

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

ANÁLISE DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DESAGUADOS

LUNA CLARIANA DE SOUZA

**ORIENTADOR: LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO
COORIENTADOR: ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

BRASÍLIA / DF: JULHO / 2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DESAGUADOS

LUNA CLARIANA DE SOUZA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)

ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UnB)
(COORIENTADOR)

MICHÉLE DAL TOÉ CASAGRANDE, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

MICHAEL ANDREY VARGAS BARRANTES (UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF, 10 de julho de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, LUNA CLARIANA

Análise da disposição de rejeitos desaguados [Distrito Federal] 2018.

xii. 53p. 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Mineração

2. Rejeitos

3. Desaguamento

4. Disposição

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, L.C. (2018). Análise da disposição de rejeitos desaguados. Monografia de Projeto Final em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 53 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Luna Clariana de Souza.

TÍTULO: Análise da disposição de rejeitos desaguados.

GRAU: Bacharel em Engenharia Ambiental ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Luna Clariana de Souza
Rua 18 norte lotes 1 e 3 Bloco B 405
CEP: 71.910-720 Brasília – DF – Brasil
e-mail: luna.clariana@gmail.com

RESUMO

Os processos de extração mineral produzem grandes quantidades de resíduos sem valor comercial. Os rejeitos são resíduos formados a partir do beneficiamento mineral, normalmente apresentam elevado teor de água e são comumente dispostos em barragens, o material estéril é originado a partir do decapeamento das jazidas e pode ser descartado em pilhas. O desaguamento de rejeitos consiste em reduzir o volume de água, implicando em estruturas mais seguras de disposição e reduzindo o potencial de falha associado ao processo de disposição de rejeitos, contudo os custos operacionais e o rigor técnico requerido devem ser avaliados no processo de gerenciamento de resíduos na mineração. O objetivo do estudo foi avaliar o comportamento do fluxo, das tensões efetivas e da estabilidade, a partir de modelagem computacional com o GeoStudio 2012, para três estruturas hipotéticas de disposição de rejeitos desaguados: empilhamento de rejeito filtrado, empilhamento de rejeito filtrado/rejeito espessado e disposição compartilhada - estéril, rejeito filtrado e lama espessada. As análises foram efetuadas para condições drenada e com elevação de 110 m da linha freática, o melhor comportamento foi apresentado pelo sistema de disposição compartilhada, onde os fatores de segurança foram de 1,8 para condição drenada e 1,5 para a condição de elevação do nível de água.

Palavras-chave: Desaguamento de rejeitos. Disposição compartilhada. Empilhamento drenado.

ABSTRACT

The mine operations produce large amount of non-commercial waste. The tailings are formed from the mineral processing, they have a high water content and usually are disposed in dams, the waste are generation from the depletion of the deposits and can be disposed in stacks. Dewatering technologies reduce the water management, improve more safe surface system and reduce the failure potentials associated with the tailings disposal process, however the required operational and technical costs must be evaluated in the waste management process in mining. This study available the flow, effective stress and the stability, from computational modeling with the GeoStudio 2012, of the Three hypothetical surfaces: dry stack for filtered tailings; paste tailings and filtered tailings disposal; shared disposal – filtered tailings, past tailings and waste. The analyzes were made for drained conditions and elevation of 110 m of the water table, the best system of disposal a dewatering tailing was presented by the shared disposal, where the safety factors were 1.8 for drained condition and 1.5 for condition of elevation water level.

Keywords: Dewatering tailings. Shared disposal. Dry stack.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	MOTIVAÇÃO	2
1.2.	OBJETIVOS.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	4
2.2	NORMAS BRASILEIRAS	6
2.3	CARACTERIZAÇÃO DOS REJEITOS	8
2.4	ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO	18
2.4.1	Rejeito filtrado.....	12
2.4.2	Disposição Hidráulica	13
2.4.3	Alteamento pelo método de montante.....	17
2.4.4	Alteamento pelo método de jusante	17
2.4.5	Alteamento pelo método linha de centro.....	18
2.5	GERENCIAMENTO DE REJEITOS	20
2.6	MÉTODOS DE FALHA	20
2.7	INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA E MONITORAMENTO	25
2.7.1	Plano de monitoramento.....	26
3	GEOSTUDIO	28
3.1	SEEP/W.....	28
3.2	SLOPE/W	30
3.3	SIGMA/W	34

