados nesta pesquisa, propondo assim, medidas de controle operacionais, que visam garantir a segurança da operação do empilhamento destes nas diferentes configurações de preenchimento da geometria proposta.

Dentre as variáveis de operação, tem-se a avaliação geotécnica dos taludes já construídos, que necessita de um rigoroso controle ligado a inspeções visuais e ao monitoramento realizado por instrumentos específicos, itens que serão aqui abordados e analisados.

Os parâmetros geotécnicos dos materiais serão extraídos de ensaios geotécnicos, de dados disponíveis na literatura e de projetos semelhantes, oriundos do empreendimento onde se localiza este estudo. As geometrias projetadas serão analisadas segundo a capacidade volumétrica, as condições operacionais e a estabilidade física dos taludes, este último utilizando técnicas para determinação do fator de segurança dos taludes, com a utilização do software Slide 6.0 da Rocscience.

1.3. RELEVÂNCIA

Atualmente uma das maiores dificuldades dos empreendimentos mineiros consiste em dispor de maneira adequada os rejeitos no meio ambiente. O desafio nesta gestão reside nos sistemas de disposição de rejeitos, pois eles, no caso de falhas significativas podem

impactar o meio ambiente, causando danos à sociedade ao seu redor, denegrindo a imagem da empresa, além de poder acarretar a completa paralização das atividades, afetando a operação da mina.

A técnica de disposição de rejeitos em barragens tem como característica dispor o rejeito na forma de polpa, necessitando assim, de um reservatório que possibilite a clarificação e recirculação da água. Pela consistência fluida que se encontra o rejeito dentro dos reservatórios os danos associado a uma falha significativa de uma barragem podem se estender por centenas de quilômetros a jusante do barramento. Em contrapartida, o empilhamento de rejeitos previamente desaguados tem como característica não acumular água e, na ocasião de uma falha significativa da estrutura formada os danos são significativamente reduzidos, salvo as mesmas proporções de massa e localização.

Sendo assim, a relevância do presente trabalho está debruçada na técnica de empilhamento de rejeitos, buscando desenvolver a melhor combinação possível entre ângulo de face dos taludes, altura dos bancos e o espaçamento entre eles e nas boas práticas de engenharia para empilhamento seguro dos rejeitos de minério de ferro previamente desaguados.

CAPÍTULO 2 – REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

O minério de ferro é utilizado na indústria siderúrgica (99%), para produção de ferro-gusa em altos fornos e do ferro-esponja nos fornos de redução direta, que depois são transformados em aço. O restante é utilizado como carga na indústria de ferro-liga, cimento e eventualmente na construção de estradas. (QUARESMA, 2001)

Entre as atividades contidas na cadeia de produção do minério de ferro, dar a destinação adequada para os rejeitos gerados no processo de beneficiamento tem sido um dos maiores desafios. Para o desenvolvimento de um projeto eficiente e seguro diversos são os fatores a serem considerados, dentre eles, a caracterização geotécnica dos rejeitos pode ser considerada o item mais importante. Os principais fatores que afetam as características e as propriedades geotécnicas dos rejeitos e o que os tornam distintos são estes:

- Geologia da rocha explorada;
- A concentração de um dado mineral;
- O tratamento mineral imposto ao minério;
- A intensidade do tratamento.

2.1. ASPECTOS GEOLÓGICOS DOS DEPÓSITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Os depósitos de minério de ferro podem ser classificados, geologicamente, em cinco categorias principais: (i) sedimentares acamadados; (ii) formados por soluções hidrotermais; (iii) relacionados a atividades vulcânicas; (iv) relacionados a processos de metamorfismo e/ou deformação, e (v) resultantes de alteração e acúmulo em superfície. Dentre estes depósitos, os sedimentares acamadados são os mais importantes, por serem os geradores dos grandes depósitos de formações ferríferas bandadas - BIF's (*Banded Iron Formation*), formados, principalmente, durante o Pré-cambriano (TAKEHARA, 2004). Os BIF's constituem as mais importantes de todas as classes de mineralizações ferríferas. A figura 2.1 exhibe os principais depósitos de minério de ferro do mundo.



Figura 2.1 - Mapa-múndi com os principais depósitos de minério de Ferro de idade pré-cambrianos. (TAKEHARA, 2004)

Os depósitos de minério de ferro no QF ocorrem ao longo das rochas metamórficas do Supergrupo Minas (subdividida nos grupos Caraça, Itabira e Piracicaba). A Formação Cauê do Grupo Itabira concentra estes depósitos de ferro representados principalmente por itabiritos de fácies óxido laminados e metamorfozadas, em que os minerais de ferro foram transformados em hematita, magnetita ou martita. Ela encontra-se alterada até grandes profundidades em produtos friáveis, possuindo enorme quantidade de água devido à sua natureza porosa ou fraturada. A figura 2.2 exhibe o mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero. (PEREIRA, 2005)

Os itabiritos ricos, explorados na extração de ferro no QF, têm, ainda, alta liberação de grãos, especialmente sílica, nesses materiais, o enriquecimento supergênico foi favorecido pela lixiviação da sílica dos itabiritos em um ambiente de bacia confinada por rochas impermeáveis (filitos), diques básicos, e vulcânicas-sedimentares (xistos). Como resultado de processos supergênico, tectônicos hipogenético e hidrotermais, os minérios de ferro lavrados são de hematitas compactas, hematitas friáveis, itabiritos ricos e cangas. (SILVA, 2014)

O itabirito é definido pela alternância de bandas, constituídas de óxidos de ferro e minerais transparentes, de espessura milimétrica a centimétricas, com teor primário de ferro variando entre 20 % e 55% de Fe total. O itabirito pode ser friável, pulverulento ou compacto, dependendo da atuação de processos supergênico. Os itabiritos compactos ou

chapinha são minérios de itabirito rico, laminado e ligeiramente alterado por intemperismo. (TAKEHARA, 2004)

Em termos composicionais, o itabirito pode ser dividido em três tipos principais, baseados na composição dos minerais transparentes: Itabirito comum - constituído de bandas ricas em SiO₂ e óxido de ferro; Itabirito dolomítico - composto de bandas ricas em carbonatos e óxidos de Fe; Itabirito anfibolítico - compostos de bandas com anfibólios e óxido de Fe; os itabiritos manganíferos e filíticos são tipos subordinados, encontrados ocasionalmente nas interfaces entre os carbonatos estratigraficamente superior, e os filitos inferiores (tabela 2.1). (ROSIÉRI *et al.*, 1991, apud TAKEHARA, 2004)

Tabela 2.1 – Composição mineralógica dos diferentes tipos de minério do QF (ROSIÉRI *et al.*,1991).

| COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA | | | |
|-------------------------|------------------------|---------------------------------|---|
| Tipos de minério | Componentes Principais | | Acessórios |
| Itabirito Comum | Bandas claras | Quartzo | Hematita, clorita, sericita, dolomita, pirofilita, óxido de Mn. |
| | Bandas escuras | Óxido de Ferro | Sericita, quartzo, pirofilita. |
| Itabirito Dolomítico | Bandas claras | Dolomita | Quartzo, óxido de ferro*, pirofilita, talco, óxido de Mn. |
| | Bandas escuras | Óxido de Ferro | Quartzo, óxido de ferro*, dolomita. |
| Itabirito | Bandas | Tremolita/Actinolita/hornblenda | Quartzo, óxido de |

| | | | |
|--------------|----------------|----------------|-------------------------------|
| Anfibolítico | claras | | ferro*, dolomita. |
| | Bandas escuras | Óxido de Ferro | Quartzo, Anfibólio, dolomita. |
| Alto teor | Hematita | Óxido de Ferro | Magnetita, quartzo |

Romeiro (1997) cita que as rochas que possuem ferro são muito numerosas, porém, apenas a exploração de algumas são comercialmente viáveis, dentre elas a Hematita (Fe_2O_3), Magnetita (Fe_3O_4), Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e Siderita (FeCO_3) (tabela 2.2). A formação ferrífera mais importante em termos de comercialização são as rochas que contem a Hematita.

Tabela 2.2 - Fórmula química e conteúdo teórico de ferro (em %) dos principais minerais portadores de ferro. (ROMEIRO, 1997)

| TEOR DE FERRO NOS MINERAIS | | |
|----------------------------|--|---------------|
| Mineral | Fórmula química | Teor de ferro |
| Magnetita | Fe_3O_4 | 72,4 |
| Hematita | Fe_2O_3 | 69,9 |
| Goethita | $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ | 62,9 |
| Limonita | $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ | 59,8 |
| Ilmenita | FeTiO_3 | 36,8 |
| Siderita | FeCO_3 | 48,2 |
| Pirita | FeS_2 | 46,5 |
| Pirrotita | $\text{Fe}(1-x)\text{S}$ | 61 |

2.2. BENEFICIAMENTO DO MINÉRIO

O escopo das atividades desenvolvidas no processo de beneficiamento do minério de ferro se resume a adequação do tamanho das partículas (Britagem e Moagem), separação em classes de tamanhos (Peneiramento e Classificação) e elevação dos teores de elementos úteis e eliminação de elementos indesejáveis (Concentração). A figura 2.2 exibe o fluxo das principais operações desenvolvidas no processo de enriquecimento do minério de ferro, semelhante ao processo desenvolvido na ITM-I da Mina do Pico.

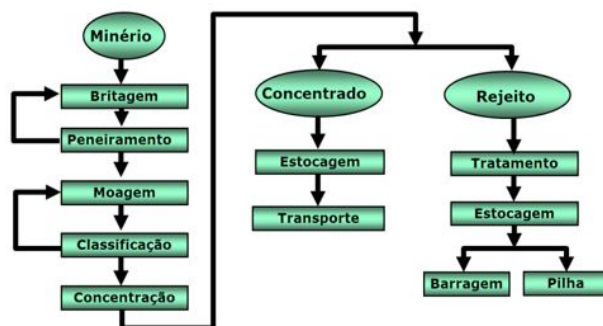


Figura 2.2 – Principais atividades realizadas no processo de enriquecimento do minério de ferro.

O rejeito total derivado do processo de beneficiamento mineral a ser disposto na barragem ou empilhado segundo uma geometria específica é separado em função da granulometria, classificado em rejeito fino e rejeito arenoso. Os finos são descartados do processo na etapa de classificação ou deslamagem e o rejeito arenoso é o material descartado na flotação, etapa de concentração do minério, estes dois materiais apresentam comportamento e características geotécnicas distintas.

Os processos exibidos na figura acima são quase em sua totalidade conduzidos à úmido, são processos complexos e a especificidade de cada etapa foge do escopo desta dissertação. O que deve ser salientado é que ao final dos processos de beneficiamento mineral o material de valor econômico rico em ferro é comercializado e o rejeito permanecerá por tempo indeterminado sob a responsabilidade da mineradora, que tem um grande desafio em mãos, que é estocar com segurança todo o volume de rejeito gerado concomitante com a produção.

2.3. TÉCNICAS PARA DESAGUAMENTO DE REJEITOS

A remoção de água de uma mistura sólido-líquido eleva o teor de sólidos da mistura. A evolução do estado físico do rejeito em função do processo de desaguamento pode ser observada na linha central da figura 2.3.

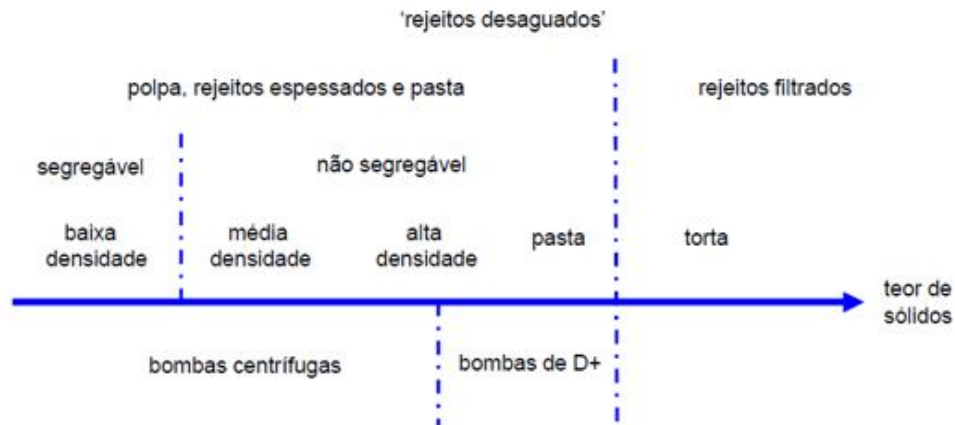


Figura 2.3 – Exibe a evolução do comportamento dos materiais desaguados. (PORTES, 2013)

A medida que o rejeito é espessado ocorre a elevação da sua densidade e a diminuição do seu comportamento segregável. O espessamento eleva a mistura sólido-líquido até uma consistência denominada de pasta, ainda com características de um fluido, que apresenta alto teor de sólidos. O comportamento do material desaguado pode ainda ser otimizado, atingindo os níveis ótimos de umidade para compactação dos rejeitos mediante aplicação do processo de filtração.

A polpa de rejeitos pode ser desaguada de maneira direta ou em etapas fracionadas, em função da granulometria do rejeito. Comumente adota-se uma rota de processo para desaguar o rejeito fino (lama) e outra para desaguar o rejeito grosso (arenoso). As principais técnicas para desaguamento dos rejeitos, que são comumente aplicadas na mineração, são o espessamento, a filtração e o ressecamento. Figueiredo (2007), lista os conceitos que caracterizam os diferentes tipos de rejeitos desaguados:

- Rejeitos espessados “*thickened tailings*” - rejeitos desaguados parcialmente, mas que apresentam ainda a consistência de uma polpa, com alto teor de sólidos e ainda passível de bombeamento;
- Rejeitos em pasta “*paste tailings*” - rejeitos espessados mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico (tipicamente um agente hidratante);
- Rejeitos filtrados a úmido “*wet cake tailings*” - rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não mais passível de bombeamento;

- Rejeitos filtrados a seco “*dry cake tailings*” - rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

2.3.1. ESPESSAMENTO

O conceito de disposição de rejeitos espessados foi introduzido por Robinsky em 1968 e consiste no aumento da concentração de sólidos em peso, por meio do desaguamento da polpa e conseqüente aumento do teor de sólidos. Neste processo são utilizados os espessadores que possuem a função de separar os sólidos do líquido via sedimentação de partículas por gravidade. O espessamento é, portanto, um processo mecânico. (ESPÓSITO, 2000)

O processo de espessamento é feito comumente em dispositivos chamados espessadores, que podem ser utilizados para espessamento de suspensões com menos de 1% até 50%, obtendo-se como produtos polpas espessadas com 10 % até cerca de 75% de sólidos. Os rejeitos espessados são, então, bombeados e descartados em superfície ou em cavidades.

O processo é feito comumente pelo aporte contínuo de polpa em espessadores de grande porte, frequentemente com mais de 50 m de diâmetro e com profundidades típicas entre 1 e 2 m. Apresentam, em geral, forma tronco-cônica que favorece a movimentação do underflow espessado e um sistema de raspadores cujo movimento complementa a ação de remoção do material para a zona de descarga situada no centro do fundo do equipamento. O fluxo principal é radial sendo o overflow descarregado pela parte superior em uma calha que se estende ao longo de todo o perímetro do espessador, este fluxo é constituído basicamente de água. A figura 2.4 exhibe um espessador convencional.



Figura 2.4 – Espessador convencional em operação na ITM-I. (Arquivo fotográfico, VALE S.A, 2016)

Os parâmetros fundamentais para dimensionamento de um espessador são a razão de espessamento (área necessária para disposição de uma tonelada de sólidos em 24 horas, para uma dada polpa) e a capacidade de liberação do *Overflow*. E as variáveis do processo são:

- Densidade, viscosidade e temperatura da polpa;
- Distribuição granulométrica dos sólidos;
- Tamanho e forma das partículas sólidas;
- pH da suspensão;
- Características de molhabilidade das partículas;
- Sistemas de alimentação da polpa e de retirada do *Underflow*;
- Influência da presença de correntes de convecção, efeitos de ventos.

Os espessadores em geral exigem grandes áreas para implantação devido ao grande porte da estrutura, estes equipamentos possuem uma elevada capacidade de estocagem e espessamento dos rejeitos, o processo é contínuo e a sua vida útil de operação é longa, os custos são relativamente baixos, a operação é simples e a eficiência da técnica pode ser aperfeiçoada com adição de reagentes (floculantes).

Existem variações como o Espessador de Alta Capacidade, este equipamento otimiza a eficiência do processo de espessamento de suspensões por meio da forma diferenciada de alimentação da polpa e pela adição de floculantes, permitindo a adoção de equipamentos de área bem menor (cerca de vinte vezes menor que a de um espessador convencional de mesma capacidade). A alimentação é crítica no projeto destes equipamentos pois os reagentes devem ser perfeitamente misturados a todo o volume de polpa sob tratamento.

A alimentação entra no espessador por um poço central onde o floculante é adicionado e rapidamente disperso na polpa através de um agitador mecânico. Placas radiais montadas inclinadas são parcialmente mergulhadas na polpa e os sólidos sedimentam-se escorregando nestas placas, promovendo um espessamento mais rápido e efetivo que no movimento vertical. Os floculantes são tipicamente compostos poliméricos (dosados em termos de gramas por tonelada de material desaguado) e a escolha do aditivo e da dosagem mais adequada devem ser objeto de estudos e análises específicas a cada situação.

Outra variação de equipamento é o Espessador de Lamelas. Específico, deste equipamento, a área de sedimentação é composta por um arranjo de placas inclinadas com espaçamentos reduzidos. A polpa de alimentação é introduzida num ponto entre as bordas superior e inferior das placas principais. Enquanto que no espessador convencional, a partícula percorre todo o percurso entre o tubo de alimentação e o fundo do tanque, no espessador de lamelas, a partícula sedimenta até encontrar a superfície de uma placa e, a partir daí, passa a escorregar sobre ela, aumentando exponencialmente a eficiência do processo.

A técnica de espessamento é amplamente aplicada na mineração tanto no produto final, quanto nos rejeitos, ou entre uma etapa e outra no processo de beneficiamento mineral. Diversos são os equipamentos voltados para o espessamento, abaixo estão listados os principais espessadores e algumas de suas características.

- Espessador convencional – elevada área para implantação, comumente não se utiliza floculantes e apresenta o material espessado com médias densidades;
- Espessador de alta capacidade – área reduzida para implantação, comumente utiliza-se floculantes e apresenta o material espessado com médias a altas

densidades. A figura 2.5 exibe a imagem de um espessador de alta capacidade, este em operação na Mina do Pico;

- Espessador de lamelas – Reduzida área de implantação, utiliza floculante e gera um material espessado com alta densidade.



Figura 2.5 – Espessador de alta capacidade em operação na Mina do Pico, 2017.

2.3.2. SEDIMENTAÇÃO E RESSECAMENTO

A operação se resume em ressecar o rejeito que chega às baias na forma de uma polpa e empilhá-lo em um local específico, preparado para tal finalidade. O desaguamento dos rejeitos nas baias ocorre por sedimentação das partículas sólidas e pela evaporação da água e as variáveis de controle são a densidade *in situ* e o teor de umidade do material adensado na baia.

A operação ocorre de modo empírico e em bateladas, os ciclos ocorrem em intervalos que variam em função do tempo de enchimento da baia, do período adensamento do rejeito e do tempo necessário para limpar a baia (dragagem). É uma operação que demanda extensa área para implantar o conjunto de baias e necessita de uma estrutura de escape voltada para acomodar os rejeitos na ocasião de uma falha, onde o fluxo de

rejeitos não pode ser totalmente controlado. O local ideal para implantar o conjunto de baias necessita estar devidamente regulamentado, principalmente a estrutura de escape (barragem).

O desaguamento de rejeitos em baias é uma atividade observada em alguns empreendimentos minerários que estão em operação no QF e tem sido aplicada em barragens que estão próximo do final da vida útil de operação, com o intuito de postergar a utilização da estrutura. Parte do material que chega a barragem é acomodado em baias e após o período necessário para o adensamento dos rejeitos, estes são dragados por equipamentos mecânicos, transportado por caminhões e ou correias até um local previamente preparado e lá empilhado por equipamentos convencionais de terraplanagem. Comumente implanta-se o conjunto de baias na região de montante do reservatório, no local onde os rejeitos estão emersos (secos), pois na ocasião de um evento crítico onde não foi possível interceptar todo o rejeito que chega à barragem, este será armazenado sem problema algum no próprio reservatório.

Recomenda-se que o material adensado esteja com um teor de umidade próximo da umidade ótima de compactação do material. Se necessário o período de adensamento dos rejeitos pode ser otimizado, espalhando-se os rejeitos, que estão pré adensados, nas plataformas existentes entre as baias, nesta atividade a água livre escoar por gravidade e com o aumento da exposição dos rejeitos aos efeitos do sol e do vento a secagem é mais rápida.

2.3.3. FILTRAGEM

Os filtros são uma ferramenta do processo de desaguamento aplicada aos rejeitos, existem tipos variados de equipamentos que realizam a filtração do rejeito com boa taxa de produtividade e com baixos teores de umidade no material filtrado. Para que ocorra a filtração, é necessária a ação de uma força incidente sobre as partículas, que pode ser obtida pela força da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Na mineração é usual a utilização de vácuo, que pode ser aplicado através de filtros de discos convencionais e filtros horizontais de correia, e pressão positiva, que pode ser aplicada com a utilização de filtros de pressão. (PORTES, 2013)

A filtração é o processo de separação da polpa (sólido – líquido) por meio da passagem do rejeito em meio filtrante, capaz de reter as partículas sólidas e permitir a passagem

do líquido. Rejeitos filtrados a úmido, *wet cake tailings*, são rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase-saturada, não passível de bombeamento. Rejeitos filtrados a seco, *dry cake tailings*, são rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

Os principais equipamentos utilizados na indústria da mineração são: Filtro Prensa Horizontal, Filtro Horizontal de Correia, Filtro de Disco Convencional e Filtro de Disco Cerâmico e os principais fatores que afetam a taxa de filtração são:

- A queda de pressão entre a alimentação e o lado mais distante do meio filtrante;
- A área de superfície filtrante;
- A viscosidade do filtrado;
- A resistência da torta;
- A resistência do meio filtrante.

A operação do Filtro de Disco a vácuo, equipamento exibido na figura 2.6, é contínua com um ciclo dividido em três etapas: na Fase I ocorre a zona de formação da torta, na Fase II ocorre a secagem da torta e na Fase III ocorre o sopro, induzido pela aplicação de ar comprimido, liberando o material.



Fonte: Figura 2.6 - Filtro a disco em operação na Mina do Pico, 2017.

De maneira semelhante ao filtro de discos opera o Filtro de Tambor (figura 2.7) com um ciclo de operação dividido em três fases (formação da torta, secagem e sopro).