4	METODOLOGIA	35
4.1.	ESCOLHA DAS SEÇÕES TÍPICAS	35
4.2	MODELAGEM GEOSTUDIO	36
5	PARÂMETROS GEOTÉCNICOS	36
6	SEÇÕES DE ESTUDO.....	37
7	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
7.1	DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO	39
7.2	DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO E LAMA ESPESSADA.....	42
7.3	DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA – ESTÉRIL, REJEITO FILTRADO E LAMA ESPESSADA	45
8	CONCLUSÕES	49
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Produtos mais exportados pelo Brasil em 2016 (IBRAM, 2017).....	1
Figura 2.1 - Exemplo de disposição de rejeito filtrado no Chile (Davies, 2011).....	12
Figura 2.2 - Lançamento de rejeito em polpa (Espósito, 2000).....	14
Figura 2.3 - Série de hidrociclones na crista do barramento. (Figueiredo, 2007).....	15
Figura 2.4 - Alteamento pelo método de montante. (Albuquerque Filho, 2004).....	16
Figura 2.5 - Método de alteamento a jusante. (Albuquerque Filho, 2004).....	17
Figura 2.6 - Métodos de alteamento linha de centro. (Albuquerque Filho, 2004).....	17
Figura 2.7 - Formas de disposição do rejeito espessado. (Boccamino, 2017, apud Landrialt, 2002).....	16
Figura 2.8 - Formação geométrica de uma pilha de rejeitos espessados. (Boccamino, 2017, apud Gomes, 2016).....	17
Figura 2.9 - Exemplo de disposição de rejeito filtrado no Chile (Davies, 2011).....	19
Figura 2.10 - Exemplo de pilha de rejeito filtrado. (Kaswalder et al, 2018).....	19
Figura 2.11 - Pilha de disposição compartilhada entre rejeitos desaguados e estéril. (Boccamino, 2017).....	20
Figura 2.12 – Sequência construtiva de formação da pilha. (Boccamino, 2017).....	20
Figura 2.13 -Tendências no uso de técnicas de desaguamento na mineração (Davies et al, 2010).....	22
Figura 2.14 - Galgamento da barragem de Merriespruit, África do Sul, 1994. (Carneiro, 2017).....	24
Figura 2.15 - Erosão interna (piping), Barragem de Fundão, Brasil, 2009.....	24
Figura 2.16 - Liquefação, Barragem de Fundão, Brasil, 2015.....	25
Figura 2.17 - Evolução dos radares interferométricos (Carneiro, 2017).....	27
Figura 2.18 - Fluxograma de atividades do sistema de alerta (Carneiro, 2017).....	28
Figura 3.1 - Superfície de ruptura genérica para a análise de estabilidade pelo método das fatias (Das, 2011).....	30
Figura 3.2 - Forças atuantes em uma fatia genérica (Das, 2011).....	31
Figura 3.3 - Função meio seno de correlação das forças entre fatias, em $f(x)$ corresponde à função aplicada e λ corresponde ao percentual da função utilizado (Ribeiro, 2016).....	32

Figura 3.4 - Forças atuantes aplicadas em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price (Silva, 2013).....	33
Figura 3.5 - Modelo constitutivo linear, comportamento elástico (Ribeiro, 2016).....	34
Figura 3.6 - Modelo constitutivo hiperbólico (Ribeiro, 2016).....	35
Figura 6.1 – Geometria de disposição de rejeito filtrado.....	38
Figura 6.2 – Geometria de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado.....	39
Figura 6.3 – Geometria de disposição compartilhada – Estéril, rejeito filtrado e lama espessada.	39
Figura 7.1 – Análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado....	40
Figura 7.2 - Análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado com elevação de 110 na linha freática.....	41
Figura 7.3 – Análise de estabilidade para a geometria de disposição e rejeito filtrado.....	41
Figura 7.4 - Análise de estabilidade para a geometria de disposição e rejeito filtrado com elevação de 110 m no nível freático.....	41
Figura 7.5 – Resultados da análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado.....	43
Figura 7.6 – Resultados da análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado com elevação de 110 do nível freático.....	43
Figura 7.7 – Resultado da análise de estabilidade na pilha de rejeito filtrado e rejeito espessado.	44
Figura 7.8 – Resultado da estabilidade na pilha de disposição de rejeito espessado e rejeito filtrado com elevação de 110 no nível freático.....	44
Figura 7.9 – Análise de percolação na geometria de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	46
Figura 7.10 – Análise de percolação com elevação da linha freática para 110 m na geometria de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	46
Figura 7.11 – Tensões efetivas na direção x no interior da pilha de disposição compartilhada estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	47