Figura 2.7 – Filtro de Tambor. (Imagem de relatório de projeto Vale S.A.)

O ciclo do processo de filtragem nos Filtros Horizontais de Correia ocorre ao longo de toda a extensão da correia, vide figura 2.8. A alimentação da polpa acontece de maneira direta sobre o meio filtrante, o vácuo é aplicado e o desaguamento da polpa e a formação da torta ocorre ao longo de toda extensão do meio filtrante e, a remoção da torta é feita na zona de descarga, localizada no final da correia.

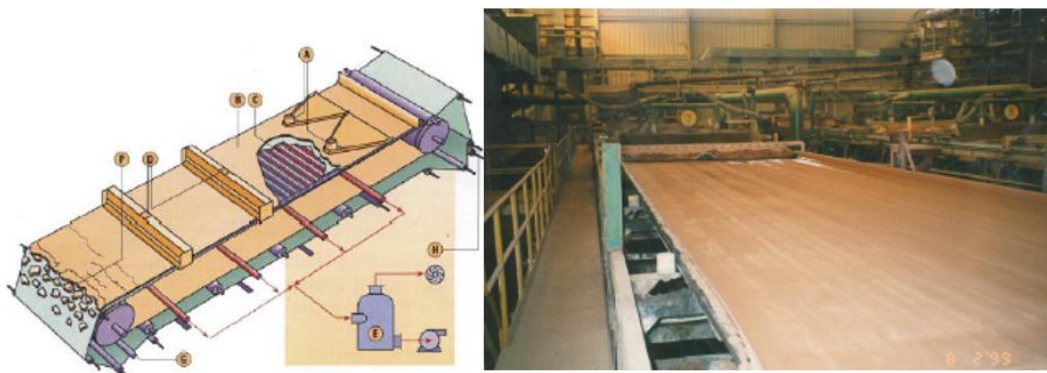


Figura 2.8 – Filtro de correia. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

O Filtro Prensa apresenta um ciclo contínuo que ocorre no circuito completo de operação do equipamento, vide figura 2.9. A alimentação das polpas ocorre de maneira direta nas câmaras existentes entre as placas, posteriormente aplica-se uma força de

pressão nas câmaras preenchidas com a polpa de rejeitos, a expulsão da água ocorre pelo meio filtrante e, o processo finaliza com a descarga mecânica da torta.



Figura 2.9 - Filtro Prensa em operação na Mina do Pico, 2017.

A capacidade de drenabilidade dos rejeitos está associada a curva característica de um solo ou rejeito (também chamada curva de retenção de água), que representa a relação entre o grau de saturação (ou o teor de umidade volumétrica, definido pela relação $(\Theta = S \cdot n)$, onde (n) é a porosidade do material e (S) a sucção mátrica (ou a sucção total). Cada tipo de material apresenta uma única curva característica devido à sua estrutura e que expressa a relação entre a quantidade de água presente no rejeito e a energia necessária para a sua remoção (sucção). A estrutura do solo tem enorme influência sobre a distribuição e o tamanho dos poros e, assim, sobre a forma da curva característica. A temperatura é outro fator que influencia fortemente as medidas de sucção. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

A escolha de um sistema de filtragem sob pressão ou a vácuo dependerá das características do material, do objetivo do desaguamento, da eficiência de cada filtro e somente poderá ser dimensionada de maneira adequada após a realização e testes em escala piloto. No caso do desaguamento de rejeitos, busca-se aproximar a umidade do material filtrado próximo da sua umidade ótima de compactação, dessa forma, os principais fatores a se avaliar no teste piloto são a eficiência e a umidade final do

material filtrado. Para equipamentos que tenham uma performance de produtividade semelhante, a escolha estará associada ao equipamento que gerar um filtrado mais próximo da umidade ótima de compactação deste material.

Guimarães (2011) conduziu um estudo de relevância para o assunto, fazendo análises comparativa entre os diversos equipamentos de filtragem: Filtro Prensa Horizontal, Filtro Horizontal de Correia, Filtro de Disco Convencional e Filtro de Disco Cerâmico, utilizando como amostras alguns rejeitos de minério de ferro coletados em empreendimentos em operação no Quadrilátero Ferrífero. Neste projeto Guimarães atingiu resultados em testes de bancada, onde as lamas, proveniente do processo de deslamagem, apresentaram um teor de umidade do produto filtrado variando entre 15 a 25% e os rejeitos arenosos, provenientes do processo de flotação, apresentaram teor de umidade do material filtrado variando entre 8 a 15%. Em seu estudo verificou também a eficiência do processo de filtragem para os rejeitos de minério de ferro, sendo filtrados estes rejeitos em diversos equipamentos, atingindo resultados satisfatórios, que estão apresentados nas Figuras 2.10, 2.11 e 2.12.

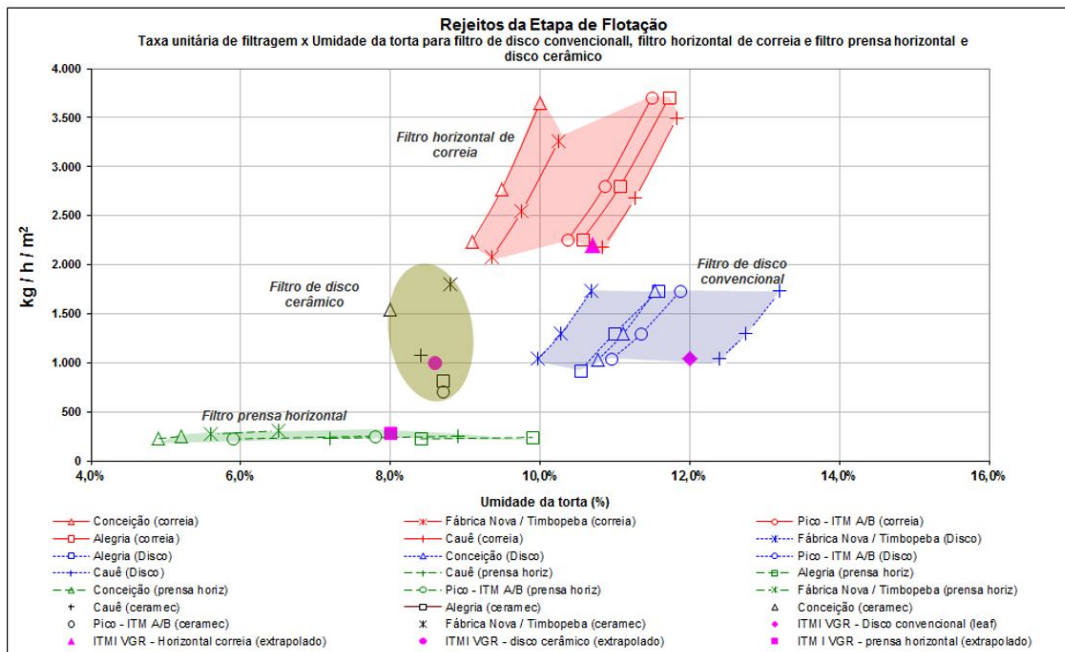


Figura 2.10 – Taxa unitária de filtragem (kg/h/m²) x (w%) teor de umidade da torta para filtro de disco convencional, filtro horizontal e disco cerâmico. Rejeitos provenientes da etapa de flotação. (GUIMARÃES, 2011)

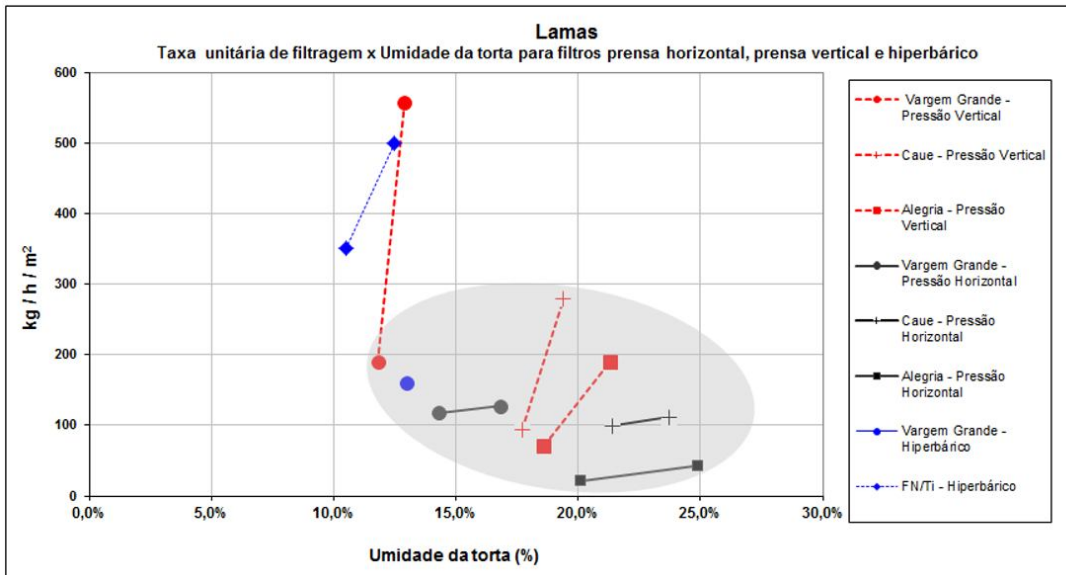


Figura 2.11 – Taxa unitária de filtragem (kg/h/m²) x (w%) teor de umidade da torta para filtro prensa horizontal, prensa vertical e hiperbárico. (GUIMARÃES, 2011)

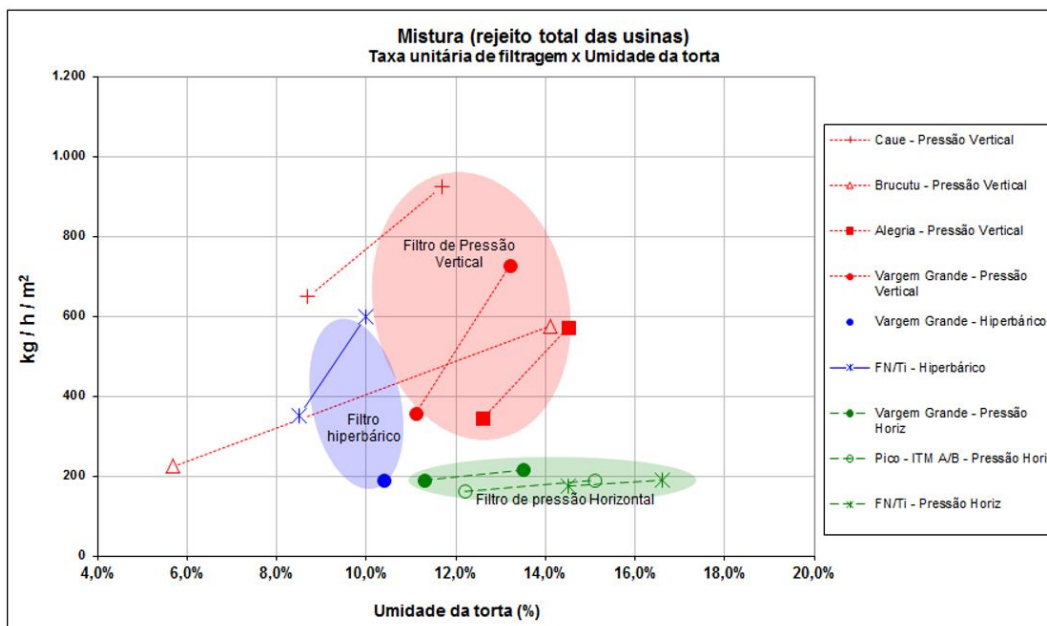


Figura 2.12 – Taxa unitária de filtragem (kg/h/m²) x (w%) teor de umidade da torta filtro prensa vertical, filtro hiperbárico e filtro de pressão horizontal. (GUIMARÃES, 2011)

A etapa de filtragem também pode ser realizada por peneiras desaguadoras (figura 2.20), unicamente para rejeitos mais grossos. O arranjo e aberturas efetivas da tela são os principais parâmetros associados à peneira que influenciam a eficiência do processo

de desaguamento. A abertura da tela ou crivo deve ser suficientemente pequena para reter os sólidos da mistura, permitindo apenas a passagem do fluido (eventualmente com ultrafinos suspensos). A eficiência do processo está associada às perdas de carga do fluxo geral do líquido (água) através do leito da peneira e das perdas localizadas através das aberturas do crivo da peneira (função da velocidade de saída pelas aberturas do crivo). O processo pode ser otimizado mediante a aplicação de diferenças de pressão entre a face superior do leito e a câmara de coleta do líquido filtrado (desaguamento hiperbárico ou a vácuo).



Figura 2.13 – Peneira desaguadora. (Arquivo fotográfico, VALE S.A, 2016)

Outra variável do desaguamento é a utilização de elementos geotêxteis. A técnica de desaguamento com a utilização de tubos geotêxteis tem a seguinte concepção: injetar a polpa sobre pressão no interior de formas têxteis tubulares, denominados de geoforma (figura 2.14) e organizar de maneira adequada os bags em uma área previamente preparada. O principal fator a ser estudado é o potencial de colmatação e a capacidade de retenção nas interfaces rejeitos-geotêxteis.

A geoforma também pode ser utilizada como estrutura de contenção, segundo arranjos diversos, possui aplicação simples e imediata em diferentes estágios da mineração, demandando análises específicas em termos da estabilidade mecânica e hidráulica dos tubos. Recomenda-se uma pré-avaliação das propriedades de desempenho dos geotêxteis, levando-se em conta as especificidades de cada rejeito e o efetivo desempenho destas estruturas.



Figura 2.14 – Tubos formados com geotêxtil (*geoforma*) preenchidos com rejeito.
(Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

O material utilizado nos *bags*, o geotêxtil pode ser também utilizado para construção de paliçadas desaguadoras, conforme exibido na figura 2.15. As paliçadas são projetadas visando evoluir a pilha de maneira direta, formando bermas e bancos sem a utilização de equipamentos de terraplanagem. A polpa é lançada nas estruturas por rejeitoduto, após o desaguamento da polpa, sobre o material seco constrói-se outra paliçada e dessa maneira a pilha vai sendo formada. Assim como qualquer outra estrutura de contenção está técnica necessita de um projeto específico, que garanta a segurança de uma operação que deve ser eficiente.

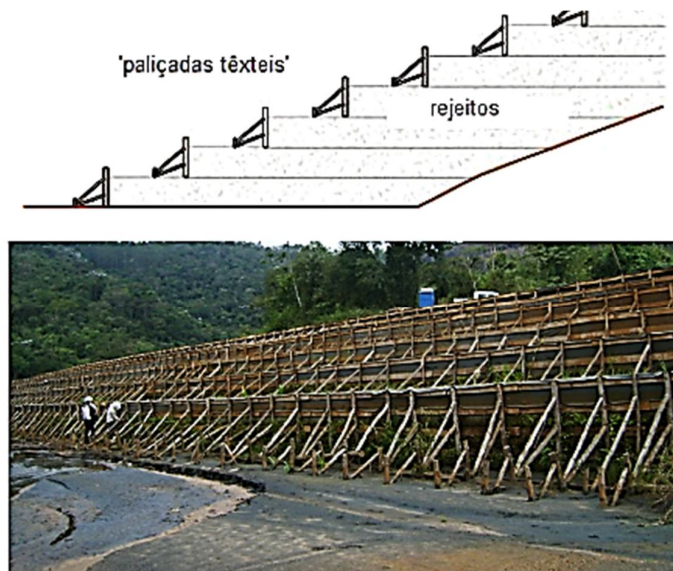


Figura 2.15 – Ilustra a formação das paliçadas com o geotêxtil. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

Pode ser citado como incremento no processo de desaguamento de rejeitos a aplicação de potencial elétrico, visando otimizar a eficiência das técnicas de espessamento e filtragem. Um exemplo de equipamento que já emprega aplicação de um potencial elétrico é o Filtro Prensa Eletrocinético. A aplicação de um campo elétrico gera a migração de cátions em direção ao catodo, se orientada de maneira correta a migração dos cátions proporciona uma força de arraste favorecendo a condução das partículas de água, aumentando assim a eficiência do processo de filtração deste equipamento.

A figura 2.23 exibe de maneira resumida a influência do campo elétrico e os elementos (molécula de água e cátions livres) responsáveis pela força física de arraste. A figura 2.24 ilustra os fenômenos Eletrocinético originados pela aplicação do potencial elétrico: Eletro-osmose (EO) (movimento da água), Eletroforese (EF) (movimento de partículas) e a Eletromigração (EM) (movimento de íons).

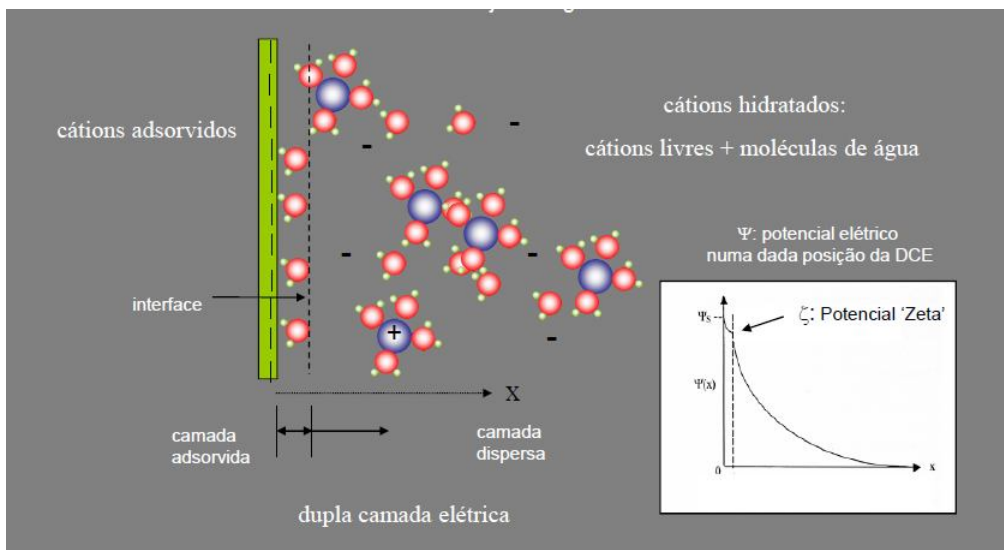


Figura 2.16 – Exibe os elementos que estão diretamente ligados no desaguamento Eletrocinético. Fonte: (FERREIRA, 2016)

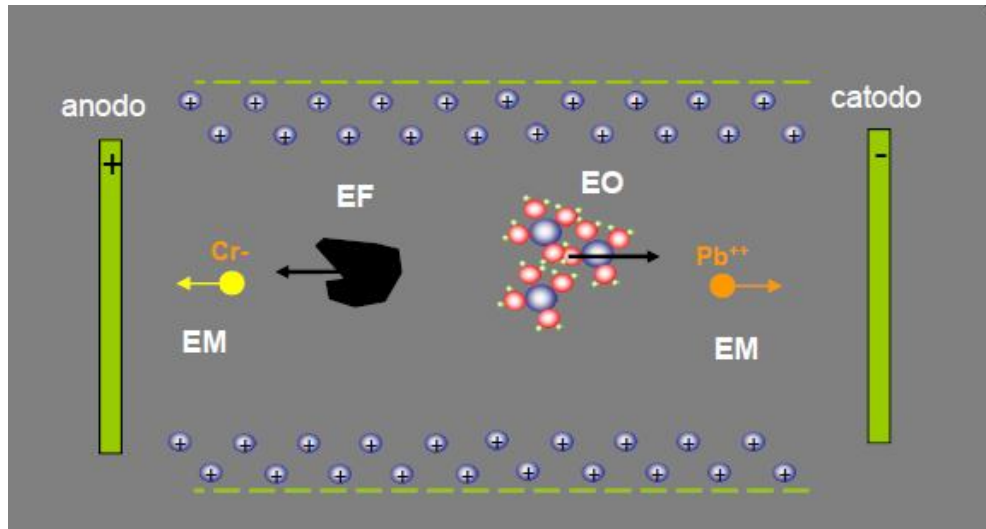


Figura 2.17 – Forças de reação causadas pela aplicação de um potencial elétrico no rejeito. (FERREIRA, 2016)

A taxa de aumento da eficiência do filtro está diretamente ligada ao potencial elétrico, quanto maior este for, maior será a força de arraste aplicado nas partículas de água. A figura 2.25 exibe a eficiência do processo em função da variação do teor de sólidos na polpa e em função do potencial elétrico.



Gráfico 2.18 – Eficiência do desaguamento em função do aumento do potencial elétrico e do teor de sólidos na polpa. Fonte: (FERREIRA, 2016)

2.4. DESAGUAMENTO DOS REJEITOS GERADOS NA ITM-I

Encontra-se em operação na Mina do Pico uma planta industrial dimensionada em escala piloto, voltada para realização de testes com os rejeitos gerados na Instalação de Tratamento de Minérios Itabiríticos (ITM-I).

A estrutura implantada conta com uma capacidade nominal instalada para desaguar cerca de 200 t/h de material. Nesta planta foram implantadas duas rotas de processo, uma para desaguar o rejeito arenoso e outra para desaguar o rejeito fino.

Busca-se analisar o comportamento prático da técnica de desaguar para os rejeitos gerados neste empreendimento, bem como analisar o comportamento do material após o seu empilhamento. A confecção do aterro experimental será feita em camadas de espessuras variadas com compactação exclusiva do trafeco dos equipamentos sobre o aterro.

As camadas construídas serão analisadas de modo individual e posteriormente o aterro será analisado, analisando as camadas em conjunto. Os dados até o presente momento são preliminares e se encontra no início, não estando aqui no presente estudo, citados todos os resultados obtidos até o presente momento, dessa forma considera-se aqui, os dados apresentados como preliminares e orientativo. A figura 2.19 exhibe imagem aérea da planta de desaguar em operação na Mina do Pico.



Figura 2.19 – Planta piloto para desaguar de rejeitos de minério de ferro. (Arquivo fotográfico, VALE S.A, 2016)

2.4.1. REJEITO ARENOSO (FLOTAÇÃO)

A rota de processo para filtrar o rejeito arenoso inicia-se com um espessador que tem por finalidade promover a primeira parcela de desaguamento dos rejeitos e remover pelo fluxo do *overflow* a espuma existente na polpa, derivada de reagentes adicionados ao processo de concentração na etapa de flotação. O *overflow* deste espessador é basicamente constituído de água e retorna para o processo, o fluxo que contém as partículas sólidas denominado como *underflow* é direcionado para o filtro de disco à vácuo.

O processo de desaguamento continua no filtro de disco a vácuo, utilizado na planta industrial em operação na Mina do Pico, no processo de filtração do rejeito arenoso, apresenta uma taxa média de filtragem da ordem 2.8 t/h/m², este número será utilizado para dimensionar a quantidade de filtros necessários para filtrar todo o rejeito arenoso gerado neste empreendimento.

Os rejeitos filtrados são considerados como sendo um material seco, que apresenta umidade suficiente para preencher uma parcela dos vazios entre as partículas, mas não tanto para impedir a compactação adequada do material. (DAVIES, 2011)

O filtrado tem apresentado um teor de umidade médio de 13,5%. Com este material foram construídas camadas, com diversas espessuras de aterro (0,15 m, 0,30 m, 0,60 m, 1,00 m e 4,00 m), formando uma pilha experimental, onde foram realizados ensaios geotécnicos voltados para caracterizar o material e o aterro. Os ensaios realizados para verificação da densidade *in situ*, dos aterros formados com as variações citadas da espessura das camadas, apresentaram um grau de compactação superior a 90%. Os índices de vazios, máximo e mínimo, foram obtidos pela execução de ensaios de laboratório. Os resultados foram plotados em um gráfico, relacionando o índice de vazios com o peso específico seco (figura 2.27).

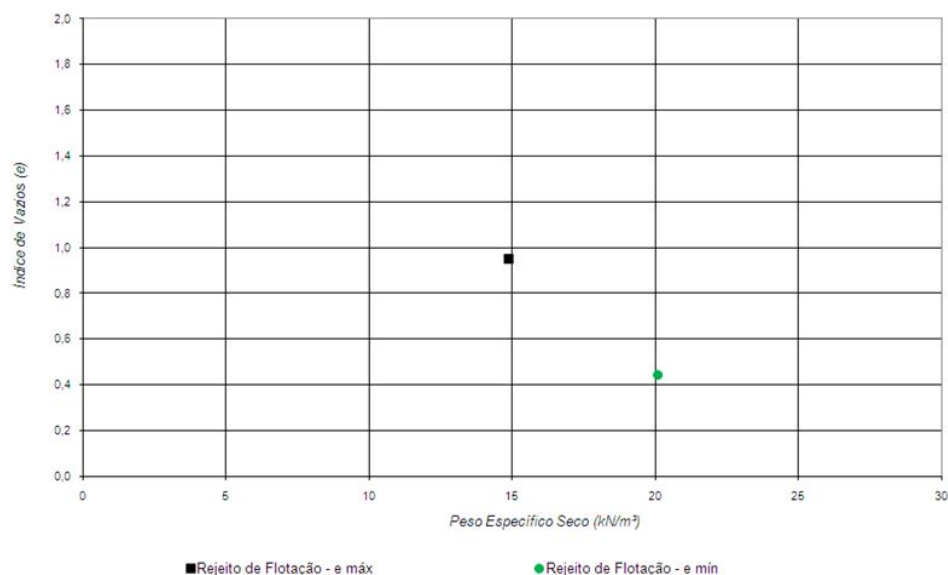


Figura 2.20 – Índice de vazios máximos e mínimos para o rejeito arenoso. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

O aterro experimental formado com o rejeito arenoso filtrado, disposto na pilha experimental com diferentes espessuras de camadas até atingir uma altura do aterro de 10m foi analisado por meio de ensaios geotécnicos. A tabela 2.6 exibe os parâmetros de compactação verificados pela aplicação de ensaios em laboratório e no aterro. Os ensaios de campo

Tabela 2.3 - Resumo dos parâmetros de compactação do rejeito arenoso para camada de formação do aterro com espessura de 1m. (Dados de Projeto Vale)

| Pilha experimental construída com rejeito arenoso filtrado em camadas de espessuras variadas | | | | | | |
|--|----------------------------------|------|------|------|------|------|
| Umidade ótima = 13,4%* | Amostras coletadas em 28/06/2016 | | | | | |
| Densidade máxima seca = 2kg/cm³* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Grau de compactação (%) do aterro* | 98,1 | 97,2 | 96,3 | 99 | 96,3 | 97,2 |
| Umidade ótima | 13,4 | 13,4 | 13,4 | 13,4 | 13,4 | 13,4 |
| Umidade" <i>in situ</i> " | 13,9 | 14,1 | 14 | 14 | 13,8 | 14 |
| Desvio de umidade | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,4 | 0,6 |
| * Ensaio: A densidade " <i>in situ</i> " foi determinada com a utilização do Cilindro Biselado, a densidade seca máxima e a umidade foram determinadas em laboratório. | | | | | | |

A figura 2.21 exibe a curva de distribuição granulométrica do rejeito arenoso, analisando-a, pode-se concluir:

- Proporção dos materiais sendo de: 61,3% areia, 36,7% silte e 2% de argila;
- Diâmetro efetivo ($D_{10}=0,025$ mm), este diâmetro corresponde ao ponto da curva de distribuição granulométrica de 10%, neste caso 10% das partículas possuem diâmetro inferior a 0,025 mm;
- Coeficiente de uniformidade ($CU > 15$) apresentando um rejeito uniforme, com pouca variação de diâmetro;
- Coeficiente de curvatura de ($CC = 1,17$), sendo classificado como um rejeito bem graduado;
- Permeabilidade ($K= 3,15 \times 10^{-4}$ cm/s), estimado em função da granulometria, utilizando a equação $K = 0,35 \cdot (D_{15})^2$; (BLIGHT, 1994)
- Não apresentou características de plasticidade no ensaio de determinação dos Limites de Consistência de Atterberg;
- O aterro formado com os rejeitos arenosos filtrados apresentou boa trafegabilidade dos equipamentos;
- Em condições de chuva o aterro teve um bom comportamento drenante, não apresentou erosões e nem ravinamentos na face dos taludes.

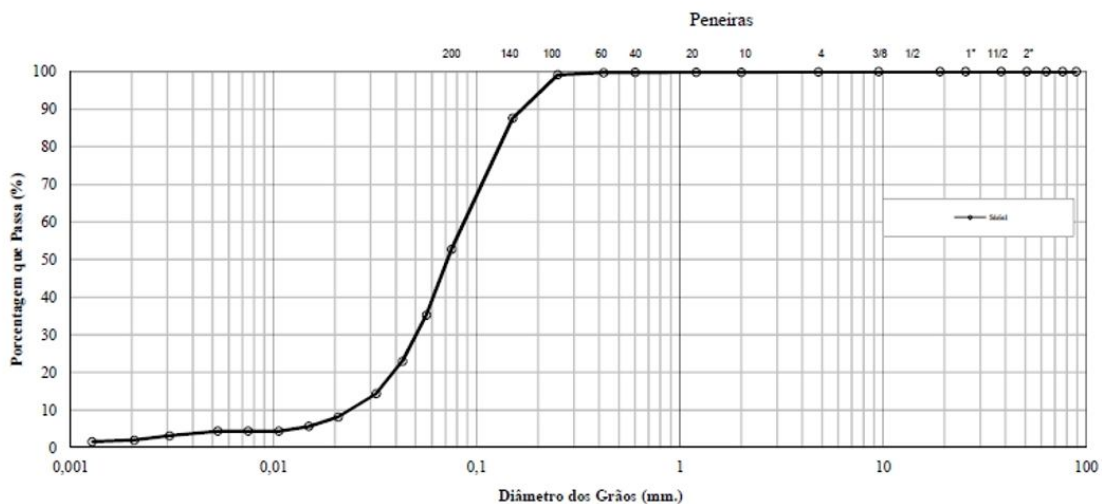


Figura 2.21 - Distribuição granulométrica do rejeito arenoso. (Dados de relatório de projeto Vale S.A.)

A figura 2.22 exibe a pilha experimental formada com os rejeitos arenosos filtrados, talude de 10 m, formados em camadas máximas de 4 m. A figura 2.23 ilustra a formação do aterro em camadas.



Figura 2.22 – Aterro experimental formado com os rejeitos arenosos da ITM-I, filtrados e empilhados em camadas máximas de 4 m. (Dados de relatório de projeto Vale S.A.)



Figura 2.23 – Ilustra a formação do aterro em camadas. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

Com o rejeito arenoso coletado na saída da ITM-I, foram realizados ensaios triaxiais CD e CU, para densidades relativas (DR) de 40, 60 e 80%, respectivamente. Foram

aplicadas tensões confinantes de 50, 100, 200 e 400 kPa em amostras deformadas saturadas por percolação e contra-pressão. Os resultados em termos de tensões totais e efetivas estão apresentados nas Figuras 2.24 e 2.25.

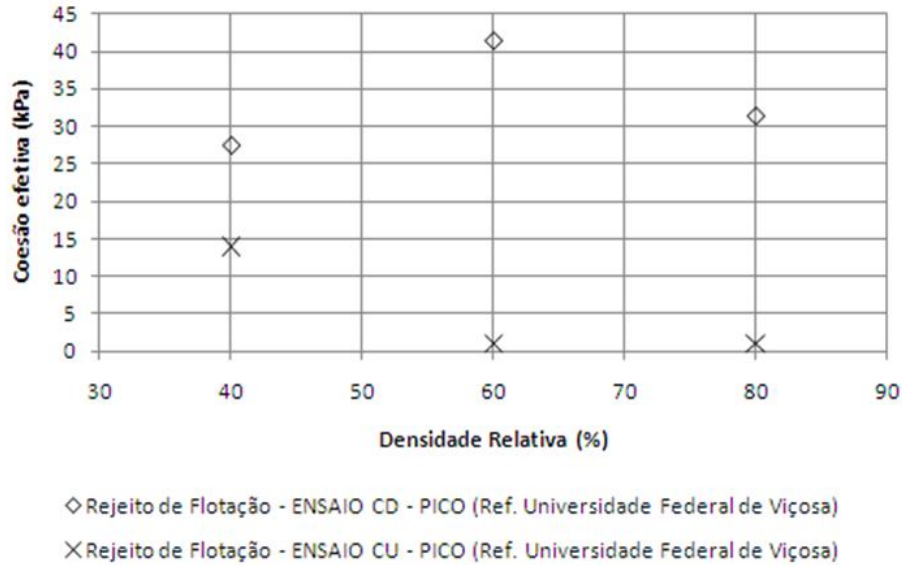


Figura 2.24 - Variação da coesão efetiva com a densidade relativa – ensaios triaxiais CD e CU – rejeito de flotação gerado na ITM-I. (Dados de Projeto Vale)

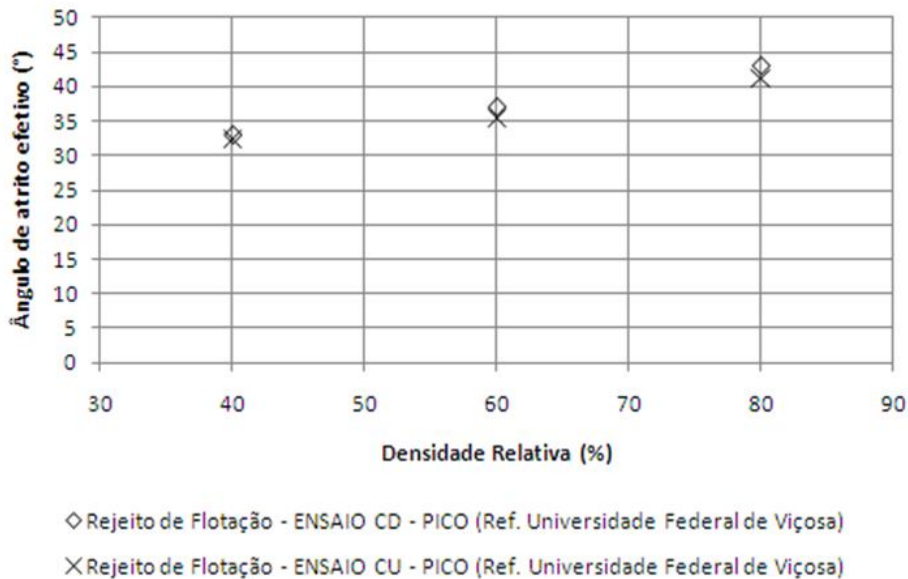


Figura 2.25 – Variação do ângulo de atrito efetivo com a densidade relativa – ensaios triaxiais CD e CU – rejeito de flotação ITM I Pico. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

Nota-se nas Figuras 2.24 e 2.25 que para os rejeitos arenosos filtrados parece haver uma boa correlação dos parâmetros de resistência com a densidade relativa. A tabela 2.4 exibe a análise granulo-química realizada no rejeito de flotação.

Tabela 2.4 – Exibe o resultado da análise granulo-química de uma amostra de rejeito de flotação da IMT-I da Mina do Pico. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A).

| Granulo-química Rejeito Flotação – ITM-I, Mina do Pico | | | | | | | | | |
|--|----------------|------------------|------------|-------|------------------|--------------------------------|-------|-------|------|
| Malha (mm) | Retido Simples | Retido Acumulado | % Passante | Fe | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | P | Mn | PPC |
| 0,300 | 0,1 | 0,1 | 99,9 | 0,78 | 97,66 | 0,21 | 0,010 | 0,010 | 0,17 |
| 0,210 | 2,4 | 2,5 | 97,5 | 0,78 | 97,61 | 0,21 | 0,010 | 0,010 | 0,17 |
| 0,150 | 9,8 | 12,4 | 87,6 | 0,78 | 97,93 | 0,19 | 0,010 | 0,010 | 0,17 |
| 0,106 | 10,8 | 23,2 | 76,8 | 1,35 | 98,70 | 0,18 | 0,010 | 0,010 | 0,10 |
| 0,075 | 9,8 | 33,0 | 67,0 | 4,07 | 93,80 | 0,25 | 0,010 | 0,010 | 0,15 |
| 0,045 | 12,0 | 45,0 | 55,0 | 18,02 | 73,64 | 0,97 | 0,011 | 0,013 | 0,50 |
| 0,030 | 6,3 | 51,3 | 48,7 | 67,54 | 2,66 | 0,32 | 0,014 | 0,018 | 0,48 |
| 0,022 | 13,1 | 64,4 | 35,6 | 62,44 | 9,98 | 0,51 | 0,017 | 0,025 | 0,61 |
| 0,016 | 20,4 | 84,8 | 15,2 | 64,89 | 5,09 | 0,76 | 0,028 | 0,040 | 1,05 |
| 0,011 | 9,7 | 94,5 | 5,5 | 59,58 | 4,60 | 4,05 | 0,101 | 0,195 | 5,14 |
| 0,009 | 1,4 | 95,9 | 4,1 | 58,68 | 5,28 | 4,26 | 0,102 | 0,196 | 5,27 |
| - 0,009 | 4,1 | 100,0 | 0,0 | 58,22 | 5,62 | 4,37 | 0,103 | 0,196 | 5,33 |
| Global - Calculada | 100,0 | - | - | 37,44 | 44,12 | 1,06 | 0,029 | 0,047 | 1,22 |

2.4.2. REJEITO FINO (DESLAMAGEM)

O processo para desaguar o rejeito fino se inicia no espessador convencional que aplica a primeira etapa do desaguamento, o fluxo do *underflow* apresenta um teor de sólidos da ordem de 40 a 45% em massa e segue para um espessador de alta densidade, neste equipamento a mistura sólido – líquido de alta densidade tem apresentado em média um

teor de 60% de sólidos em massa, durante 3 meses de operação deste circuito (dados preliminares). A partir da saída do espessador de alta densidade, o material espessado pode ser direcionado para o pátio, já previamente preparado, aonde serão realizados ensaios no aterro formado.

A figura 2.26 exibe a lama espessada, disposta em superfície horizontal para a realização de ensaios geotécnicos. Este material espessado sem o incremento de aditivos apresentou um ângulo de inclinação de 5° na superfície depositada com 62,5% de sólidos em massa e apresentou alta fluidez. A densidade do material *in situ*, verificada no aterro experimental feito com a lama espessada apresentou uma média de 1,8 g/cm³.

Na planta piloto em operação na Mina do Pico a lama espessada tem como alternativa seguir no processo de desaguamento, passando por um processo de filtragem no filtro prensa horizontal, que se mostrou aplicável para a filtragem da lama, apresentando um material filtrado com umidade média de 21% (figura 2.34). O processo precisa ser otimizado, pois a lama filtrada no momento de construção do aterro não apresentou boas condições de trafegabilidade dos equipamentos. A figura 2.27 exibe o tráfego dos caminhões sobre o piso do aterro formado com estes rejeitos. A figura 2.28 exibe a distribuição granulométrica do rejeito fino.



Figura 2.26 – Lama espessada, aterro formado em camadas. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)



Figura 2.27 – Lama espessada e filtrada na planta piloto instalada na mina do Pico.
(Dados de relatório de projeto, VALE S.A)



Figura 2.28 – Aterro formado com os rejeitos finos filtrados. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

CAPÍTULO 3 - PROPRIEDADES DE ENGENHARIA DOS REJEITOS

A caracterização geotécnica dos rejeitos de minério de ferro é fundamental para garantir uma operação segura e eficiente do sistema de disposição de rejeitos. Embora a natureza do minério de ferro e o tipo particular de rejeito gerado variem, os principais dados exigidos para uma boa caracterização de rejeitos de minério de ferro não variam muito, estando as principais características a se conhecer, para empilhamento dos rejeitos, listadas abaixo:

- Proporção, composição mineral e hábito (formato);
- Distribuição granulométrica;
- Limites de Atterberg (LL, LP e LC);
- Parâmetros de resistência;
- Massa específica natural;
- Massa específica dos sólidos;
- Parâmetros de permeabilidade;
- Teor de sólidos, consistência e ângulo de repouso dos materiais espessados;
- Parâmetros de compactação para os rejeitos filtrados;
- Índice de vazios máximo e mínimo;
- Compressibilidade e adensamento.

3.1. COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE REJEITOS GRANULARES

Rejeitos granulares constituídos de partículas arredondadas apresentam resistência drenada menor que rejeitos que apresentam partículas alongadas e angulares. O formato dos grãos afeta a estrutura do aterro, influencia no índice de vazios e pode alterar o ângulo de atrito entre os grãos. Estas características terão influência direta no comportamento do aterro formado com estes materiais, segundo Milonas (2006).

A mineralogia do rejeito tem grande importância no que diz respeito à formação do aterro e ao processo de sedimentação. As lentes ou camadas formadas e a heterogeneidade do material disposto estão ligados também à presença de minerais com densidades de grãos distintas. A composição química dos rejeitos de minério de ferro está relacionada aos diferentes minerais que o constituem e o formato dos grãos está ligado ao formato dos cristais dos minerais e principalmente ao tipo de processo e a intensidade que o minério foi submetido na fase de beneficiamento mineral. (MENDES, 2008)

A composição química está ligada aos minerais que constituem o rejeito, o aumento do teor de ferro eleva a massa específica dos grãos que o constituem, contribuindo para o aumento da densidade aparente seca do material e para o ganho de estabilidade do aterro. A presença de alguns argilo minerais pode prejudicar a estabilidade do aterro, estes materiais apresentam em sua composição uma predominância de partículas finas que prejudicam a drenabilidade e a percolação de água pelo aterro, elevando a poropressão. (GUIMARÃES, 2011)

Assim como as proporções variadas dos elementos presentes nos rejeitos, as distribuições granulométricas variadas também influenciam o comportamento físico geotécnico destes materiais. Guimarães (2011) verificou que a granulometria é um fator condicionante da eficiência da operação de filtragem. As lamas, que apresentam predominância de partículas finas com diâmetro inferior a 0,01mm apresentaram baixa eficiência, já os rejeitos arenosos, com predominância de partículas grossas, com diâmetro entre 0,01mm a 0,15mm, apresentaram maior eficiência no processo de filtragem.

Bossi verificou em seus estudos o comportamento dos rejeitos de minério de ferro correlacionando a porcentagem de finos na amostra, estudou diversos aspectos e abordou também a permeabilidade dos rejeitos, verificando o impacto da presença de partículas finas, que em excesso reduzem a permeabilidade dos materiais. A tabela 3.1 exibe uma correlação entre a granulometria do rejeito e a sua permeabilidade aproximada.

Tabela 3.1 - Permeabilidade versus a granulometria do rejeito. (BOSSI, 2015)

| PERMEABILIDADE DOS MATERIAIS | |
|---|---------------------------|
| Granulometria do Rejeito (predominância) | Permeabilidade – K (cm/s) |
| Areia Grossa | 10-1 |
| Areia Média | 10 -1 |

| | |
|----------------|-------------------------------------|
| Areia Fina | 10 ⁻² |
| Areia Siltosa | 10 ⁻³ |
| Areia Argilosa | 10 ⁻⁴ |
| Silte | 10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁵ |
| Argila Siltosa | 10 ⁻⁵ a 10 ⁻⁷ |
| Argila | <10 ⁻⁷ |

Contudo a permeabilidade de um dado material para modelamento de análises somente pode ser definida com representatividade mediante a execução de ensaios de campo e de laboratório, que devem ser analisados em conjunto. Santos (2004) realizou um estudo bastante abrangente no que tange a permeabilidade e a condutibilidade hidráulica dos rejeitos de minério de ferro, descrevendo de maneira objetiva os procedimentos para a execução dos principais ensaios para determinação da permeabilidade de estruturas formadas com rejeitos de minério de ferro.

Segundo Milonas (2006) a granulometria também está diretamente ligada aos parâmetros de resistência dos rejeitos, verifica-se uma dependência do ângulo de atrito com a granulometria, onde este aumenta juntamente com o crescimento do valor de D₅₀ do material. Rejeitos com predominância de partículas > 0,075mm, sem características de plasticidade, garantem uma elevada permeabilidade e resistência ao cisalhamento e também a baixa compressibilidade deste material.

A granulometria e o formato dos grãos condicionam os índices de vazios máximo e mínimo de um material, estes dados podem ser obtidos em laboratório, através de ensaios preconizados pela ABNT respectivamente pelas NBR (12004) e NBR (12051). Segundo Santos (2004) o índice de vazios natural (enat) pode ser verificado em campo através de métodos tradicionais como frasco de areia, o cilindro biselado, o balão de borracha e o densímetro nuclear, a Figura 3.1 ilustra estes equipamentos.