Figura 7.12 – Tensões efetivas na direção y no interior da pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	47
Figura 7.13 – Tensões efetivas na direção x no interior da pilha de disposição compartilhada com elevação de 110 m no nível d'água – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	47
Figura 7.14 – Tensões efetivas na direção y no interior da pilha de disposição compartilhada com elevação de 110 m no nível d'água – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	48
Figura 7.15 – Resultado da análise de estabilidade na pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.....	48
Figura 7.16 – Resultado da análise de estabilidade na pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado, com elevação de 110 m no nível freático.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1- Relação gravimétrica entre o produto final e os rejeitos gerados (Boscov, 2012, apud Braga, 2007)	2
Tabela 2.1 - Histórico de acidentes com barragens de rejeito de mineração no Brasil. (Wise Uranium, 2017, adaptado).....	6
Tabela 2.2 - Classificação de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado	8
Tabela 2.3 - Classificação de rejeitos (Abrão, 1999, apud Vick, 1983).....	9
Tabela 2.4 – Classificação dos rejeitos quanto ao teor de umidade (Davies et al, 2010) ...	10
Tabela 5.1- Parâmetros para análise de permeabilidade. (Boccamino, 2017, Ribeiro, 2017 - adaptado).....	36
Tabela 5.2 - Parâmetros geotécnicos para análise de estabilidade. (Boccamino, 2017, Ribeiro, 2017 - adaptado).....	37
Tabela 6.1 – Dimensões das estruturas de disposição analisadas.....	38
Tabela 8.1 – Resultados dos fatores de segurança para as geometrias e condições aplicadas de fluxo.....	49

LISTA DE ABREVIACÕES E NOMENCLATURAS

<i>BAP</i>	<i>Best Available/Applicable Practice</i>
<i>BAT</i>	<i>Best Available Technology</i>
CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DPA	Dano Potencial Associado
FS	Fator de Segurança
<i>GNSS</i>	<i>Global Navigation Satellite System</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
<i>ICOLD</i>	<i>International Commission on Large Dams</i>
<i>MAC</i>	<i>Mining Association of Canada</i>
PAEBM	Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração
PIB	Produto Interno Bruto
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
<i>RAR</i>	<i>Real Aperture Radar</i>
<i>SAR</i>	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SIGBOM	Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração
SNISB	Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de barragens
UnB	Universidade de Brasília

LISTA DE SÍMBOLOS

n	Fatia em análise
W_n	Peso da fatia
b_n	Largura da fatia
r	Raio da envoltória de ruptura (circular)
α_n	Ângulo de atuação da força cisalhante
T_r	Força de cisalhamento tangente à envoltória
N_r	Força normal a envoltória
ΔL_n	Contato entre a fatia a envoltória e o maciço
X	Força de cisalhamento pelo contato com fatias adjacentes
E	Força normal pelo contato com fatias adjacentes
$f(x)$	Função utilizada
k_ψ	Coefficiente de permeabilidade em função da sucção mátrica
k_s	Coefficiente de permeabilidade na condição saturada
θ_s	Teor de umidade volumétrico na condição saturada
θ_r	Teor de umidade volumétrico residual
λ	Porcentagem da função utilizada
F_m	Equilíbrio de momentos
F_f	Equilíbrio de Forças
c'	Coessão efetiva
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo
u	Poropressão
Dd	Carregamento
X_R	Força cisalhante do contato com fatias adjacentes
X_L	Força normal de contato com fatias adjacentes
ε	Deformação
σ_1	Tensão principal maior
σ_3	Tensão principal menor

1 – INTRODUÇÃO

A extração mineral é uma atividade de importante impacto no cenário econômico mundial. Segundo o IBRAM (2017), no Brasil a indústria extrativa representava 4,3 % do PIB, dentre os principais produtos exportados encontram-se: ferro, ouro, cobre, bauxita, entre outros. As fases de lavra e de beneficiamento de minérios, entretanto, geram elevadas quantidades de resíduos que devem ser dispostos adequadamente.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração – *IBRAM* (2017), a atividade mineral foi um dos setores que mais contribuiu para o favorecimento da balança comercial brasileira em 2016, sendo que o minério de ferro representou 62% das exportações do Brasil, como mostra a Figura 1.1.