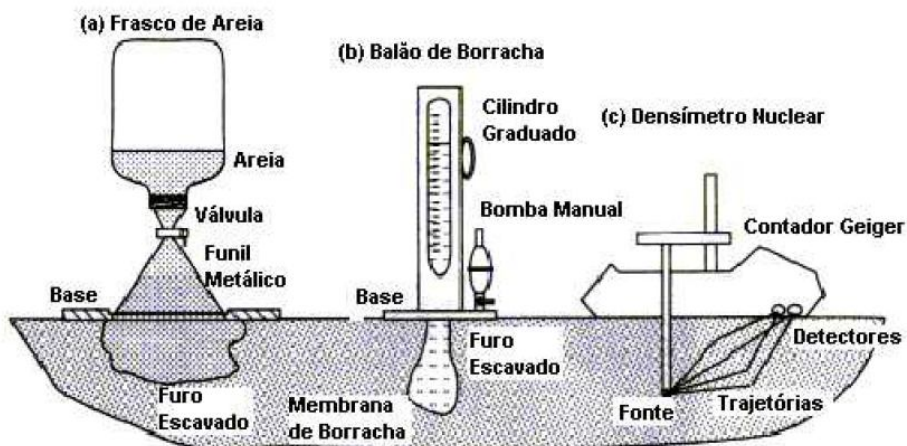


Figura 3.1 – a) Frasco de areia; b) balão de borracha; c) densímetro nuclear. (SANTOS, 2004)

Bossi (2015) avaliou o comportamento dos rejeitos de minério de ferro, mediante a variação da porcentagem de finos na amostra. O teor de finos dos rejeitos é representado pela fração do rejeito passante na peneira (#200). Na caracterização geotécnica destas amostras verificou-se a variação dos índices de vazios em função do aumento da proporção de material fino na amostra, a tabela 3.2 exhibe estes valores. Nota-se que o índice de vazios é muito maior na amostra com 100% de finos, contudo nas amostras com porcentagem de finos intermediária os índices de vazios variaram de maneira aleatória ao diâmetro das partículas, evidenciando que o volume de vazios varia também em função de outras propriedades, como o formato dos grãos, e o arranjo formado entre as partículas.

Tabela 3.2 – Apresenta os índices de vazios verificados nos experimentos conduzidos por Bossi (2015).

| Amostras de rejeitos de minério de ferro | Índice de Vazios | |
|--|------------------|------|
| | Máx. | Mín. |
| Rejeito (0% de finos) | 1,11 | 0,77 |
| Rejeito (10% finos) | 1,28 | 0,77 |

| | | |
|----------------------|------|------|
| Rejeito (20% finos) | 1,03 | 0,68 |
| Rejeito (30% finos) | 1,07 | 0,71 |
| Rejeito (40% finos) | 0,88 | 0,59 |
| Rejeito (100% finos) | 1,51 | 1,08 |

Arthur Casa Grande publicou em 1936 considerações sobre o comportamento dilatante das areias no momento do cisalhamento. Concluindo que a diminuição do volume no caso de areias fofas e o aumento de volume no caso de areias compactas, durante a deformação cisalhante, resultava na mesma densidade crítica ou índice de vazios críticos (figura 3.2), para qual o solo arenoso poderia sofrer alguma deformação sem modificação no volume. Podendo então o índice de vazios críticos ser obtido tanto de areias fofas quanto de areias compactas. (FREIRE NETO, 2009)

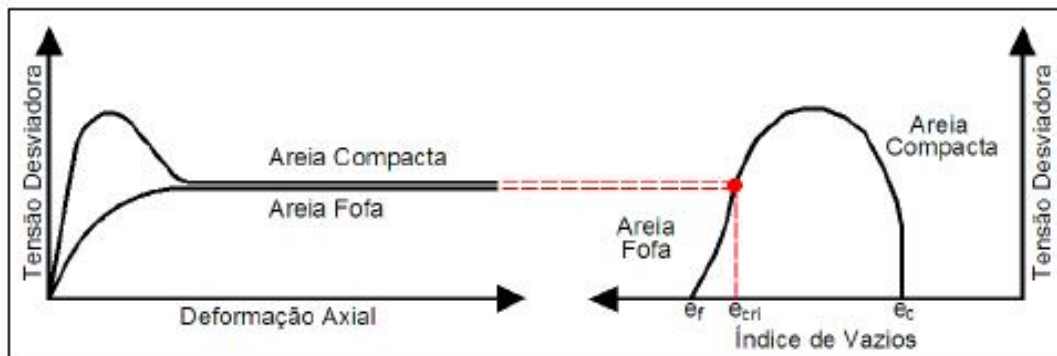


Figura 3.2 – Comportamento de areias fofas e compactas durante o cisalhamento.

(Freire Neto 2009).

Realizando ensaios com várias tensões confinantes, Casagrande concluiu que o índice de vazios crítico é reduzido com o aumento da tensão confinante. A linha que relaciona o índice de vazios crítico com o logaritmo da tensão confinante efetiva foi definida como “linha do estado crítico”. Esta linha separa os solos entre dilatantes e contrácteis. A figura 3.3 apresenta a linha do índice de vazios críticos. (FREIRE NETO, 2009)

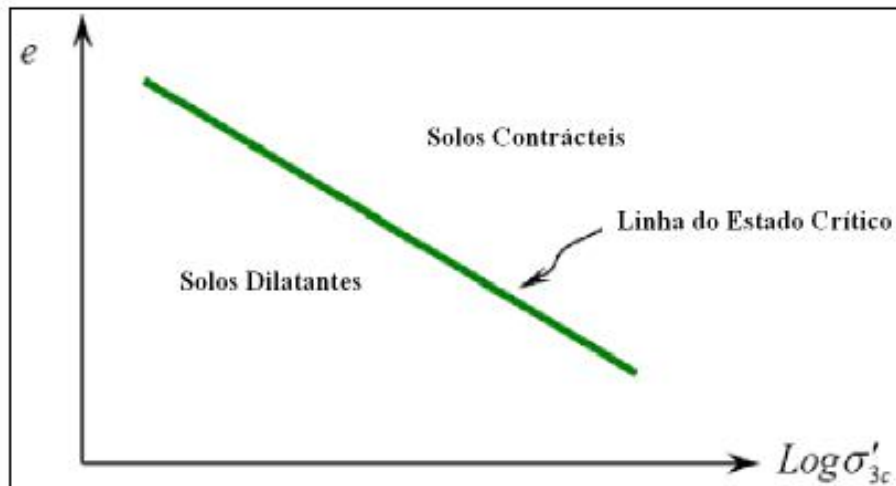


Figura 3.3 – Linha do índice de vazios críticos. (FREIRE NETO, 2009)

A compacidade e o arranjo estrutural dos materiais granulares são propriedades interdependentes. À medida que um determinado material granular é compactado, a sua capacidade de comportar-se de maneira instável é reduzida. Assim, a densidade relativa de um material granular pode ser entendida como uma variável bastante importante relacionada à possibilidade de ruptura por liquefação. Materiais granulares que apresentam baixos índices de vazios iniciais, ou seja, elevadas densidades relativas, apresentam chances reduzidas de rupturas. (YAMAMURO & LADE, 1997)

O processo de “strain-softening” (liquefação) ou perda de resistência com a deformação, apresentado por solos sem coesão, contrácteis e saturados, durante o cisalhamento não drenado. Este mecanismo é provocado pela tendência do solo em se deformar durante o cisalhamento, o que provoca variação das poropressões durante um carregamento não drenado. (FREIRE NETO, 2009)

A liquefação está potencialmente associada a solos que apresentam tendência à contração (redução de volume) durante o cisalhamento. Os solos dilatantes, ou seja, aqueles que experimentam acréscimos de volume durante a ação cisalhante, não apresentam susceptibilidade à liquefação. A impossibilidade do mecanismo nestes solos está conectada à justificativa de que a resistência ao cisalhamento não-drenada é maior do que a resistência drenada (ARAUJO, 2005)

O potencial de liquefação pode ser obtido pela interpretação de ensaios triaxiais especiais, analisando a granulometria associando ao uso de ábacos e formulações

empíricas e pelo conhecimento das condições físicas da estrutura e dos mecanismos de gatilho.

A resistência ao cisalhamento dos rejeitos de minério de ferro, devido à característica arenosa que estes possuem, é comandada pelo ângulo de atrito, variando entre 25° a 35° apresentando baixa ou nula coesão (ABRÃO, 1987). Os rejeitos descartados do beneficiamento do minério de ferro são materiais arenosos com uma parcela variável de materiais siltosos e argilosos, por isto a resistência ao cisalhamento dos rejeitos de ferro se assemelha a das areias e, é função do nível de tensões e do atrito entre os grãos, sendo este último influenciado principalmente pelo formato dos grãos, compactidade e pressão de confinamento. (MENDES, 2008)

O comportamento permeável das areias possibilita que nos carregamentos a que elas ficam submetidas, geralmente há tempo suficiente para que as pressões neutras devidas aos carregamentos se dissipem. Por esta razão, a resistência dos materiais arenosos é definida em termos de tensão efetiva e pelo atrito. (PINTO, 2006)

Verifica-se que os fatores que tem maior influência na resistência ao cisalhamento são a distribuição granulométrica, o formato dos grãos e a compactidade do material, resultados ilustrados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Ângulo de atrito conforme graduação e compactidade do rejeito. (BOSSI, 2015).

| Materiais | Ângulo de atrito | |
|------------------------------------|------------------|-----|
| Bem graduado de grãos angulares | 37° | 47° |
| Bem graduado de grãos arredondados | 30° | 40° |
| Mal graduado de grãos angulares | 35° | 43° |
| Mal graduado de grãos arredondados | 28° | 35° |

Os principais fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento dos rejeitos arenosos descritos por Bossi (2015) incluem:

- Distribuição granulométrica: quanto maior a distribuição (menos uniforme) melhor será o entrosamento entre partículas e maior será o ângulo de atrito;
- Formato dos grãos: rejeitos com grãos angulares tem maior ângulo de atrito que rejeitos com grãos arredondados;

- Tamanho dos grãos: rejeitos predominantemente grossos tendem a ser bem graduados, tendo maior entrosamento e maior ângulo de atrito.
- Resistência dos grãos: a resistência das partículas que constituem os rejeitos influencia na sua resistência.
- Presença de água: de um modo geral, o ângulo de atrito de uma areia saturada é aproximadamente igual ao da areia seca, ou um pouco menor, com algumas exceções. A presença de água em condição de não saturação gera sucção, que provoca um ganho de resistência temporário e geralmente de pequeno valor.
- Envelhecimento dos rejeitos: a experiência tem mostrado que rejeitos arenosos que se encontram dispostos há muitos anos apresenta muito menor deformabilidade quando relocado ou revolvido.

A resistência de materiais arenosos é governada por três componentes: o atrito entre a superfície dos grãos que depende da composição mineral e do tamanho das partículas; a energia necessária para rearranjar e reorientar os grãos e a energia requerida para causar a dilatação do material. As componentes citadas são dependentes da compactação do material. Como consequência deste conceito a compactação inicial das amostras tem uma grande influência sobre o comportamento dos materiais arenosos. Esta influência pode ser observada nas curvas de tensão versus deformação em ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Observa-se que amostras ensaiadas em estado fofo apresentam um comportamento do tipo dúctil, as tensões crescem lentamente com a deformação, atingindo um valor limite para as deformações relativamente altas. Já as amostras ensaiadas em estado compacto apresentam comportamento frágil, a tensão atinge um valor máximo com deformações relativamente pequenas, diminuindo com o aumento das deformações, tendendo a um valor último equivalente ao obtido para o mesmo material na condição fofo (figura 3.4a). (MILONAS, 2006)

O estado último corresponde ao índice de vazios crítico em que a areia sofre deformações sem variação de volume, isto ocorre devido as mudanças no índice de vazios durante o cisalhamento (figura 3.4b). As amostras densas ganham volume e se estabilizam ao final do ensaio. O comportamento dilatante é explicado pela tendência de os grãos deslocarem uns sobre os outros. A areia fofo, ao contrário apresenta uma

pequena diminuição de volume e posteriormente o volume praticamente não varia até o final do ensaio (figura 3.4c).

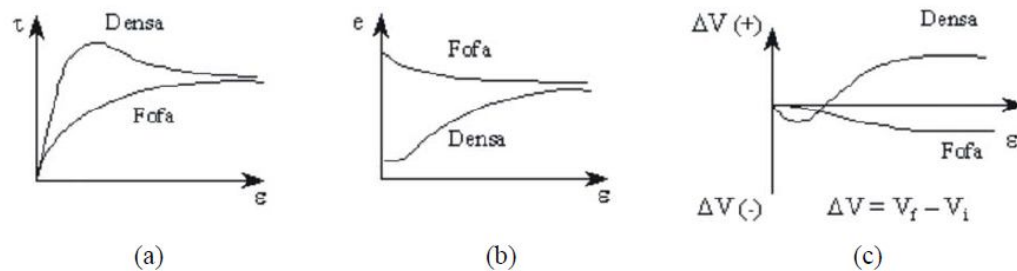


Figura 3.4 – Ilustra as relações de comportamento para areias densas e fofas, onde: (a) Tensão x Deformação; (b) Índice de vazios x Deformação; (c) Volume x Deformação.

(MILONAS 2006)

A medida da resistência dos solos pode ser obtida por ensaios de laboratório convencionais como os de cisalhamento direto e os de compressão triaxial. Segundo Head (1984), o ensaio de cisalhamento direto é o mais simples, direto e antigo procedimento para medir a resistência ao cisalhamento dos solos. Já o ensaio de compressão triaxial é considerado o ensaio convencional mais versátil para a determinação das propriedades de tensão-deformação do solo. O ensaio permite o controle da magnitude da tensão principal, o controle da drenagem e a medição das poropressões geradas no processo.

CAPÍTULO 4 - DIRETRIZES OPERACIONAIS

Os dados a serem levantados para uma operação segura e eficiente do empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro incluem:

- Características dos materiais de construção da pilha;
- Características do minério explorado;
- Variáveis do processo de beneficiamento do minério;
- Variáveis do processo de desaguamento;
- Variáveis do transporte dos materiais;
- Comportamento geotécnico da fundação;
- Técnicas para controle da drenagem interna da pilha;
- Técnicas para a confecção do aterro;
- Técnicas para acabamento dos taludes;
- Técnicas para controle de poeira;
- Técnicas para controle de águas pluviais;
- Adversidades locais também devem ser consideradas, como clima, relevo, geologia, entre outros aspectos e fatores que possam interferir na operação da pilha.

Tem-se então para cada projeto premissas e parâmetros construtivos diferenciados. Esse capítulo aborda as principais variáveis de controle a serem analisadas e adotadas no desenvolvimento de um projeto para empilhamento dos rejeitos de minério de ferro.

4.1. VARIÁVEIS DE CONTROLE

A primeira atividade de controle da técnica de empilhamento de rejeitos tem início no processo industrial e visa garantir que as atividades desenvolvidas no processamento mineral e na etapa de desaguamento não sofram variações bruscas de operação e mantenham as características pré-estabelecidas no projeto ao longo da vida útil de operação da pilha. A previsibilidade das possíveis variações permite adotar parâmetros geotécnicos mais representativos para o desenvolvimento do projeto e operação da pilha. Os fatores de controle para que o material se apresente ao final do processo de desaguamento dos rejeitos dentro do previsto incluem:

- Mineralogia da polpa - Variações significativas da distribuição granulométrica das partículas e da composição química dos rejeitos devem ser previstas, pois

podem afetar de maneira brusca a eficiência do processo de desagumamento e, conseqüentemente, prejudicar a operação e estabilidade da pilha;

- Teor de umidade da torta - Para rejeitos filtrados o teor de umidade deve ser próximo da umidade ótima de compactação do material, variações acima de 2% prejudicam a formação do aterro, requerem ações adicionais para o empilhamento, demandam tempo de ressecamento entre uma camada e outra e ou requerem disposição compartilhada com material estéril;
- Taxa unitária de filtragem - Para os rejeitos filtrados deve-se garantir a eficiência prevista dos filtros. A taxa unitária de filtragem medida em (t/h/m²), se resume em verificar a massa de rejeito filtrado em uma hora e dividi-la pela área total do meio filtrante do disco. A principal variável do processo de filtragem em filtros está relacionada a perda de pressão, que é aplicada para a remoção de água na torta pelo meio filtrante. Variações negativas na força de sucção prejudicam a eficiência do filtro, e geram uma torta filtrada com o teor de umidade elevado;
- Percentual de sólidos em massa na pasta - A redução do percentual de sólidos no rejeito espessado, prevista em projeto, altera as características de viscosidade e do ângulo de repouso deste material no momento da disposição e o tempo de ressecamento do material. O ângulo de repouso baixo, assim como alta viscosidade do material podem requerer ações adicionais no momento da disposição das lamas, portanto a atividade de espessamento deve garantir o espessamento previsto do material, pois variações bruscas podem acarretar na paralização total ou parcial do processamento mineral;
- Razão de espessamento - O espessador deve atender a geração de rejeitos e seu dimensionamento é feito em função da razão de espessamento, que consiste na área necessária para disposição de uma tonelada de sólidos em 24 h (para uma dada polpa) e da capacidade de liberação do *overflow*.

4.1.1. TRANSPORTE DO MATERIAL

O transporte do rejeito espessado é realizado com dutos (tubulação), trata-se de uma variável de controle a ser considerada para a formação da pilha, pois a velocidade de transporte e a distância podem interferir de maneira negativa nas características do material no momento da disposição. Alguns testes de abatimento do cone realizados em rejeitos de minério de ferro espessado, feitos de modo empírico, evidenciaram que o aumento da velocidade de transporte no rejeitoduto influenciam de maneira negativa o

comportamento do espessado. Constatou-se, ainda, que quanto maior a velocidade do fluxo espessado no duto maior foi o abatimento do cone.

As distâncias de bombeamento na prática podem alcançar até 1 quilômetro, sem interferir na viscosidade do material bombeado, segundo a horizontal e nas quedas verticais elas seriam ilimitadas. Os diâmetros da tubulação variam entre 100 e 200 mm (4 a 8 polegadas) e as velocidades de fluxo normalmente são menores do que 1(m/s). O excesso de velocidade tende a liquefazer o comportamento pastoso do material espessado. (BRACKEBUSCH, 2000)

O transporte do rejeito filtrado pode ser feito com correias transportadoras e ou caminhões, semelhante ao transporte do material estéril da mina. A atividade de transporte de grandes quantidades de massas na mineração seja por caminhão e ou por correia é comum, sendo um item a ser avaliado pelo caráter financeiro.

4.1.2. DRENAGEM INTERNA E FUNDAÇÃO DA PILHA

Para o estudo da fundação de uma pilha, são comumente programadas campanhas de sondagens à percussão, sondagens mistas e poços de investigação. Nas sondagens à percussão, são realizados ensaios de resistência à penetração SPT e, em profundidades específicas, devem ser previstos ensaios de infiltração para a determinação das permeabilidades dos materiais locais. Nos poços de investigação, procede-se à coleta de blocos indeformados para a obtenção das amostras utilizadas nos ensaios de laboratório. Em laboratório, as amostras são submetidas a diversos ensaios, tais como caracterização (granulometria por peneiramento e sedimentação, densidade real dos grãos e limites de consistência) e ensaios de resistência do tipo cisalhamento direto ou compressão triaxial para a determinação dos parâmetros de resistência dos materiais em termos de tensões totais e efetivas, simulando as condições operacionais reais da pilha assente sobre solo de fundação (SILVA, RKA, 2014).

Antecedendo ao início da disposição o terreno deve ser devidamente preparado. Deve-se remover a vegetação e os materiais inconsolidados, que apresentem baixa capacidade de suporte, como os solos moles e turfás, que são comumente encontrados em vales. Após a limpeza do terreno deve se instalar os dispositivos de drenagem interna, devidamente dimensionados, previstos em projeto. A figura 4.1 exibe a imagem de um dispositivo de drenagem interna em implantação, projetado para escoar o fluxo interno de água de uma

pilha de estéril, em operação na mina do Pico. O detalhe ampliado na imagem ilustra as transições que deve ter um dispositivo padrão de drenagem interna, do interior para a extremidade, tem-se: pedra de mão, brita e areia. Estes elementos combinados de maneira adequada garantem que o dreno não colmate.



Figura 4.1 - Ilustra a imagem de um dispositivo de drenagem interna em desenvolvimento, evidenciando as transições filtrantes. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

A operação adequada do dreno garante que não haja excessos de poropressão no interior do aterro. Os drenos internos devem ser dimensionados de modo que todo fluxo de água que infiltre no aterro seja conduzindo para fora da pilha de maneira adequada, impedindo assim que a linha freática se eleve no interior dos taludes. A elevação da linha freática no interior do maciço está diretamente relacionada com a má operação dos drenos e, dessa forma, o controle da linha freática deve ser previsto na fase de projeto.

4.1.3. DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS ESPESSADOS

Rejeitos espessados são uma realidade para preenchimento de cavidades há décadas. Comumente, utiliza-se aditivos químicos para melhorar o comportamento destes materiais, como ligantes, floculantes e desidratantes. (DAVIES, 2011)

A figura 4.2 ilustra a metodologia usualmente aplicada para a disposição dos rejeitos espessados em superfície. Neste exemplo mantém-se o eixo do ponto de lançamento mudando apenas a cota de elevação à medida que a pilha evolui, formando uma pilha em forma de cone.

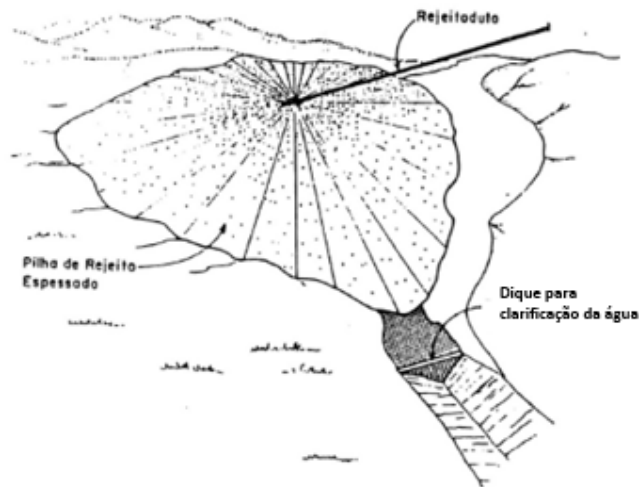


Figura 4.2 – Ilustra a formação geométrica de uma pilha de rejeitos espessados com o ponto de lançamento da pasta no centro da estrutura. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

A figura 4.3 exhibe os possíveis ângulos de repouso e estruturas de retenção necessários para uma pasta mineral, em comparação com uma polpa de alta densidade, considerando diferentes tipos de rejeitos.

O ângulo de repouso, das pastas minerais quando são dispostas em uma superfície plana ou inclinada, está relacionado com a consistência da pasta, e pode estar compreendido na faixa de 5 até 30% de inclinação. (BRACKEBUSCH, 2000). O manejo estratégico dos pontos de disposição, mudando-se o eixo do ponto de lançamento, formando diversos cones até se atingir a geometria final planejada, se executado de maneira correta, tal disposição pode trazer ganhos para a segurança, pois a alternância de lançamento dos pontos possibilita o controle de ressecamento da pasta com maior rigor. A figura 4.4 exhibe a disposição de um rejeito espessado através de múltiplas torres.