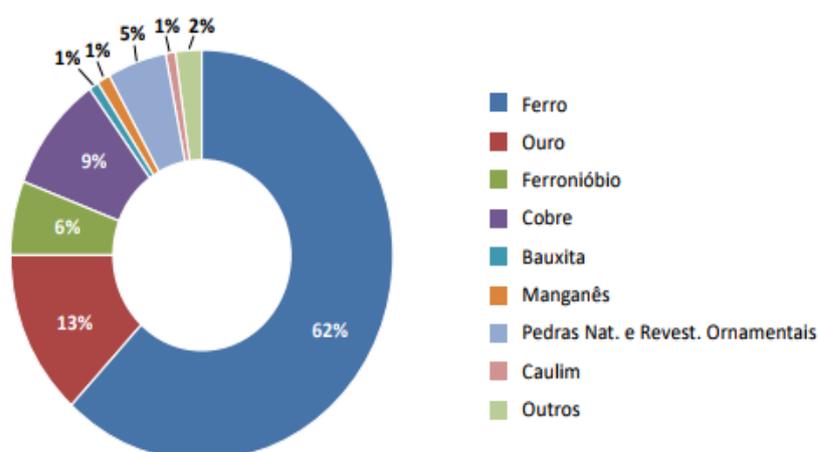


Figura 1.1 - Produtos mais exportados pelo Brasil em 2016 (IBRAM, 2017)

Conforme Boscov (2012), os processos de beneficiamento de minério são utilizados para regularizar os fragmentos dos minerais, aumentando a qualidade do produto final e separando a fração que não possui valor econômico, que são os rejeitos, a Tabela 1.1 apresenta as razões médias do produto final e dos rejeitos gerados pelo beneficiamento de alguns minérios.

Tabela 1.1 - Relação gravimétrica entre o produto final e os rejeitos gerados
(Boscov, 2012, apud Braga, 2007)

Minério	Razão gravimétrica entre o produto final e os rejeitos gerados
Ferro	2:1
Alumina	1:1-1:2,5
Carvão	1:3
Fosfato	1:5
Cobre	1:30
Ouro	1:10.000

A partir dos dados apresentados na Tabela 1.1, percebe-se a elevada geração de rejeitos, a escolha das técnicas mais eficientes e que impliquem em menores impactos ambientais e maior a viabilidade econômica é um importante aspecto no gerenciamento de resíduos da mineração. A gestão dos rejeitos produzidos pelos processos de extração mineral é o objeto de estudo deste trabalho.

1.1 – MOTIVAÇÃO

As técnicas de disposição de rejeitos mais utilizadas no Brasil já se encontram, de uma forma geral, bem consolidadas, contudo existem novas técnicas com propostas que visam a diminuição no volume de água nos rejeitos, que podem implicar em uma gestão mais eficiente dos resíduos produzidos pelo beneficiamento mineral. Os novos métodos de disposição não estão ainda bem consolidados e necessitam de maiores conhecimentos técnicos. O estudo de métodos alternativos de disposição de rejeitos com menores volumes de água tem como finalidade o maior entendimento do comportamento das estruturas de contenção e as implicações econômicas, sociais e ambientais decorrentes da escolha destas novas alternativas. Entretanto, a consolidação de novas tecnologias que impliquem em maior segurança foi um aspecto relevante para a execução do presente estudo.

1.2 – OBJETIVO

- **Geral**

A partir do histórico de acidentes envolvendo barragens de rejeito e dos danos causados pela ruptura dessas estruturas de grande porte, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os sistemas de gerenciamento de rejeitos, analisando novas metodologias de disposição com suas particularidades, bem como avaliar as tecnologias de maneira a integrar e otimizar as diversas etapas (o beneficiamento, os sistemas de transporte de resíduos, os sistemas de lançamento e tratamento de rejeito).