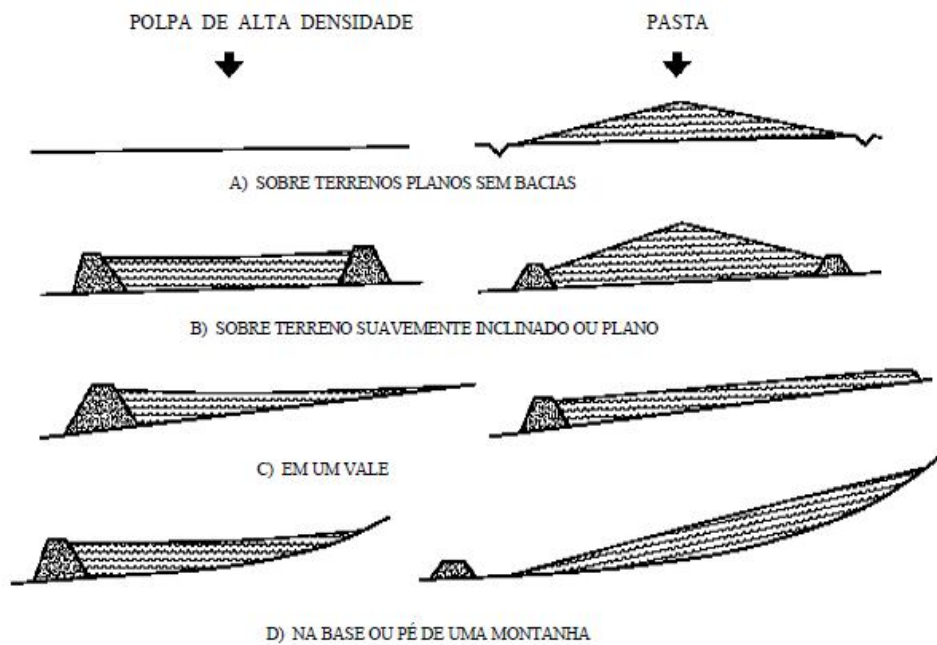


Figura 4.3 – Formas para a disposição de pastas. (LANDRIALT, 2002)



Figura 4.4 – Ilustra a formação do cone na disposição de rejeito espessado. (Notas de Aula, GOMES RC, 2016)

A estrutura formada pela disposição da lama espessada, se necessário pode ser confinada pelo material estéril, ou pelo rejeito arenoso filtrado, ou apenas ser protegida com vegetação.

Deve ser previsto, em projeto, uma estrutura para conter os efluentes sólidos carreados da pilha pelo efeito da erodibilidade dos taludes em função das chuvas, essa estrutura de contenção não tem como finalidade conter o rejeito, ela visa garantir a clarificação da água lançada ao meio ambiente, retendo as partículas sólidas. Inspeções visuais neste material após o seu ressecamento evidenciaram baixíssima susceptibilidade ao processo erosivo.

Os taludes da pilha deverão ser devidamente protegidos, as técnicas para proteção dos taludes com vegetação são bastante aplicadas na mineração e pode ser citado a hidro-semeadura, biomanta e grama. Também deverão ser instalados os dispositivos de drenagem superficial previstos em projeto, bem como a instalação da instrumentação geotécnica necessária para realização de um monitoramento adequado para a estrutura.

4.1.4. DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS FILTRADOS

A disposição de rejeitos filtrados tende a ser mais simples que a disposição de rejeitos espessados e, geralmente, é feita com o auxílio de equipamentos convencionais de terraplanagem. A pilha deve ser construída em camadas com espessuras pré dimensionadas, prevista em projeto, determinadas em função de se obter um adensamento mínimo necessário para garantir a estabilidade do arranjo proposto para a formação da pilha. O arranjo proposto para a disposição de rejeitos desaguados de minério de ferro é padrão, assumindo uma formação em “bolo de noiva” conforme pode ser observado na figura 4.5.

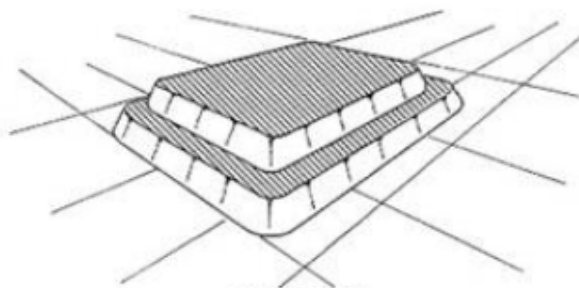


Figura 4.5 – Ilustra a formação padrão de uma pilha com rejeitos filtrados.

O plano de disposição sequenciado para o desenvolvimento da pilha deve ser desenvolvido adotando-se como premissa o método ascendente de construção, ocupando o terreno do ponto de menor cota até se atingir o topo da pilha.

O ângulo de repouso natural dos rejeitos de minério de ferro é da ordem de 33 a 37°, inclinação relativamente elevada para os taludes, dessa forma esse ângulo deverá ser abatido. Esta providência visa garantir a estabilidade dos taludes individuais, além de facilitar a sua revegetação (SILVA, 2016). A figura 4.6 exibe os 4 taludes rebatidos, de 10 m de altura cada, formado com rejeitos de minério de ferro desaguado em baias e empilhado utilizando técnicas convencionais de terraplanagem, observa-se que os dois primeiros bancos já se encontram com vegetação na face dos taludes, evidenciando que o plantio de vegetação no rejeito de minério de ferro é possível.



Figura 4.6 - Empilhamento de rejeitos de minério de ferro desaguado em baias. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

A figura 4.7 exibe o método construtivo dos taludes, prevendo um espaço entre o talude operacional e o limite geométrico da pilha, para possibilitar conformar o talude com a inclinação da face de acordo com o projeto.

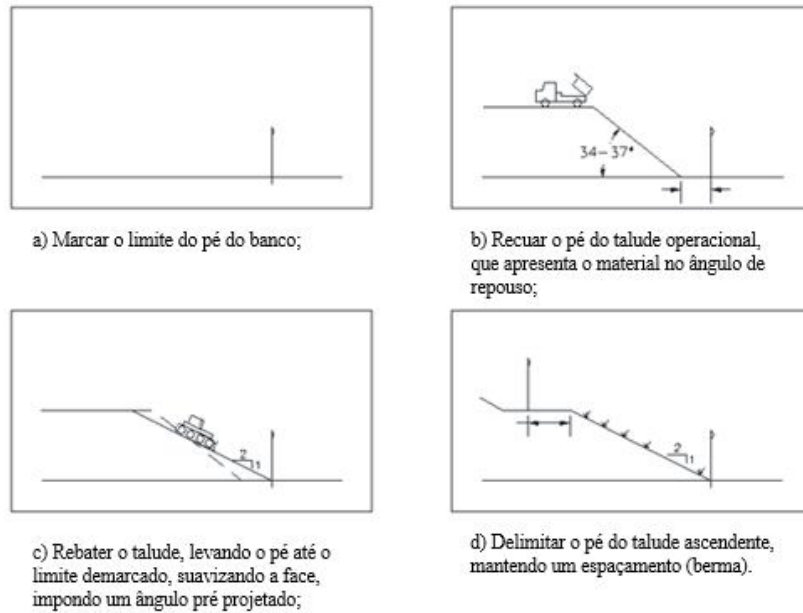


Figura 4.7 – Ilustra o método construtivo dos taludes. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

A superfície dos bancos deverá ser revegetada, a figura 4.8 ilustra a configuração final de uma pilha típica da região do QF, formado com material estéril, na sua etapa de fechamento.



Figura 4.8 – Configuração final de uma pilha formada com material estéril, estrutura localizada QF. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

4.1.5. DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA.

Os materiais estéreis são compostos por rochas e solos de baixo ou nulo teor de ferro, provenientes do decapeamento do terreno superficial da Cava do Galinheiro existentes na mina do Pico. Regionalmente, a área estudada localiza-se sobre as unidades estratigráficas do Supergrupo Minas e insere-se no contexto evolutivo da porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, mais precisamente nas rochas metassedimentares do Grupo Piracicaba e Grupo Itabira.

A relação estéril minério (REM) compreende a massa necessária a ser retirada de material estéril para liberar uma tonelada de minério, esta relação tem papel fundamental no desembolso financeiro do empreendedor e na liberação do minério para a lavra. Em condições normais de operação da mina, sempre haverá em paralelo com a lavra do minério a remoção do estéril, sendo necessário um local adequado para a disposição contínua do material estéril. A má gestão pode levar à uma situação onde não se tem mais minério liberado para a lavra.

As pilhas de estéreis são formadas pelas técnicas convencionais de terraplanagem, utilizando o método ascendente de construção, não possui controle de compactação e é preconizado pela NBR029 (ABNT 2006). Os parâmetros geotécnicos adotados para o material estéril foram extraídos da associação de diversos projetos executivos de pilhas de estéreis em operação na Mina do Pico. A utilização do material estéril na disposição compartilhada destes materiais pode ser justificada pelos seguintes fatores:

- Se a pilha formada com rejeitos filtrados e os taludes apresentarem um ($FS < 1.5$) o material estéril pode ser disposto na face da pilha com o intuito de estabilizar a geometria proposta. A espessura de material estéril a ser lançada é variável em função do FS, determina-se uma camada de estéril de espessura tal que a geometria proposta apresente ($FS > 1.5$).
- Os rejeitos de minério de ferro têm como característica baixa ou nula coesão, por este fato podem apresentar alto índice de erodibilidade se ficarem expostos, para os rejeitos que possuem características geotécnicas adequadas e o aterro formado com estes materiais se apresenta seguro, o estéril pode ser associado à disposição para a proteção da face do talude contra o processo erosivo. A camada de estéril é variável em função da dimensão dos equipamentos que realizarão as atividades de operação da pilha. Existem técnicas altamente

aplicadas na mineração que são capazes de controlar a erodibilidade dos taludes formados com os rejeitos, cabe a equipe responsável para desenvolvimento do projeto realizar análises de viabilidade técnica e financeira para a proteção da face dos taludes, o estéril pode ser uma das alternativas;

- Por questões estratégicas do empreendedor, o material estéril pode ser associado à disposição de forma compartilhada com os rejeitos, com o objetivo de aproveitamento de um único licenciamento, evitando assim a necessidade de operação de duas estruturas simultâneas, dispõe-se os três materiais na mesma pilha.

As variáveis para formação da pilha utilizando rejeitos e estéreis requerem um cuidadoso plano de disposição. No cenário onde os rejeitos finos não forem dispostos na pilha, deve-se prever uma estrutura para acomodá-los. Pode ser uma barragem em operação ou uma cava já exaurida. Entre as diferentes associações para a disposição destes materiais, temos:

- Rejeito filtrado confinado pelo estéril;
- Pilha formada em camadas alternadas entre estéril e rejeito, finalizando a face da pilha com estéril;
- Disposição de estéril em uma face da pilha e de rejeito arenoso filtrado na outra face;
- Lama espessada confinada pelo estéril e ou pelo rejeito arenoso filtrado (Figura 2.46);
- Os materiais podem ser previamente misturados antes da disposição, gerando um material distinto, este deve ser analisado para cada proporção de materiais na mistura.

A figura 4.9 exhibe a configuração final da pilha formada pela disposição em camadas de material estéril alternadas com a disposição de rejeito filtrado. As espessuras das camadas devem ser pré-determinadas em função de testes experimentais e devem ser previstas no projeto da pilha. Deve-se atentar para a relação entre a geração de rejeito e a movimentação de material estéril, o balanço de massa, *versus* o volume das camadas a serem construídas, *versus* as frentes de disposição, estas devem ser associadas de maneira adequada, de modo que sempre existam locais disponíveis na pilha para receber os dois materiais ao mesmo tempo.

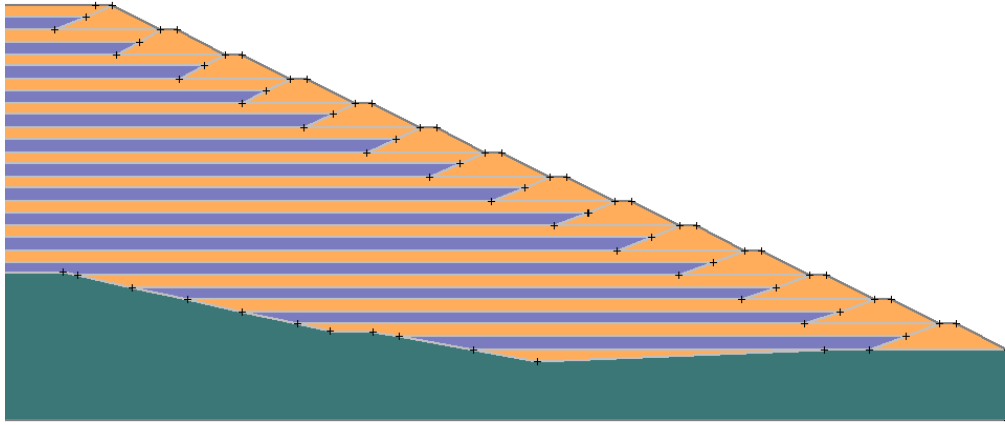


Figura 4.9 – Metodologia de formação da pilha com rejeitos de minério de ferro alternados com estéril. Em azul o rejeito, em alaranjado o estéril e em verde a fundação da pilha.

A pilha pode ser ocupada em parte pelo rejeito arenoso filtrado e em parte pelo material estéril, a figura 4.10 ilustra uma pilha assim projetada.

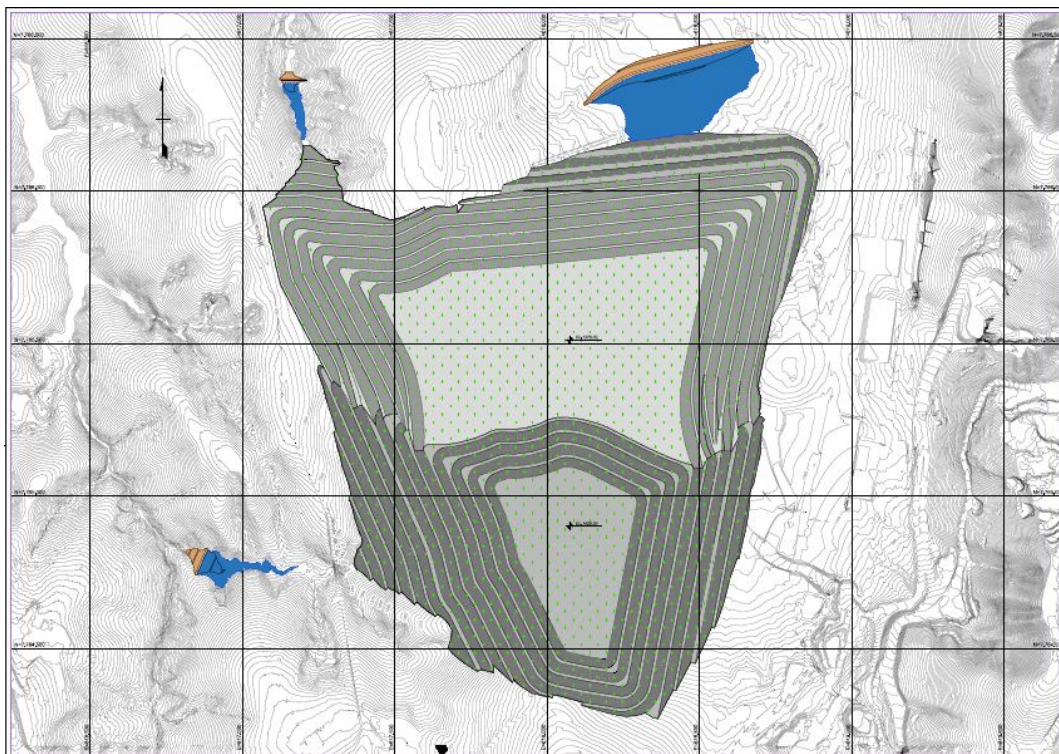


Figura 4.10 – Disposição compartilhada entre rejeito arenoso filtrado e material estéril.
(Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

A estrutura formada com rejeito fino espessado, rejeito arenoso filtrado e o estéril, consiste na operação mais complexa. Contudo, é uma técnica viável do ponto de vista operacional, desde que sejam garantidos as premissas e os critérios de projeto previstos para a construção segura da pilha. Nesse cenário o rejeito filtrado é lançado confinando a lama espessada e o material estéril é disposto confinando o rejeito filtrado. A figura 4.11 ilustra a estrutura formada com estes materiais.

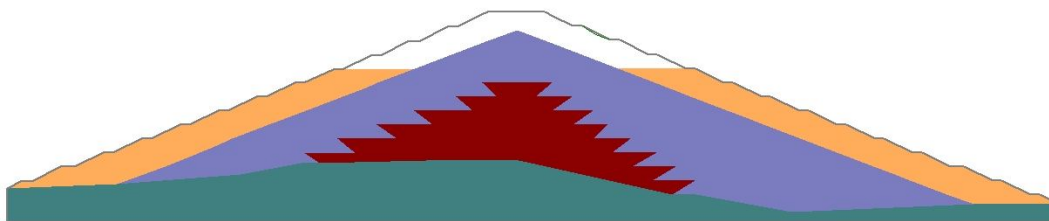


Figura 4.11 – Formação da pilha associando os rejeitos desaguados com o material estéril, dispostos em regiões individualizadas da pilha. Tem-se em vermelho a lama espessada, em azul o rejeito arenoso filtrado, em alaranjado o material estéril e em verde a fundação da pilha.

A operação consiste em delimitar-se as extremidades da porção central da pilha, área onde será disposta a lama espessada, está delimitação deverá ser feita pela formação de aterros com o rejeito arenoso filtrado, implantados em pontos topograficamente estratégicos, criando-se um local adequado para a disposição da lama espessada, que pode ser lançada através de um eixo único com alteamentos sucessivos da torre central, aplicados à medida que a pilha evolui, ou pode se prever um manejo dos pontos de lançamento objetivando um ressecamento mais rápido da pasta. Nessa operação o grande desafio é compatibilizar a geração de lama espessada com o volume disponível de baias, formadas pela disposição estratégica de rejeito arenoso filtrado, *associado* ao tempo necessário de ressecamento deste material, de modo que não seja disposta uma camada de lama sobre outra camada que ainda não esteja, adequadamente, ressecada.

O volume de baias disponível para o lançamento da lama espessada é gerado pela confecção estratégica dos taludes formados com o rejeito arenoso filtrado e o ponto de lançamento da lama espessada deve estar sempre abaixo da crista destes taludes, garantindo assim o confinamento adequado da lama espessada. A conclusão da geometria final prevista é realizada com a disposição em paralelo do material estéril. Em termos de aproveitamento da área licenciada para o empilhamento, a disposição dos

três materiais em uma mesma estrutura, já licenciada e pré-projetada para receber estes materiais, pode ser uma alternativa estratégica para o empreendedor, que elimina a necessidade de se licenciar uma nova estrutura, que seria exclusiva para receber o rejeito fino. A figura 4.12 exibe em etapas a evolução da pilha com a disposição da lama espessada.

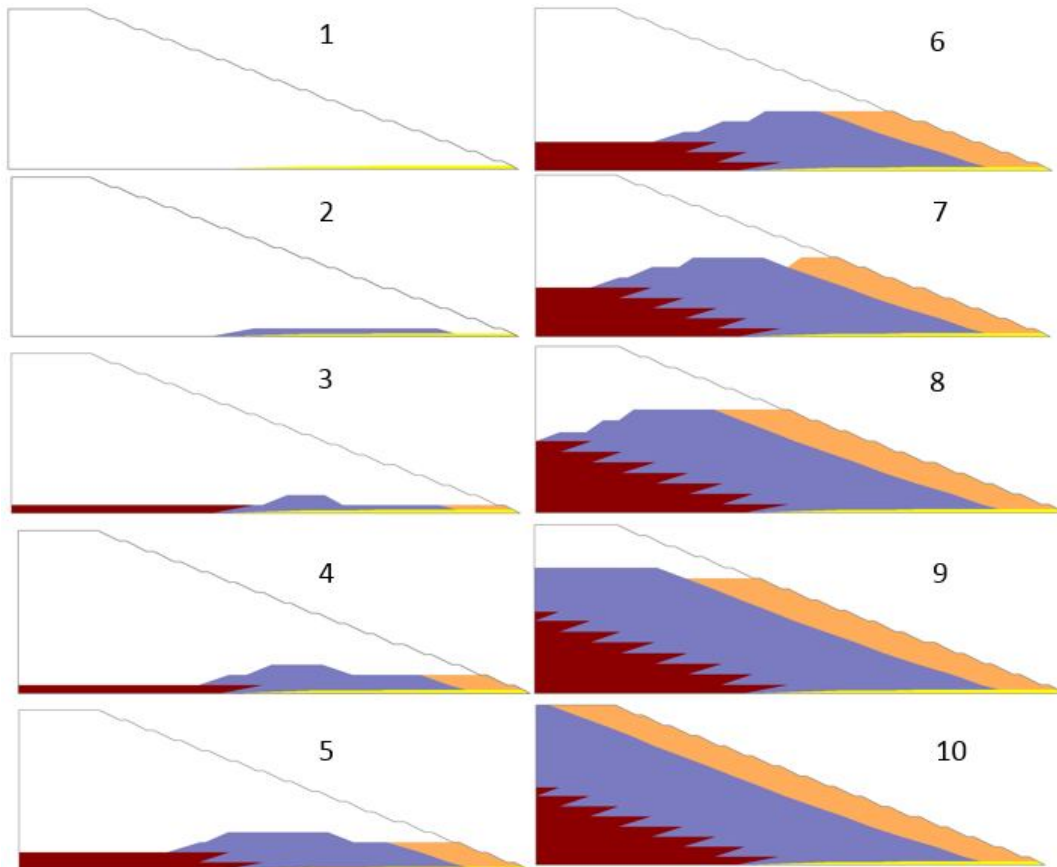


Figura 4.12 – Ilustra a sequência construtiva da pilha. Em amarelo a drenagem interna, em azul o rejeito arenoso filtrado, em vermelho a lama espessada e em alaranjado o material estéril.

4.1.6. CONTROLE DO FLUXO DE ÁGUAS PLUVIAIS

As bermas devem ser conformadas com materiais laterítico, com inclinação longitudinal variando entre 0,5% e 2,0%, e transversal de 3%, para conduzir de maneira adequada o fluxo de águas pluviais. Devem ter uma dimensão suficiente para possibilitar que sejam implantados os dispositivos de drenagem superficial, o acesso para manutenção e a leira de proteção da crista do talude, necessária para garantir que o fluxo de água seja contido na berma, impedindo que a água escoe na face dos taludes. A leira de proteção também

se faz necessário para a condição de segurança de pessoas e equipamentos que transitarão pelas bermas.