- **Específicos**

A partir dos objetivos gerais, o estudo tem como proposta:

- Avaliar o comportamento geotécnico das estruturas de disposição de rejeitos desaguados
- Obter o comportamento do fluxo, das tensões efetivas e da estabilidade a partir de análises numéricas no GeoStudio 2012

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas as revisões bibliográficas referentes à evolução das técnicas de disposição de rejeito, será realizada uma abordagem das legislações vigentes no âmbito do gerenciamento de resíduos da mineração, serão apresentadas as técnicas de disposição com ênfase em aterros hidráulico e disposição de rejeito filtrado. O gerenciamento de rejeitos da mineração e os métodos de falha relacionados às estruturas de contenção de rejeitos também serão descritos neste capítulo.

2.1 – EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

A disposição de rejeitos de mineração é tema de constante preocupação no Brasil e no mundo, em função do risco associado à operação e aos métodos construtivos de estruturas de contenção de rejeitos. Para Barrera *et al* (2015), a base para o gerenciamento mais eficiente da disposição de rejeitos está relacionada ao equilíbrio entre os aspectos sociais, ambientais e econômicos.

De acordo com o Comitê Brasileiro de Barragens (CBDB, 2011), por muito tempo os resíduos gerados pelas atividades de mineração foram descartados diretamente sobre o solo ou em cursos d'água. A necessidade da alocação de rejeitos em local específico surgiu com o aumento do volume gerado, em virtude da maior capacidade de processamento dos minerais com o desenvolvimento de melhores tecnologias. Estes locais continuaram, contudo, sendo em corpos hídricos mais afastados das áreas de processamento mineral.

De acordo com o CBDB (2011), a partir de meados do século XIX começaram a surgir as primeiras barragens de contenção de rejeitos, em virtude dos impactos ambientais causados pela falta de gerenciamento dos resíduos gerados pela atividade mineral. Inicialmente, estas estruturas de contenção eram projetadas e construídas sem muito critérios técnicos, muitas das estruturas de contenção não resistiam às primeiras chuvas. Contudo, essas estruturas já eram construídas por meio de aterros hidráulicos. A evolução tecnológica de estruturas de contenção de rejeito ocorreu a partir rupturas e acidentes, fato que serviu para impulsionar o desenvolvimento de melhores técnicas construtivas. A partir da década de 70 já eram

compreendidos os fenômenos de percolação, estabilidade, liquefação e a importância de fatores climáticos para o projeto das estruturas em questão.

No cenário atual, os métodos mais comuns de disposição de rejeitos utilizam a técnica de aterro hidráulico, represando o rejeito em barragens do tipo convencional ou construídas a partir do próprio rejeito, depositado hidraulicamente. No caso do maciço construído com o próprio rejeito, as técnicas construtivas adotadas referem-se ao alteamento a montante, o alteamento em linha de centro ou a jusante. Estes métodos, apesar de possuírem vantagens econômicas, possuem desvantagens relacionadas ao pouco controle hidráulico, principalmente o método de montante, motivando os estudos e desenvolvimentos de novas tecnologias.

De acordo com *ICOLD* (2001), os acidentes em barragens de rejeito podem ocorrer por diversas causas, dentre elas: problemas de fundações causados por insuficientes investigações geotécnicas; instabilidade de taludes; erosão interna (*piping*); estrutura inadequada, entre outros fatores. A falta de aplicação das melhores tecnologias nas fases de projeto, construção e operação também é apontada pelo *Bulletin 121* do *ICOLD* como causas dos principais acidentes. A Tabela 2.1 apresenta o histórico de casos de acidentes envolvendo barragens de rejeito no Brasil.

Os impactos associados aos acidentes impulsionaram o desenvolvimento de novas tecnologias, dentre as técnicas de disposição emergentes, de acordo com Franca (2017), podem ser listados para rejeitos mais grosseiros: empilhamento drenado de areia, baias de secagem, ciclonagem de rejeitos, rejeito em pasta, filtração. Para rejeitos com teor de finos predominante as tecnologias são: centrifugação, separação magnética, pasta, filtração, secagem. Essas técnicas têm como propósito diminuir a quantidade de água nos rejeitos e recircular a água, minimizando os impactos ambientais nas atividades minerais. A seleção da melhor técnica vai depender das características físicas, químicas e mineralógicas do rejeito, bem como da viabilidade econômica (Barrera et al, 2015).