O sistema de drenagem superficial deve ser concebido com o objetivo de coletar as águas provenientes do escoamento superficial da pilha e entorno, e conduzi-las, de forma ordenada, até o curso de água ou talvegue mais próximo, evitando o desenvolvimento de processos erosivos na face dos taludes da pilha. São elementos desse sistema:

- Drenagem sobre as bermas da pilha, cuja função hidráulica será de conduzir os escoamentos superficiais até as descidas de água ou canais periféricos;
- Canais de drenagem para coletar o escoamento proveniente do platô da pilha, direcionando o fluxo para as descidas de água;
- Descidas de água, para coletar os escoamentos provenientes das bermas e do canal de drenagem, destinando-os aos canais periféricos;
- Canais Periféricos para coletar os escoamentos superficiais provenientes das bermas, das descidas de água, canal de drenagem e áreas adjacentes, descartando-os junto ao reservatório da barragem de contenção de sedimentos ou no talvegue a jusante da estrutura;
- Bacias de dissipação de energia para minimizar a velocidade da água proveniente dos canais periféricos e descidas, evitando que ocorram processos erosivos no terreno natural a jusante;
- Bueiros, implantados sob os acessos, para auxiliar na transposição do escoamento provenientes da drenagem superficial, com o intuito de evitar a interferência na operação e eventuais transtornos e comprometimento da integridade dos acessos.

Os estudos hidrológicos devem ser elaborados com o intuito de calcular as vazões de projeto utilizadas no dimensionamento do sistema de drenagem superficial da pilha, a metodologia para desenvolvimento dos estudos hidrológicos pode ser resumida na seguinte seqüência:

- Lançamento do eixo das estruturas hidráulicas;
- Delimitação das áreas de contribuição;

- Definição das características físicas e parâmetros das bacias de contribuição, tais como, características do terreno, declividades, período de retorno e coeficiente de escoamento superficial;
- Cálculo dos tempos de concentração para cada componente do sistema de drenagem;
- Cálculo das vazões de pico para cada área de contribuição.

Os estudos de vazões de projeto fazem-se necessários para a determinação das vazões afluentes a cada estrutura do sistema, considerando a ocorrência de eventos chuvosos com recorrência de 500 anos para descida, canais de drenagem e canais periféricos e, de 100 anos para as bermas da pilha, conforme preconiza a NBR 13029 (ABNT 2006).

A pilha com dispositivos de drenagem implantados somente na face dos taludes finalizados não garante que a operação de construção da pilha seja segura, pois grande dificuldade reside no controle da drenagem operacional, que na maioria das vezes é negligenciada nos projetos. Dessa forma, também pode ser considerada a previsão, na fase de projeto do empilhamento, de planos e medidas de controle para a drenagem operacional da pilha.

4.1.7. CONTROLE DE SEDIMENTOS

Nas áreas ocupadas por atividades de mineração, os valores de contribuição específicos de geração de sedimentos carregados pelo fluxo de águas pluviais variam entre 300 a 600 m³/ha/ano em empreendimentos dos Estados Unidos. No Brasil, tem sido prática a adoção do limite superior dessa faixa para cálculo da contribuição de sedimentos em áreas de mineração. (ANDRADE, 2013)

Para que estes sedimentos não comprometam os cursos de água a jusante da estrutura deve-se implantar um barramento para contenção dos sedimentos e clarificação da água. Este barramento deve ser desassoreado constantemente, preparando a barragem para o período chuvoso, recomenda-se manter disponível no mínimo 2/3 do volume do reservatório desassoreado.

Durante a fase de execução da Pilha os taludes operacionais estarão sem cobertura vegetal, favorecendo o carreamento de sedimentos, sendo assim, recomenda-se adotar medidas para controle do processo erosivo também para os taludes que ficarão expostos durante o período chuvoso. São comumente adotadas na mineração a aplicação de

polímeros impermeabilizantes ou a implantação de cobertura vegetal na face dos taludes.

4.1.8. CONTROLE DE POEIRA

As atividades de mineração produzem predominantemente poeira fugitiva. Uma lavra a céu aberto com produção anual de três milhões de toneladas por ano, produzirá cerca de 10 t de poeira por dia (CURI, 2002).

As áreas expostas são fontes sujeitas à ação do vento e sofrem erosão superficial emitindo poeira, mesmo que não apresentem movimentação de material ou tráfego de máquinas e veículos. O empilhamento de rejeitos ocorre a céu aberto, contempla uma grande quantidade de atividades e compreende o manuseio de grandes quantidades de materiais fragmentados. As emissões de poeira ocorrem principalmente na fase de operação da pilha, pois a grande maioria dos taludes e platôs estão desprotegidos e a movimentação de caminhões e equipamentos de carga e descarga sobre a pilha, ou ao seu redor também provoca emissão de poeira.

A quantidade de poeira emitida por uma pilha de materiais fragmentados varia em função da quantidade de material nela movimentado. São informações importantes para a caracterização das emissões em uma pilha:

- A área superficial da pilha;
- O ciclo de formação e recuperação da pilha;
- O teor de umidade do material superficial;
- O teor de finos do material superficial;
- A velocidade do vento incidente na pilha;
- A precipitação pluviométrica;
- A geometria da pilha e sua suscetibilidade à ação dos ventos.

Em geral, quando uma pilha está em formação ou quando está sendo recuperada, o seu potencial de emissão de poeira atinge o nível máximo, visto que materiais finos porventura existentes na superfície da pilha são facilmente arrastados e lançados na atmosfera pelas correntes de vento incidentes. À medida que os materiais mais finos vão sendo arrastados, permanecem sobre a superfície da pilha os materiais de maior granulometria, cujo arraste eólico é mais difícil. Se não ocorrerem novas perturbações na pilha, com o passar do tempo, a emissão de partículas é significativamente reduzida,

exceto se todo o material da pilha apresentar granulometria muito fina. (ANDRADE, 2013)

A fim de proporcionar um ambiente sadio aos operários e a população que vive no entorno das operações são projetadas e implantadas técnicas para o controle dos particulados, as principais medidas de controle são:

- Revegetar os taludes finais, esta atividade beneficia a redução da geração de poeiras, previne o aparecimento de erosões na face dos taludes, além de auxiliar no restabelecimento do ecossistema, porém, apesar de ser uma boa solução, o resultado é mais efetivo a partir de médio a longo prazo;
- Sistemas tradicionais de aspersão com o uso de água em vias de transporte e platôs expostos, representando uma solução com resultados imediatos;
- Aplicação de Polímeros específicos, utilizados na forma diluída provou ser bastante eficiente, atuando como agentes umectantes impermeabilizantes das faces expostas. Há polímeros que o efeito da aplicação perdura por mais de um ano;
- Recobrimento dos acessos e taludes com material argiloso reduz os índices de geração de poeira;
- *Wind fence*, a construção de uma barreira de vento posicionada de maneira estratégica também auxilia na redução da emissão de poeira.

4.1.9. INSPEÇÃO E MONITORAMENTO

A inspeção periódica na pilha deve ocorrer no mínimo com uma periodicidade mensal, atividade a ser realizada pela equipe de geotecnia de mina, que tem como objetivo avaliar as condições de segurança da pilha, nestas inspeções busca se avaliar os seguintes itens:

- As condições de estabilidade física dos taludes;

Neste item busca-se verificar se existem nos taludes da pilha trincas, erosões, abatimentos, recalques ou qualquer outra circunstância que possa instabilizá-los. O registro das inspeções pode ser feito mediante o preenchimento de uma ficha de inspeção, desenvolvida de maneira específica para cada pilha.

- Falhas na proteção dos taludes;

Busca-se verificar se existem taludes na pilha já rebatidos e sem a proteção adequada, identificado uma situação deste tipo providencia-se a imediata recomposição vegetal.

- Condições de drenagem da pilha;

Neste item busca-se avaliar as condições de drenagem da pilha, avaliando os dispositivos de drenagem operacional e definitivo, certificando-se que a pilha esteja devidamente drenada e segura.

- Monitoramento da instrumentação geotécnica.

A oscilação da linha freática está relacionada ao volume de águas pluviais e a operação adequada dos dispositivos de drenagem interna. A instalação de um medidor de vazão na saída da drenagem interna possibilita monitorar a operação dos drenos, a oscilação da linha freática no interior do maciço é verificada pela utilização de instrumentos de auscultação e a pluviometria é verificada por um pluviômetro. O monitoramento dos taludes pode ser aperfeiçoado com a implantação de marcos topográficos e inclinômetros nas bermas da pilha, para monitoramento de descolamentos superficiais e internos.

Os marcos superficiais serão confeccionados em concreto, com um pino metálico onde será rosqueado o elemento para leitura (prisma). Estes prismas serão controlados com levantamento topográfico de precisão (preferencialmente estação total), a partir de uma rede primária e secundária de referência. Esta rede é composta por cerca de 3 a 5 marcos, instalados em pontos reconhecidamente estáveis. Com os marcos da rede de referência primária confere-se a posição da secundária e, destas, controlam-se os marcos (terciários) da Mina. Os marcos distribuídos em seções, buscando-se controlar todos os lados da pilha, devem ser lançados, sempre que possível, nas seções das investigações visando facilitar o entendimento e interpretação das leituras. Estes marcos serão lidos com frequência mensal e as leituras serão plotadas em gráfico deslocamento vertical x tempo e em planta, mostrando a resultante horizontal.

Os piezômetros mais utilizados são do tipo Casagrande, devem ser instalados para verificação das pressões neutras no aterro e no terreno de fundação. Os níveis d'água nos piezômetros serão lidos com frequência mensal ou conforme priorização do geotécnico responsável, e as leituras serão plotadas em gráficos cota do nível de água x tempo, associados à pluviometria diária na área. Os indicadores de nível de água têm

por finalidade monitorar a cota do nível da água no interior do aterro. Os resultados do monitoramento dos instrumentos e das inspeções devem ser avaliados pela equipe de geotecnia e devem ser armazenados em um sistema de gestão adequado de monitoramento geotécnico.

Caso constatado alguma anormalidade geotécnica, ações mitigadoras deverão ser planejadas e implementadas para que a equipe de operação da pilha possa reestabelecer as condições seguras de operação e estabilidade da pilha.

CAPÍTULO 5 – GEOMETRIAS A SEREM ANALISADAS

A modelagem de uma estrutura para verificação da análise de estabilidade precisa inicialmente seguir alguns requisitos. (MENDES, 2008)

- Conhecer o tipo de estrutura;
- Estabelecer quais as condições que levam a estrutura a uma falha;
- Formular o problema;
- Estabelecer os parâmetros de resistência dos materiais;
- Estabelecer as condições de fluxo ou pressões neutras e;
- Escolher o método para análise.

5.1. CRITÉRIOS PARA MODELAR A GEOMETRIA

A figura 5.1 ilustra as componentes que compõem a geometria típica de uma pilha, na figura pode-se observar a altura dos bancos (A), o ângulo de face dos taludes (i), a largura da berma (B) e o ângulo geral da pilha, que é determinado pela combinação das três primeiras variáveis e que tem relação direta com o volume e o fator de segurança da geometria.

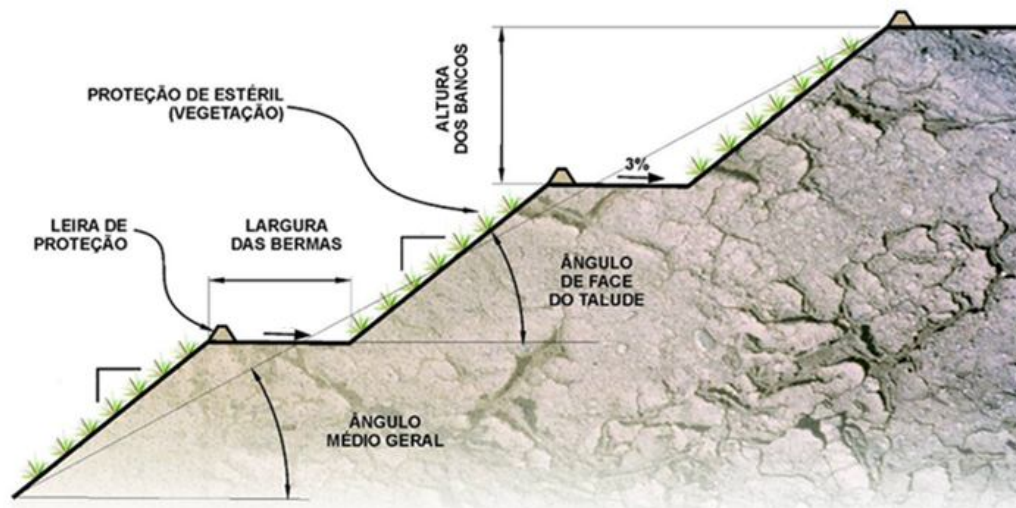


Figura 5.1 - Geometria típica de um empilhamento. (Dados de relatório de projeto, VALE S.A)

A base do arranjo geométrico, que representa a base da pilha é igual a 2.363.803,19m², e está exibido na figura 5.2 e será o objeto de estudo para determinação da geometria

otimizada. Neste arranjo extraiu-se a seção principal, denominada aqui como Seção P com aproximadamente 160 m de altura, exibida na figura 5.3. Utilizando esta seção serão realizadas as variações de altura dos bancos, inclinação de face dos taludes e espaçamento entre eles.

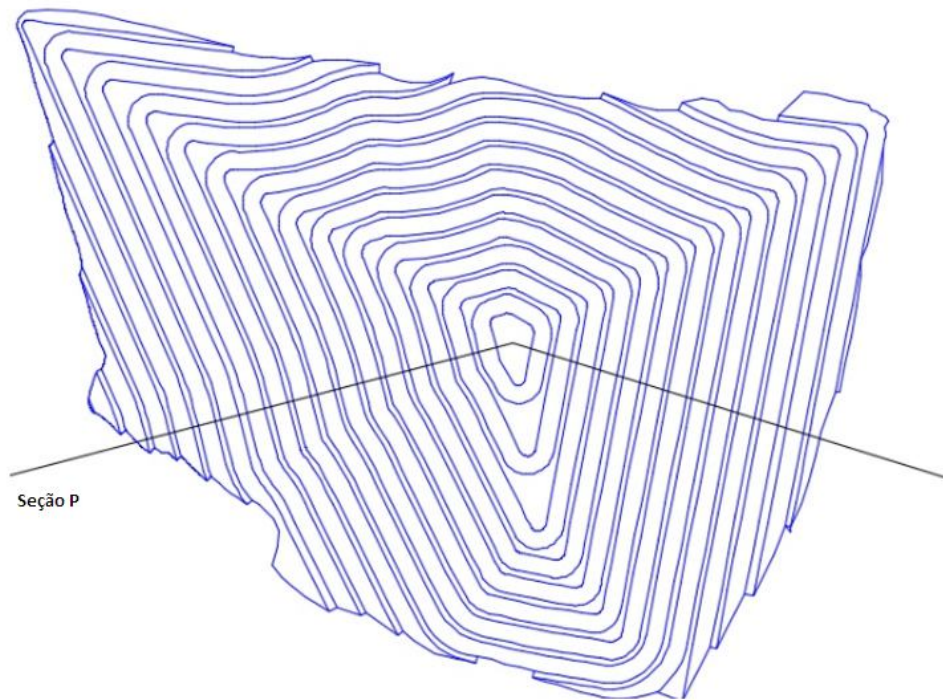


Figura 5.2 – Arranjo da Pilha com o traçado da seção principal

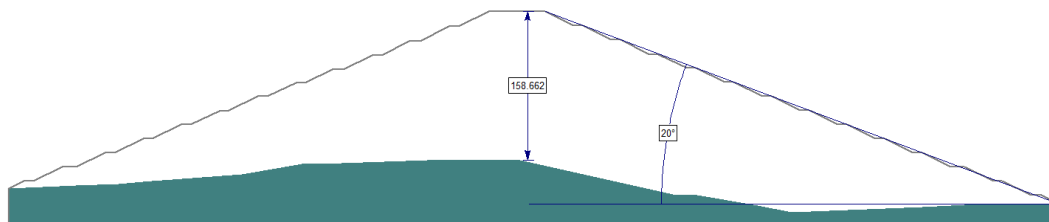


Figura 5.3 – Seção P.

Busca-se com estas variações determinar uma geometria que apresente elevada capacidade volumétrica, que seja segura e que tenha dimensões compatíveis com os equipamentos voltados para a implantação e manutenção dos taludes da pilha. A Tabela 5.1 exibe as variações propostas.

Tabela 5.1 – Seções a serem analisadas

| VARIAÇÕES PROPOSTAS | | | |
|---------------------|-------------------|------------------|------------------------------|
| Seção P | Altura dos bancos | Largura da berma | Inclinação da face do talude |
| 1 | 25 m | 10 m | 21.8° (2,5h: 1v) |
| 2 | 20 m | 10 m | 26.6° (2h: 1v) |
| 3 | 20 m | 7 m | 21.8° (2,5h: 1v) |
| 4 | 15 m | 7 m | 26.6° (2h: 1v) |
| 5 | 15 m | 10 m | 26.6° (2h: 1v) |
| 6 | 10 m | 7 m | 26.6° (2h: 1v) |
| 7 | 10 m | 5 m | 26.6° (2h: 1v) |
| 8 | 10 m | 10 m | 26.6° (2h: 1v) |

As alternativas propostas consideram as seguintes variações:

Geometria

- Altura do banco: 10, 15, 20 e 25 m;
- Inclinação da face do talude: 21,8° (2,5h: 1v) e 26,6° (2h:1v);
- Largura da berma entre os bancos: 5, 7 e 10 m.

Materiais

- Rejeito arenoso filtrado;
- Lama espessada;
- Estéril.

Falha da estrutura

- Ruptura dos taludes;

A análise de estabilidade de taludes é um assunto amplo e complexo, visto que envolve grandes massas de materiais que podem apresentar uma grande heterogeneidade e estarem condicionadas a diferentes estados de tensões que influenciam e condicionam o seu comportamento. Compreende por talude quaisquer superfícies inclinadas que limitam um maciço de solo, de rochas ou ambos. Podem ser naturais, como as encostas, ou artificiais, como os taludes de aterros.

Um talude transforma-se, em termos estruturais, num mecanismo quando, sob determinadas condições, uma massa de solo/rocha se desliga da restante e ao perder a sua capacidade de equilíbrio entra em movimento. Existem vários tipos de movimentos que dependem das características do próprio talude, porém, neste trabalho apenas se tem em conta os relacionados com deslizamentos, envolvendo deslocamentos rápidos para baixo e para o lado, ao longo de uma superfície de deslizamento/ruptura. Este deslizamento poderá ser acompanhado por uma rotação, no caso de solos coesivos homogêneos, ou por uma translação, no caso de maciços em solos estratificados, e ocorrerá ao longo de superfícies de deslizamento.

- Pressões neutras;

A resistência ao cisalhamento dos materiais arenosos é definida em termos de tensão efetiva. (PINTO, 2006).

- Condições de fluxo;

Fluxo livre, considera-se que os dispositivos de drenagem interna operando de maneira adequada e, fluxo prejudicado, considera-se que a condição de drenagem da pilha foi prejudicada, acarretando assim, elevação da linha freática no interior do maciço.

Uma variação brusca da linha freática no interior dos taludes da pilha poderá ocorrer se houver uma condição de chuva intensa associado a uma falha no sistema de drenagem interna. Para as análises aqui realizadas a evolução da linha freática no interior do aterro será hipotética.

5.2. CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DAS GEOMETRIAS PROPOSTAS

O rejeito arenoso filtrado será lançado na pilha em sua forma mais solta, sofrendo a compactação imediata promovida pela circulação de equipamentos de transporte e de espalhamento, atingindo uma densidade aparente natural *in situ* superior a 2,0 t/m³, conforme dados preliminares do estudo de desaguamento de rejeitos em operação na Mina do Pico. Com o tempo a consolidação crescente promovida pelos incrementos de alturas de camadas de aterro sobrepostas contribuem para a compactação do material, atingindo o estado consolidado do material.

O “estado consolidado” é aquele em que há o incremento dos parâmetros de resistência ao longo do tempo, devido à consolidação dos materiais e o incremento das cargas de

peso próprio. Foram realizadas análises de estabilidade em termos de tensões efetivas, tendo como referência a seção de maior altura, assente sobre fundação de solo residual e aluvião.

Os parâmetros geotécnicos, a serem utilizados para desenvolvimento da geometria otimizada, exibidos na Tabela 5.2, foram determinados em função de ensaios de laboratório realizados nos rejeitos, ensaios de campo realizado nos aterros experimentais, na barragem que contém estes rejeitos dispostos e em função da experiência dos profissionais envolvidos. Entretanto o número de ensaios não é suficiente para se admitir com exatidão o comportamento dos rejeitos, dessa forma, adotou-se parâmetros geotécnicos efetivos subestimados.

Tabela 5.2 – Parâmetros geotécnicos dos materiais a serem empilhados.

| PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ADOTADOS | | | | |
|--|---|---|----------------------------------|------------------------------|
| Material | Peso Específico γ_n (KN/m³) | Peso Específico γ_{sat} (KN/m³) | Parâmetros de Resistência | |
| | | | c' (kN/m²) | ϕ (°) |
| Rejeito arenoso | 20 | 22 | 0 | 33 |
| Lama espessada | 18 | 20 | 0 | 0 |
| Estéril | 20 | 22 | 25 | 32 |
| Fundação | 20 | 22 | 50 | 35 |

Os métodos utilizados para determinação do fator de segurança (FS) de uma pilha são os métodos de: Fellenius; Bishop; Jambu (simplificado); Jambu; Spencer e; Morgenstern-Price. A maioria dos métodos de análise de estabilidade dos taludes tem por base a Teoria de Equilíbrio Limite e o Método de Elementos Finitos. (FERREIRA, 2012)

As análises de estabilidade do talude da pilha foram efetuadas para as seções, utilizando os métodos de Bishop simplificado, com emprego do programa de computador SLIDE 5.0. Conforme NBR029 (ABNT 2006), adotou-se como critério geral para avaliação dos

limites aceitáveis para os fatores de segurança, as condições explicitadas abaixo para os regimes de solicitações:

- Ruptura do talude geral de altura máxima para os materiais consolidados e drenagem interna em pleno funcionamento, parâmetros de resistência relativos a pressões efetivas. $FS > 1.5$;
- Ruptura do talude geral de altura máxima para os materiais consolidados e drenagem interna colapsada, parâmetros de resistência relativos a pressões totais ou efetivas. $FS > 1.3$.

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE DAS GEOMETRIAS PROJETADAS

Observou-se que as seções se apresentaram seguras para o empilhamento dos rejeitos arenosos filtrados, tabela 6.1. O volume médio dos arranjos propostos é da ordem de 140 Mm³, com um número médio de 14 bancos por seção. O comparativo do número de bancos está associado aos custos inerentes para acabamento dos taludes, a implantação dos dispositivos de drenagem superficial e a manutenção destes.

Tabela 6.1 – Quadro resumo das análises realizadas nas seções apresentadas.

| Geometrias analisadas | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------|---------------------------------|--------------------------------------|------|
| Seção (P) | Altura dos Taludes (m) | Largura da berma (m) | Inclinação da face do talude | Inclinação da face da pilha | Nº de Bancos | Área da seção (m ²) | Volume do Arranjo (Mm ³) | FS |
| 1 | 25 | 10 | 21.8° (2.5H:1V) | 19° | 8 | 97.485,13 | 130,1 | 1.89 |
| 2 | 20 | 10 | 26.6° (2H:1V) | 22° | 11 | 113.663,91 | 151,7 | 1.69 |
| 3 | 20 | 7 | 21.8° (2.5H:1V) | 19° | 10 | 98.525,72 | 131,5 | 1.86 |
| 4 | 15 | 7 | 26.6° (2H:1V) | 22° | 15 | 116.330,86 | 155,3 | 1.61 |
| 5 | 15 | 10 | 26.6° (2H:1V) | 22° | 14 | 107.354,66 | 143,3 | 1.74 |
| 6 | 10 | 7 | 26.6° (2H:1V) | 21° | 18 | 85.235,62 | 113,8 | 2.42 |
| 7 | 10 | 5 | 26.6° (2H:1V) | 22° | 23 | 114.539,30 | 152,9 | 1.66 |
| 8 | 10 | 10 | 26.6° (2H:1V) | 19° | 19 | 97.535,53 | 130,20 | 1,96 |

A figura 6.1 ilustra todas as seções projetadas, geradas pelas combinações entre o ângulo de face dos taludes, largura das bermas e altura dos bancos.

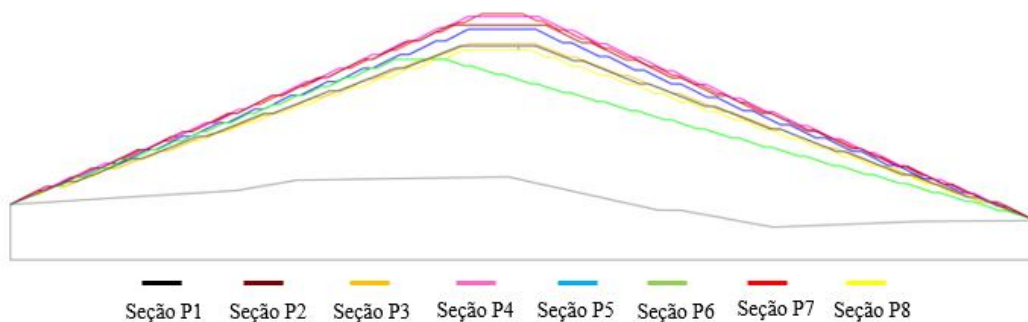


Figura 6.1 – Comparativo visual das seções projetadas.

6.1. SEÇÃO P1

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 25 m;
- Largura das bermas = 10 m;
- Inclinação da face do talude = 21.8° (2,5H:1V);
- Ângulo geral da face = 19°
- Nº de bancos = 8;
- Volume do arranjo geométrico = 130,1 Mm³;

Análise das características:

- Apresenta apenas 8 bancos, o que é bom pelo aspecto de custo com instalação e manutenção dos taludes e dos dispositivos de drenagem superficial;
- A berma de 10m apresenta condições mais espaço, facilitando a implantação dos dispositivos de drenagem a leira de proteção e o acesso de manutenção.
- Apresenta um arranjo geométrico “ousado” com taludes de 25 m, o que faz com que este talude possa requerer medidas para controle do processo de erosão na face dos taludes;
- Apresentou volume abaixo da média dos arranjos projetados.

O fator de segurança verificado na análise de estabilidade na condição de fluxo livre, está apresentado na figura 6.2, que exhibe o preenchimento da Seção P1 com a disposição de rejeito arenoso filtrado, ilustrado na cor azul e a disposição de estéril, na cor alaranjado, associado à disposição do rejeito arenoso filtrado para controle do processo erosivo na face do talude. A proporção entre os materiais deve levar em consideração cálculos de balanço de massa, correlacionando a taxa de geração de rejeito arenoso filtrado com a movimentação de material estéril diária, de modo a desenvolver um planejamento de evolução contínuo da pilha.

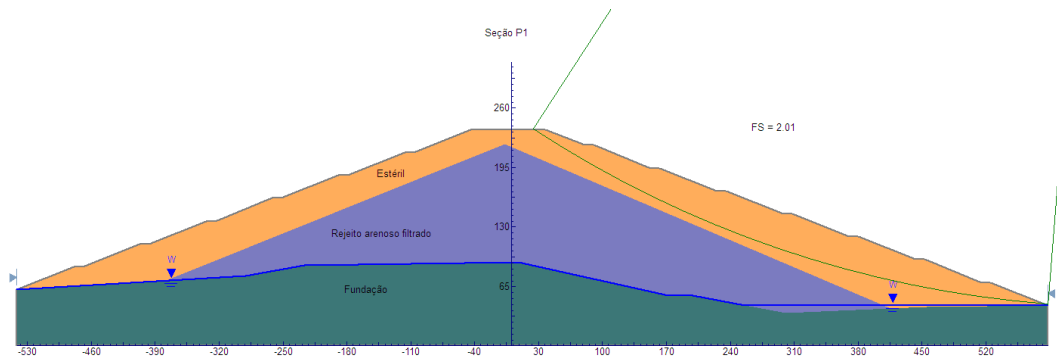


Figura 6.2 – Apresenta o FS=2.01 para o empilhamento proposto com a seção P1.

Disposição conjunta entre estéril e rejeito arenoso filtrado

A geometria P1 foi descartada, se a disposição de estéril for associada para proteção da face dos taludes formados com o rejeito arenoso a seção a ser adotada poderia ser otimizada, adotando-se por exemplo a seção P2, que apresenta maior capacidade volumétrica e é segura.

6.2. SEÇÃO P2

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 20 m;
- Largura das bermas = 10 m;
- Inclinação da face do talude = 26.6° (2H:1V);
- Ângulo geral da face = 22°
- Nº de bancos = 11;
- Volume do arranjo geométrico = 151,7 Mm³;
- FS=1.69 - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.3;
- FS=1.53 - Linha freática hipotética, vide figura 6.4.

Análise das características:

- Apresenta elevada capacidade volumétrica;
- Largura da berma ideal;
- Nº de bancos abaixo da média;
- Altura moderada, podendo requerer medidas de controle contra o processo erosivo na face dos taludes.

Esta geometria poderia ser utilizada para o empilhamento de rejeitos arenosos filtrados confinado pelo material estéril.

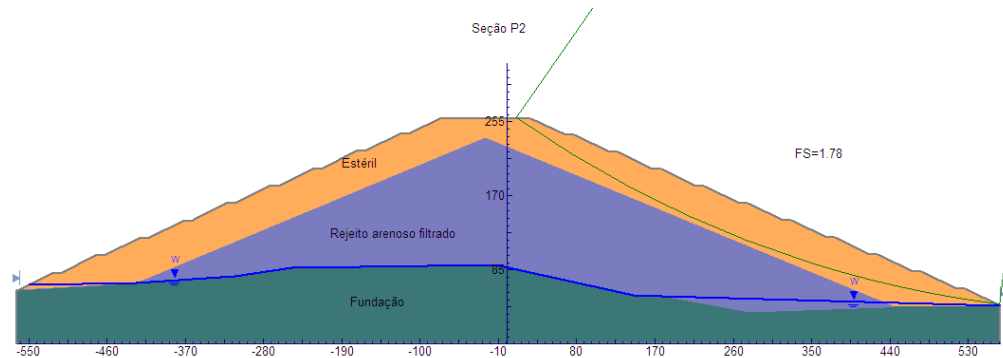


Figura 6.3 – Seção P2, FS=1.78, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado.

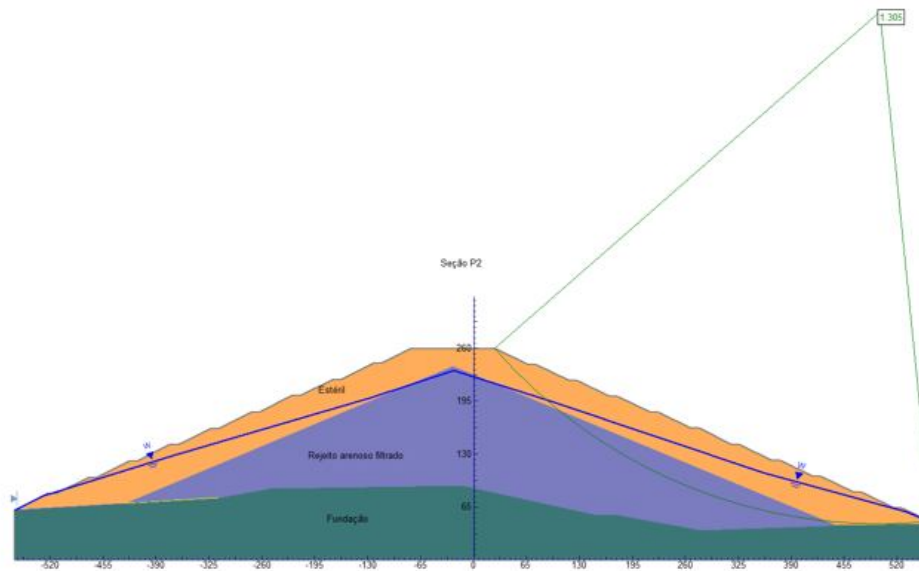


Figura 6.4 – Seção P2, FS=1.53 resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática.

6.3. SEÇÃO P3

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 20 m;
- Largura das bermas = 7 m;

- Inclinação da face do talude = 21.8° (2,5H:1V);
- Ângulo geral da face = 19°
- Nº de bancos = 10;
- Volume do arranjo geométrico = $131,5 \text{ Mm}^3$;
- FS=1.86 - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.5;

Análise das características:

- Apresenta capacidade volumétrica abaixo da média;
- A berma de 7 m ainda possibilita implantar os dispositivos de drenagem superficial, a leira de proteção e o acesso, contudo estes dispositivos ficam limitados.

Esta geometria poderia ser utilizada para o empilhamento de rejeitos arenosos filtrados confinados pelo material estéril, mas a seção P2 se apresenta mais adequada, sendo a seção P3 descartada.

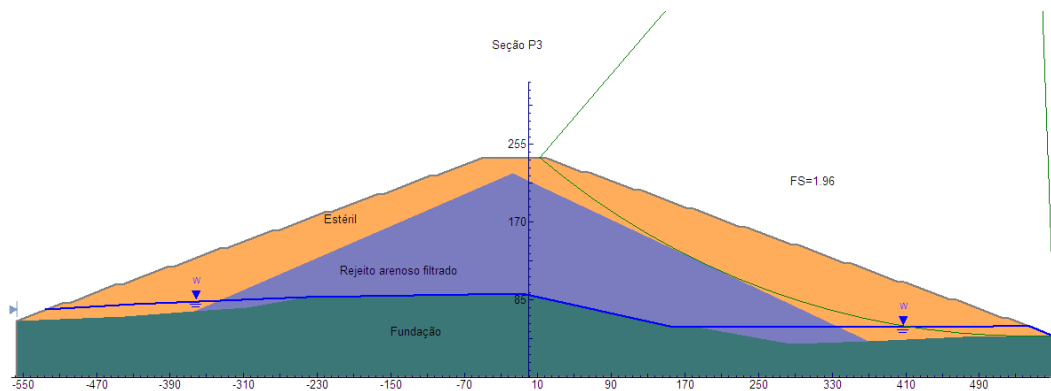


Figura 6.5 – Seção P3, FS=1.86, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado.

6.4. SEÇÃO P4

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 15 m;
- Largura das bermas = 7 m;
- Inclinação da face do talude = 26.6° (2H:1V);

- Ângulo geral da face = 22°
- Nº de bancos = 15;
- Volume do arranjo geométrico = $155,3\text{Mm}^3$;
- FS=1.61 - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.6;
- FS=1.51 - Linha freática hipotética, vide figura 6.7.

Análise das características:

- Apresenta elevada capacidade volumétrica;
- Nº de taludes acima da média;
- Apresentou o menor FS de todas as seções;

A berma de 7 m ainda possibilita implantar os dispositivos de drenagem superficial, a leira de proteção e o acesso, contudo estes dispositivos ficam limitados. Dessa maneira optou-se pela escolha da seção P5, que apresenta capacidade volumétrica considerável é segura e bermas de 10 m, que são mais adequadas para operação e manutenção da pilha.

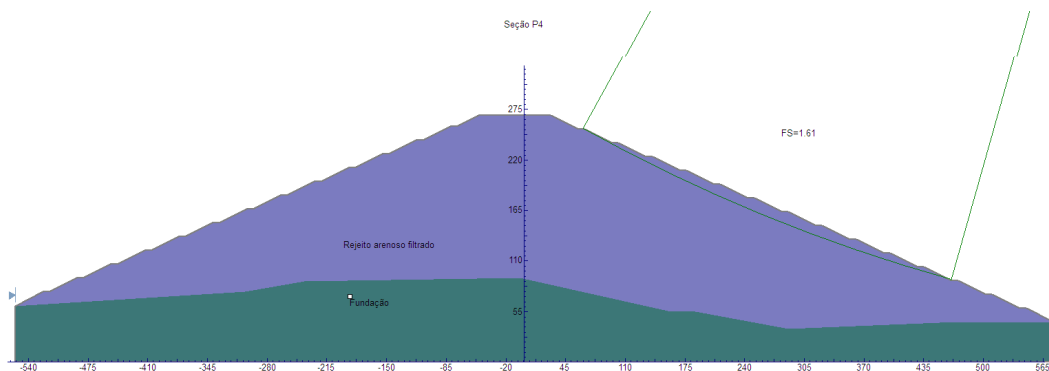


Figura 6.6 – Seção P4, FS=1.61, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado.

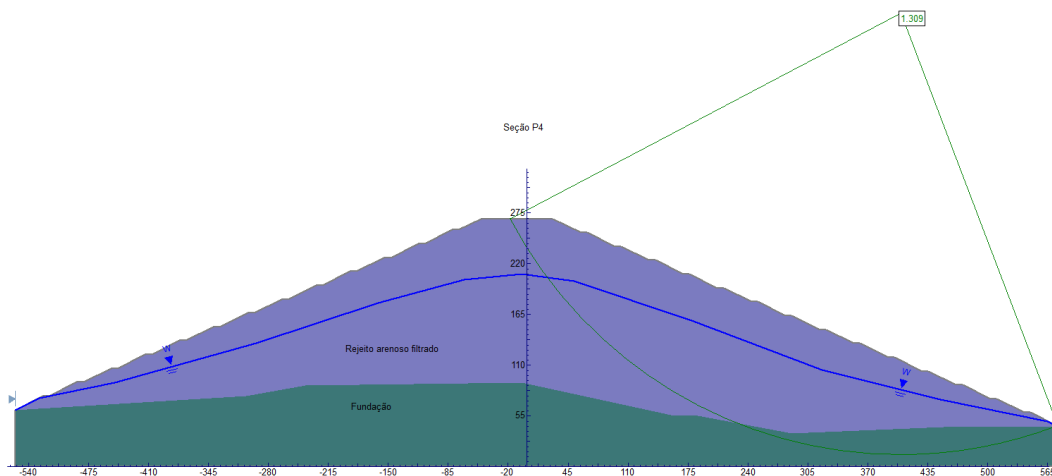


Figura 6.7 – Seção P4, FS=1.31, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática.

6.5. SEÇÃO P5

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 15 m;
- Largura das bermas = 10 m;
- Inclinação da face do talude = 26.6° (2H:1V);
- Ângulo geral da face = 22°
- Nº de bancos = 14;
- Volume do arranjo geométrico = 143,3 Mm³;
- FS=1.74 - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.8;
- FS=1.51 - Linha freática hipotética, vide figura 6.9.

Análise das características:

- Apresenta elevada capacidade volumétrica;
- Nº de taludes na média;
- A berma de 10m.

A seção P5 foi a seção melhor dimensionada associando segurança com uma elevada capacidade volumétrica.

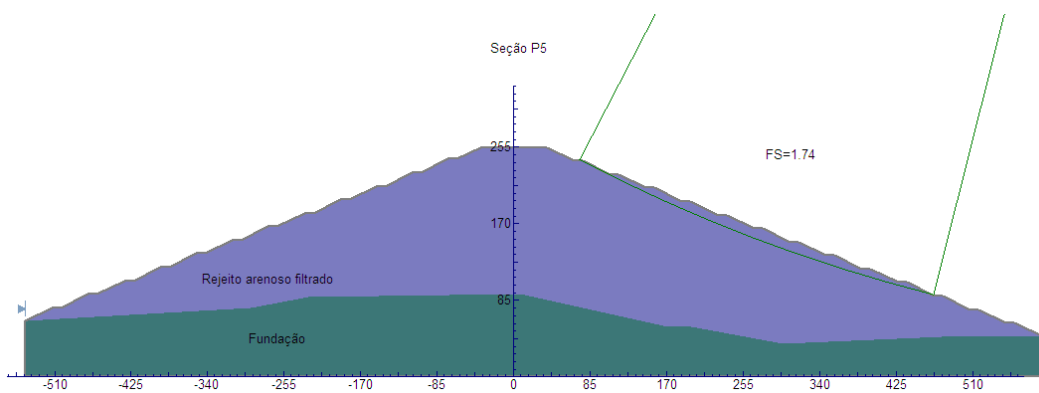


Figura 6.8 – Seção P5, FS=1.74, formação da pilha com o rejeito arenoso filtrado.

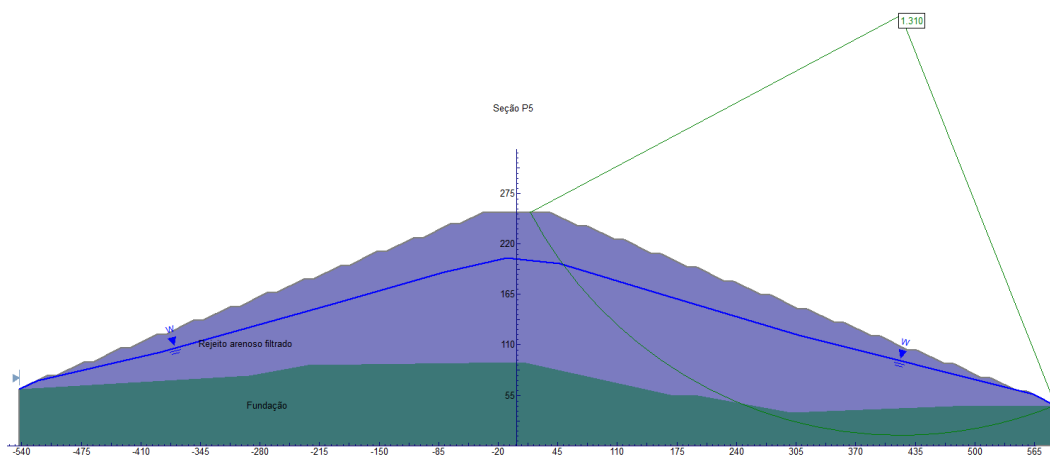


Figura 6.9 – Seção P5, FS=1.31, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática.

Para a seção P5 analisou-se a formação da pilha sendo formada com o rejeito arenoso e, uma outra formação, considerando a disposição da lama espessada, confinada pelo rejeito arenoso, confinado pelo material estéril. O fator de segurança resultante das análises de estabilidade está exibido na figura 6.10 (condição de fluxo livre) e na figura 6.11 (condição de fluxo prejudicado).

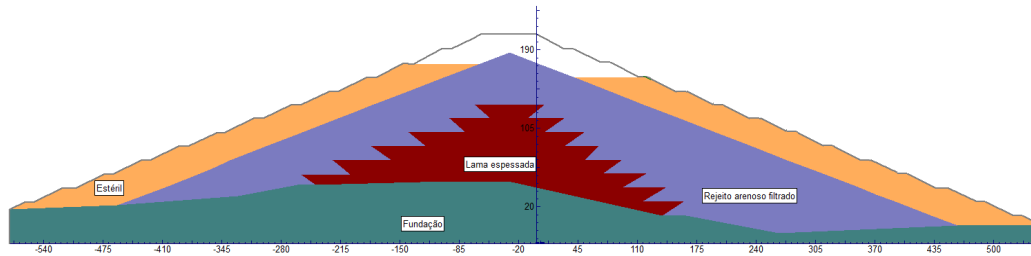


Figura 6.10 – Formação da pilha utilizando a lama espessada, o rejeito arenoso filtrado e o material estéril.

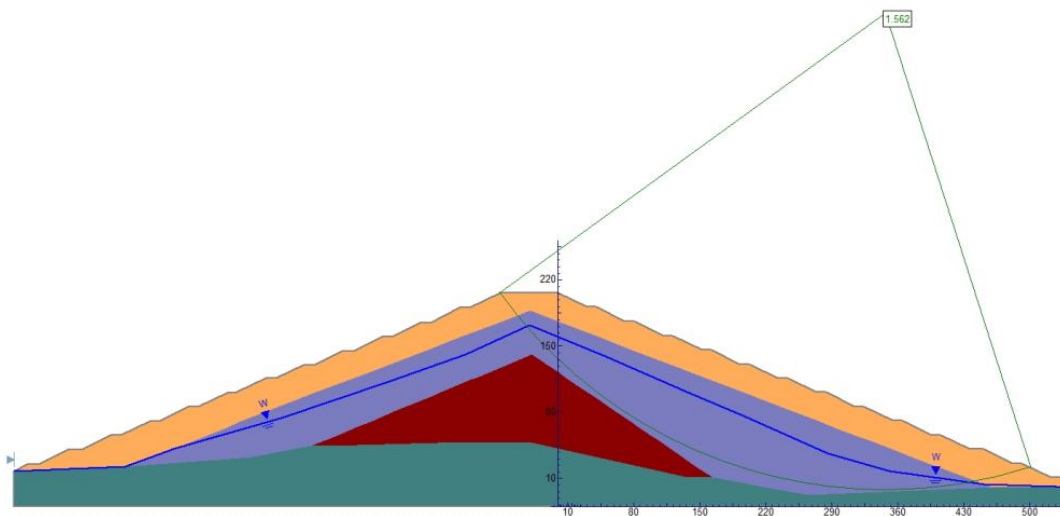


Figura 6.11 – FS=1.56 - Análise de estabilidade com a elevação hipotética da linha freática para a formação da pilha com o rejeito fino espessado, rejeito arenoso filtrado e com a utilização do material estéril;

Na condição drenada com os taludes secos da geometria se apresentaram estáveis, na condição de elevação da linha freática observa-se uma redução do FS, a partir de um determinado ponto a elevação da linha freática no interior da pilha colocou o FS abaixo de 1.3, dessa forma, deve se dimensionar um sistema de drenagem interna que garanta o escoamento adequado do fluxo de água, de modo que a linha freática seja controlada.

Os instrumentos de auscultação devem ser instalados nos locais onde a elevação do nível de água no interior do maciço represente interferência com a estabilidade dos taludes da pilha, os instrumentos voltados para o monitoramento de movimentação dos taludes devem ser alocados em função da experiência dos profissionais envolvidos,

recomenda-se as seções de maior altura. A figura 6.12 exibe os pontos onde os instrumentos deverão ser implantados na seção P5.