Tabela 2.1 - Histórico de acidentes com barragens de rejeito de mineração no Brasil.

(Wise Uranium, 2017, adaptado)

LOCAL	DATA	NOME	TIPO DE MINÉRIO	Nº DE ÓBITOS
Mariana, MG	5 de novembro de 2015	Barragem de Fundão	Ferro	17 óbitos, 2 pessoas desaparecidas
Itabirito, MG	10 de setembro de 2014	Barragem da Herculano	Ferro	2 óbitos e uma pessoa desaparecida
Miraí, MG	10 de janeiro de 2007	Barragem da Rio Pomba/Cataguases	Bauxita	-
Nova Lima, MG	22 de junho de 2001	Barragem de Macacos	Ferro	2 óbitos e 3 pessoas desaparecidas
Itabirito, MG	maio de 1986	Barragem de Fernandinho	-	7 óbitos

2.2 – NORMAS BRASILEIRAS

A lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010 estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (*PNSB*), que tem como finalidade garantir a segurança das barragens, reduzir a possibilidade de acidentes e minimizar suas consequências. Para tanto, deve ser garantida a segurança de uma barragem nas fases de projeto, construção, primeiro enchimento, operação, desativação e usos futuros. Essa lei criou o sistema de classificação de barragens em função da categoria de risco e do dano potencial associado e instituiu o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (*SNISB*), que tem como finalidade o registro informatizado das condições de segurança de barragens. Segundo o Art. 13 da lei 12.334/2010 “ O *SNISB* compreenderá um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de suas informações, devendo contemplar barragens em construção, em operação e desativadas”; e definiu o plano de segurança de barragens com instrumento da *PNSB*.

A portaria *DNPM* nº 416/2012 foi responsável pela regulamentação do cadastro nacional de barragens de mineração, plano de segurança, inspeções e revisões periódicas em barragens de mineração. A portaria considera barragens de mineração as barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base no direito minerário, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração ou descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.

A portaria *DNPM* nº 526 de 09 de dezembro de 2013 definiu a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Ação de Emergência das Barragens de Mineração (*PAEBM*), como disposto no Art. 1º da portaria.

A portaria 70.389 17 de maio de 2017 revogou as portarias nº 416/2012 e nº 526/2013, com a objetivo de aperfeiçoar e elevar os níveis de segurança das barragens. A portaria em questão foi responsável pela criação do Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração (*SIGBOM*), responsável pelo gerenciamento das ações de segurança e pelo cadastro nacional de barragens de mineração; também foi responsável por tornar obrigatória a elaboração do mapa de inundação, com o objetivo de auxiliar na classificação do Dano Potencial Associado (*DPA*); obrigatoriedade da implementação de sistema de monitoramento em barragens de mineração; revisão periódica de segurança por meio de uma declaração de estabilidade sempre que ocorrer mudança na classe de rejeitos, ou quando ocorrerem alteamentos, ou no máximo a cada 7 anos.

Como síntese da normatização vigente a respeito da *PNSB*, conforme disposto nos anexos da portaria 70.389/2017, as barragens podem ser classificadas de acordo com a categoria do risco e dano potencial associado, como ilustra a Tabela 2.2, a classificação auxilia na mobilização por meio dos órgãos de controle, a fim de elaborar o Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (*PAEBM*).

Tabela 2.2 - Classificação de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

(DNPM, portaria 70.389/2017)

DANO POTENCIAL ASSOCIADO			
CATEGORIA DE RISCO	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	B	C	D
BAIXO	B	C	E

Quanto à estrutura e ao conteúdo mínimo a serem apresentados no Plano de Segurança de Barragem, devem constar a caracterização do empreendimento, a declaração da classificação da barragem pelo *DNPM*, conforme consta na Tabela 2.2, deve ainda apresentar o licenciamento ambiental, seria uma informação geral a respeito do empreendimento; no volume I devem estar apresentadas as documentações técnicas, como projeto básico, executivo, “*as built*”, ou “*as is*” caso a barragem tenha sido construída antes da lei 12.334/2010; devem ser apresentados os planos de operação, bem como o monitoramento e instrumentação e demais planos e procedimentos operacionais. As medições do monitoramento e instrumentação, também devem conter os relatórios de inspeção de segurança regular seguindo o disposto na normatização, como análise de estabilidade, característica dos rejeitos -granulometria, mineralogia, parâmetros de resistência e susceptibilidade dos rejeitos ao fenômeno da liquefação. O plano deverá, também, conter um projeto de revisão periódica, ou seja, reavaliação dos procedimentos de segurança apresentados nos volumes anteriores, resultando na declaração de condição de estabilidade e no relatório final de estudo; por fim deverá constar o plano de Ação Emergencial (*PAEBM*).