- 9 Indicadores de nível de água (INA);
- 5 Piezômetros (PZ);
- 1 medidor de vazão para cada dreno interno (MV);
- 6 marcos topográficos de superfície (MS);
- 6 Inclinômetros;
- 1 pluviômetro, a ser instalado próximo a pilha.

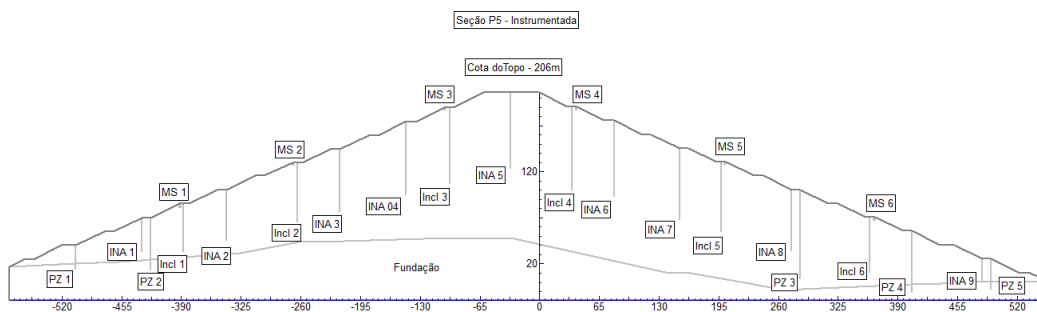


Figura 6.12 – Seção P5 instrumentada

A operação com a lama espessada requer disciplina e capacidade técnica por parte da equipe que construirá a pilha, que deve cumprir rigorosamente todos os itens devidamente previstos em projetos, para que a pilha seja segura. Nas análises de estabilidade realizadas na seção P5, assumiu-se que a lama espessada não apresenta coesão nem ângulo de atrito, buscando representar o pior cenário, considerando apenas a densidade do material *in situ*, verificada no aterro experimental feito com a lama espessada, que apresentou uma média superior a $1,8 \text{ g/cm}^3$.

A porcentagem definida por material para a ocupação na pilha pode ser variada, condicionada pela geração dos rejeitos finos, que é a menor proporção entre os materiais. A proporção de material estéril é limitada a um volume mínimo para garantir a viabilidade da operação e limitado a um volume máximo para completar a geometria da pilha, este volume varia em função das proporções dos rejeitos finos e arenosos.

Dos rejeitos gerados na ITM-I, o arenoso representa 70% do rejeito total. Dessa forma, para o volume total do arranjo, poderia ser definido a seguinte ocupação da pilha,

considerando uma geração de rejeito e uma movimentação de material estéril hipotética, descritas abaixo:

- Capacidade volumétrica da pilha - 143,3 Mm³;
- Massa estimada de rejeito gerado para este cenário – 10 Mt/ano;
- Massa planejada de movimentação de estéril para a pilha - 8 Mt/ano
- Massa específica natural da lama espessada disposta na pilha – 1.8 t/m³;
- Massa específica natural do rejeito arenoso disposto na pilha – 2 t/m³;
- Massa específica natural do estéril disposto na pilha – 2 t/m³;
- Volume previsto ocupado pela lama espessada – 1,66 Mm³/ano;
- Volume previsto ocupado pelo rejeito arenoso filtrado – 3,5 Mm³/ano;
- Volume previsto ocupado pelo material estéril – 4 Mm³/ano;
- Proporção em volume: estéril representa 43,67%, rejeito arenoso filtrados 38,2% e a lama 18,12% do volume total da pilha;
- Massa total depositada de 280 Mt, sendo: estéril 124,8 Mt, rejeito arenoso filtrado 109,2 Mt e lama espessada 46,8 Mt.
- Vida útil de operação da pilha – 15,6 anos.

6.6. SEÇÃO P6

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 10 m;
- Largura das bermas = 7 m;
- Inclinação da face do talude = 26.6° (2H:1V);
- Ângulo geral da face = 21°
- N° de bancos = 18;
- Volume do arranjo geométrico = 113,8 Mm³;
- FS=2.42. - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.13;

Análise das características:

- Apresentou o maior FS de todas as seções;
- Apresenta baixa capacidade volumétrica, o menor volume de todas as seções, por este motivo foi descartada;
- N° de taludes elevado;

- A berma de 7 m ainda possibilita implantar os dispositivos de drenagem superficial, a leira de proteção e o acesso, contudo estes dispositivos ficam limitados.

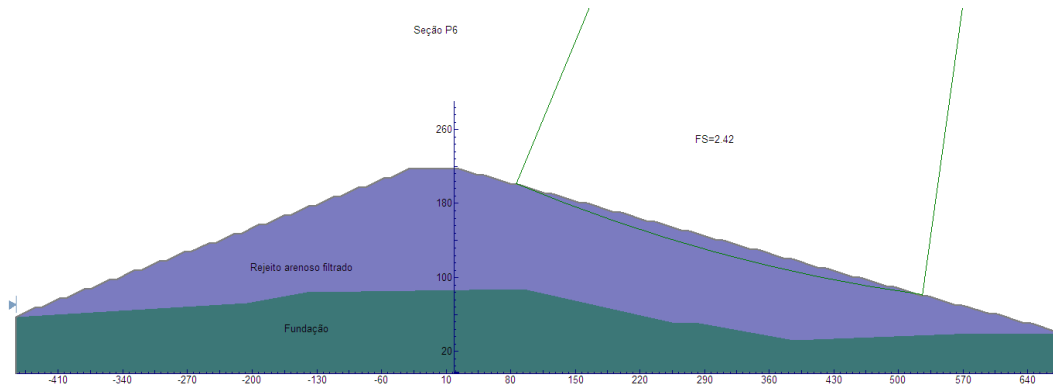


Figura 6.13 – Seção P6, FS=2.42, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado.

6.7. SEÇÃO P7

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 10 m;
- Largura das bermas = 5 m;
- Inclinação da face do talude = 26.6° (2H:1V);
- Ângulo geral da face = 22°
- Nº de bancos = 23;
- Volume do arranjo geométrico = 152,9 Mm³;
- FS=1.66. - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.14;
- FS=1.52 - Linha freática hipotética, vide figura 6.15.

Análise das características:

- Apresenta elevada capacidade volumétrica;
- Nº elevado de taludes, o maior de todas as seções, por este motivo esta geometria foi descartada;
- A berma de 5 m gera limitações para os acessos de manutenção e também pode gerar algumas limitações para dimensionamento dos dispositivos de drenagem superficial e implantar a leira de proteção.

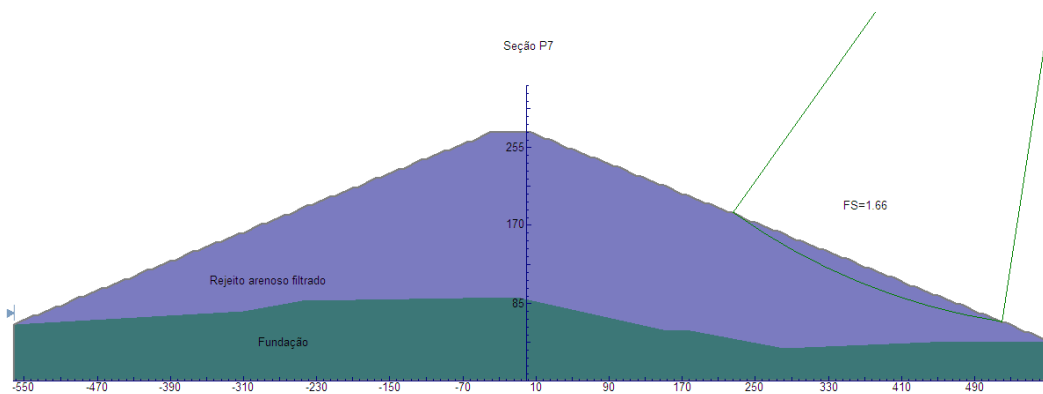


Figura 6.14 – Seção P7, FS=1.66, resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado.

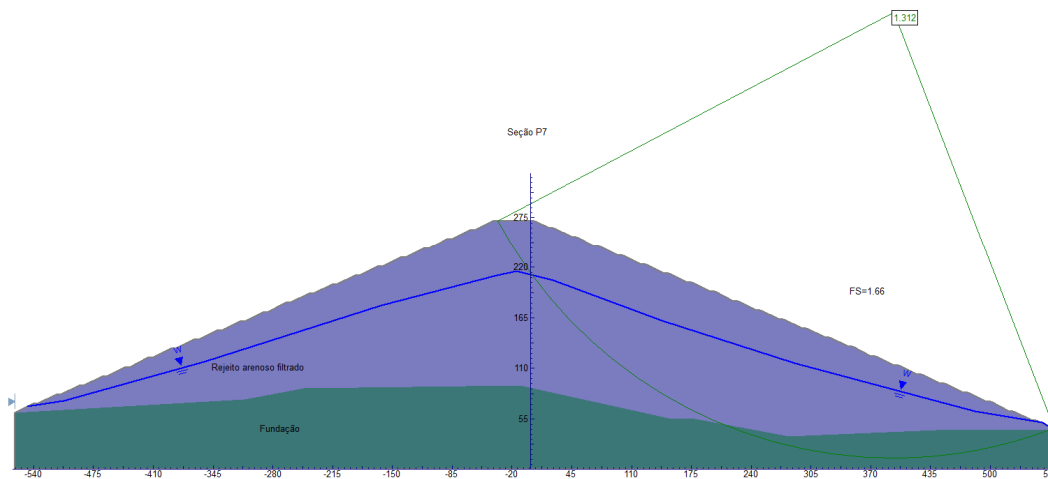


Figura 6.15 – Seção P7 – FS=1.32 - Resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática.

6.8. SEÇÃO P8

Características da geometria:

- Altura dos bancos = 10 m;
- Largura das bermas = 10 m;
- Inclinação da face do talude = 26.6° (2H:1V);
- Ângulo geral da face = 19°
- Nº de bancos = 19;
- Volume do arranjo geométrico = 130,1 Mm³;

- FS=1.958 - Condição drenada dos taludes, vide figura 6.16;
- FS=1.32 - Linha freática hipotética, vide figura 6.17.

Análise das características:

- Apresenta capacidade volumétrica próximo da média das seções;
- Nº elevado de taludes;
- A berma de 10 m é ideal para implantar os dispositivos de drenagem, a leira de proteção e o acesso para manutenção.

A seção P8 apresentou-se segura para empilhamento do rejeito arenoso filtrado, tem uma boa capacidade volumétrica e uma largura de berma ideal. Entretanto a geometria da Seção P5 por apresentar capacidade volumétrica maior (+13 Mm³) e número de taludes inferior, foi a geometria adotada, descartando assim a seção P8.

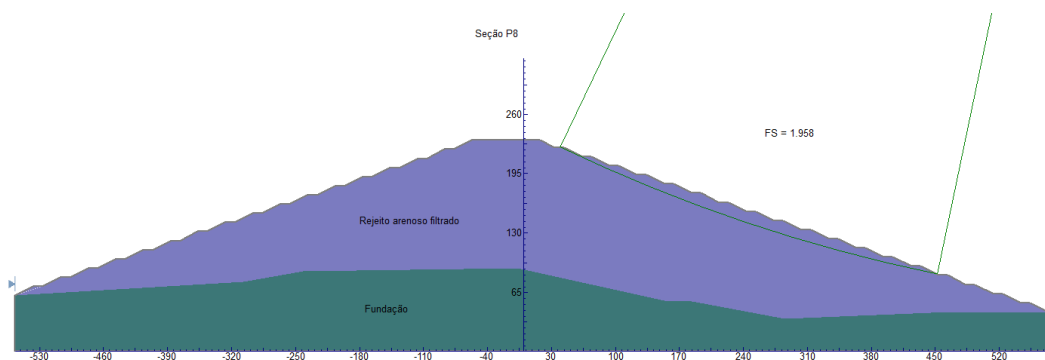


Figura 6.16 – Seção P8, FS=1.958. Resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo livre, apresentando o aterro drenado.

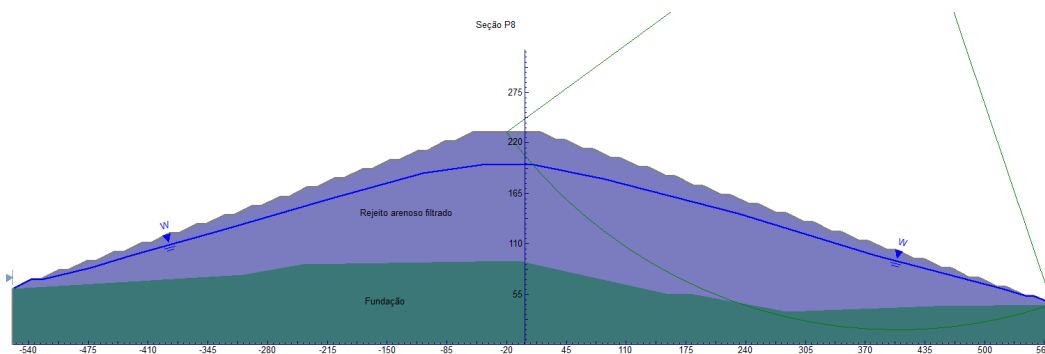


Figura 6.17 – Seção P8 – FS=1.32 - Resultado da análise de estabilidade na condição de fluxo prejudicado, apresentando uma oscilação hipotética da linha freática.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES

Realizando uma análise global do empilhamento dos rejeitos desaguados de minério de ferro, pode-se concluir que a parcela de rejeito arenoso, filtrado, estando próxima da umidade ótima de compactação, pode ser empilhada de maneira segura e direta. Sendo, portanto, uma alternativa em potencial para a redução de novas barragens para contenção de rejeitos. A lama espessada e ou filtrada também é um material que apresentam potencial para ser empilhado, porém pode requerer ações adicionais para garantir a segurança e a eficiência da operação.

Quanto à disposição do rejeito arenoso, gerado na ITM-I, filtrado no filtro de disco a vácuo, atualmente em operação na planta piloto de desaguamento da Mina do Pico, pode se concluir com os dados preliminares obtidos até o presente momento, que o material filtrado na umidade ótima de compactação, ou próximo a ela, apresenta um excelente comportamento para ser empilhado. A Seção P5 foi a recomendada para o empilhamento dos rejeitos arenosos filtrados.

Sobre à disposição do rejeito fino, gerado na ITM-I, filtrado no filtro prensa horizontal em operação na planta de desaguamento da Mina do Pico, pode-se concluir com os dados preliminares, que: a lama filtrada não é passível de empilhamento direto e, a lama espessada também não apresentou comportamento adequado para empilhamento direto, necessitando de ações adicionais para possibilitar o empilhamento destes materiais.

A respeito da disposição conjunta entre o rejeito arenoso filtrado, a lama espessada e o material estéril, dispostos de maneira individual dentro da mestra estrutura, pode-se concluir que é possível empilhar estes materiais de forma segura dentro de uma mesma estrutura, trata-se de uma operação que necessita de disciplina e rigor técnico durante todo o ciclo, projeto e construção/operação. Deve haver planejamento criterioso e específico, ligado ao confinamento e ao tempo de secagem da camada de lama espessada depositada, de modo a permitir que exista um tempo de ressecamento adequado entre uma camada e outra de lama disposta, tornando necessário operar a pilha em diversas frentes de disposição, de forma simultânea, o que pode elevar demasiadamente os custos, pois operar a pilha em diversas frentes eleva o número de equipamentos em operação, necessitando de uma avaliação de caráter financeiro.

Como orientação, segue descrito nos itens listados abaixo, os estudos a serem desenvolvidos para desenvolvimento de um projeto voltado para o empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro.

1. Caracterização geológico-geotécnica dos materiais a serem empilhados: rejeito total, fracionado e do estéril da mina;
2. Estudos práticos em escala reduzida, avaliando o desaguamento para o rejeito total e fracionado e o comportamento destes materiais através da formação de aterros experimentais;
3. Balanço de massa destes materiais;
4. Caracterização geológica da região e do local escolhido para implantar a pilha;
5. Caracterização das interferências locais;
6. Estudo Hidrológico;
7. Estudo Hidrogeológico;
8. Previsão de desmatamento da área;
9. Ações para tratativa da fundação;
10. Arranjo geométrico da pilha (Seção P5);
11. Dispositivos de drenagem interna;
12. Dispositivos de drenagem superficial;
13. Proteção da face dos taludes contra processos erosivos;
14. Instrumentação para monitoramento geotécnico;
15. Carta de risco;
16. Manual de Operação (diretrizes operacionais);
17. Plano de fechamento da pilha.

7.1. SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Segue como sugestão para estudos futuros os seguintes temas relacionados ao empilhamento de rejeitos de minério de ferro.

- Modelagem bidimensional e tridimensional do fluxo de água no interior do aterro formado com os rejeitos desaguados de minério de ferro, analisando os efeitos do incremento de poropressão no interior do aterro. Busca-se com este estudo verificar os impactos relacionados a drenabilidade do aterro com a estabilidade física dos taludes de um dado empilhamento e propor medidas de

controle, como por exemplo, o dimensionamento adequado da drenagem interna, ou taxa de evolução da pilha, qual o número de camadas máximo a ser construído em um determinado período;

- Propor critérios e medidas para composição da carta de risco dos instrumentos de monitoramento geotécnico de aterros, incluindo análise de tensão deformação da pilha, determinando níveis críticos para os marcos superficiais e os inclinômetros, sendo este estudo ímpar, que é específico de cada rejeito e de cada empilhamento;
- Quantificar os impactos associados a implantação do sistema de disposição de rejeitos, propondo ações mitigadoras e um plano de fechamento ou abandono para a estrutura;
- Entre outros pode ser citado também como tema relevante para o assunto, à abordagem do ponto de vista dos órgãos fiscalizadores, que não apresenta atualmente disponível para consulta e utilização uma norma técnica específica para empilhamento de rejeitos desaguados, visto que tais normas e regulamentações existem para o desenvolvimento e implantação de projetos de barragens e pilhas de estéreis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). Construção Civil – Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos. NBR 12051, São Paulo, SP. 14 p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1990). Construção Civil – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. NBR 12004, São Paulo, SP. 6 p.

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2006). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. NBR 13029, Rio de Janeiro, RJ. 5 p.

ABRÃO, P.C. Sobre a deposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: I Simpósio sobre barragens de rejeito e disposição de resíduos industriais e de mineração - REGEO'87, ABMS/ABGE/CBGB/CE, Rio de Janeiro, RJ, I: 1-10, 1987.

ANDRADE, Paula Cristina Castro. Impacto integrado de empreendimentos minero metalúrgicos em Congonhas [manuscrito] / Paula Cristina Castro Andrade – 2013; 113p.

BOSSI, E.T. Avaliação do efeito da percentagem de finos no comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro. Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2015; 180p.

Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral / Coordenadores Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves Brasília: DNPM, 2014. 141p.

Brackebusch, F. W. (2000). Aspectos Básicos de los Sistemas de Rellenoen Pasta. In: PASTE TECHNOLOGY 2000 SEMINAR, Perth – Austrália.

CURI, A. (2002). Análise qualitativa da sustentabilidade ambiental da mineração: mito e realidade. In: VILLAS BÔAS, Roberto & BEINHOFF, Christian (Editores). Indicadores de sustentabilidade para a indústria extrativa mineral. Rio de Janeiro: CNPQ/CYTED, p. 47 – 62.

CASTRO, G. (1969). Liquefaction of sands. Ph.D. Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.

Davies, M.P.; Mcroberts, E.C. & T.E Martin (2002). Static of tailings – Fundamentals and case histories. In proceedings Tailings Dams. ASDSO/USCOLD, Las Vegas

ESPÓSITO, T.J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construída por aterro hidráulico. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 363 p.

FERREIRA, J. L. F. (2012). Análise de estabilidade de taludes pelos métodos de Janbu e Spencer. Dissertação de Mestrado, FEUP.

FREIRE NETO, J P. Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade [manuscrito] / João Pimenta Freire Neto. – 2009. xxiv, 154f.: il., color.; grafs.; tabs.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. Inventário estadual de barragens do Estado de Minas / Fundação Estadual do Meio Ambiente. --- Belo Horizonte: Feam, 2013. 25 pg.; il.

GOMES, R. C. (2009). Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 220 p.

GOMES, R. C. (2007). Sistemas de Disposição de Rejeitos de Mineração Utilizando Geotubos como Estruturas de Desaguamento e/ou de Contenção. V Simpósio Brasileiro de Geossintéticos / REGEO, Recife: ABMS/IGS-BR, CD.

GOMES, R. C. (2016). Comunicação interpessoal – Curso interno VALE S.A. “CARATERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E SISTEMAS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO”, 7 módulos, carga horária 32h.

GUIMARÃES, N.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011, 129 p.

HEAD, K.H. (1984). Manual of Soil Laboratory Testing. Description of soils, 1 vols. London, UK, pp. 175-234.

Inventário de Barragens 2013, emitido pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM),

MENDES, MB, MILONAS, JG, PIRETE, W, SILVA, J.P. (2013) Perspectiva dos parâmetros geotécnicos dos rejeitos de minério de ferro do "Quadrilátero Ferrífero", após diferentes processos de tratamento e processamento de minério. Paste 2013. Belo Horizonte, Brasil.

MENDES, M B. (2008) Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante. 2008. 189 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

MILONAS, J.G. (2006). Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.146 p.

PEREIRA, E.L Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Minério de Ferro sob Carregamento Estático. 2005. 185 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2005.

PINTO, C.S (2006); Curso básico de mecânica dos solos. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

PIRETE, W, MAZON, A, MENDES, M.B.M, MILONAS, J.G., SILVA, J.P. Segregação Hidráulica nas Barragens de Rejeito de Flotação das Minas de Mariana da VALE. COBRAMSEG. 2014. Goiânia, GO.

Programa de Pós-Graduação em Geociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 403 p. Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2012

PORTES, A.M.C. (2013); Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta. Tese de Mestrado. Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte.

QUARESMA, L. F. Ferro e Aço. Sumário Mineral. (Ed.) DNPM – Departamento Nacional de Pesquisas Mineralis. 22ª Ed. 64-67, 2002.

ROMEIRO, S.B.S., Química na Siderurgia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 1997. Porto Alegre. RS.

SANTOS, A.G. Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, julho de 2004.

SILVA, J.P.S; Avaliação da influência do regime de fluxo no comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito alteada pelo método de montante / J.P.S. Silva. - São Paulo, 2014. 159p.

TAKEHARA, L. (2004). Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed. Tese de Doutorado. Instituto de Geociência,

YAMAMURO, J.A.; LADE, P.V. Static liquefaction of very loose sands. Canadian Geotechnical Journal, v. 34, p. 905-917, 1997.