O decreto estadual nº 46.993, de 2 de maio de 2016, publicado em Minas Gerais Diário do Executivo, que instituiu a auditoria técnica extraordinária de segurança de barragem e suspendeu a formalização do processo de licenciamento ambiental tanto para novas barragens que pretendem utilizar o método de alteamento a montante e quanto para o alteamento de barragens já existentes.

2.3 - CARACTERIZAÇÃO E TÉCNICAS DE DESAGUAMENTO DE REJEITO

Os processos de extração mineral e beneficiamento são responsáveis pela geração de grandes volumes de rejeito, que consistem em partículas sólidas que resultam de processos de britagem, moagem peneiramento e/ou tratamento químico do minério, Lozano (2006) define o rejeito como sendo os resíduos que não possuem valor econômico. A caracterização dos rejeitos varia de acordo com o tipo de minério, na Tabela 2.3 são apresentadas as características do rejeito em função do tipo de minério extraído.

Para o melhor entendimento do comportamento dos rejeitos nas etapas de transporte, descarga e deposição, é necessário conhecer as características tanto da fração granulométrica quanto da fração líquida do rejeito. Quando transportados por via hídrica são chamados de polpa, os rejeitos em pasta estão associados a maiores viscosidades e menores teores de umidade, os rejeitos filtrados são caracterizados pelo teor mais elevado de sólidos, com consistência mais homogênea.

Tabela 2.3- Classificação de rejeitos (Vick, 1983, citado por Abrão 1999)

Tipos e exemplos	Características
Rejeitos de rochas brandas - Carvão - Potássio	A fração fina domina as propriedades geotécnicas devido à presença de argilas.
Rejeitos de rochas duras - Chumbo-zinco - Cobre - Ouro-prata - Níquel	As frações finas são geralmente não-plásticas, e as areias controlam o comportamento.
Rejeitos finos - Argilas fosfáticas - Bauxita	Como a fração arenosa é pequena, o comportamento do material é governado pela fração siltosa e argilosa.
Rejeitos grossos - Urânio - Ferro - Fosfato	Material mais grosseiro, com propriedades boas de engenharia.

Tabela 2.4 – Classificação dos rejeitos quanto ao teor de umidade (Davies et al, 2010)

	Polpa	Espessado	Pasta	Torta
Técnicas de desaguamento	possibilidade do uso de ciclones	Coagulantes/floculantes ciclones/espessamento	Deep bed/ cone (espessamento com aditivos químicos)	Filtro (a vácuo ou de pressão)
Densidade	30-40% de sólidos	45-65% de sólidos	65-75% de sólidos	80-85% de sólidos
Transporte		bombas		Caminhões ou correias
Fluxo de água	gerenciamento de grande quantidade de água	considerável quantidade de água	pouca água para gerenciar	material consolidado,
Deposição	segregação	possível segregação	não segregável	não segregável

Na Tabela 2.4, são apresentadas as características dos rejeitos em função da diminuição do teor de água. Os rejeitos em polpa necessitam de estruturas de contenção, os demais podem ser autossustentáveis, não necessitando necessariamente de estruturas de contenção. Neste sentido, conforme o teor de sólidos do rejeito é aumentado os taludes das pilhas de disposição podem ser mais íngremes.

2.4 – SISTEMAS DE DISPOSIÇÃO

A disposição de rejeitos pode ser subaquática, subterrânea, disposições vinculadas ao processo de extração ou disposição a céu aberto. Conforme Cavalcante (2000), a disposição subaquática consiste na disposição de rejeitos com alto teor de finos, implicando em baixas densidade e resistência ao cisalhamento, em virtude das características mineralógicas da composição do rejeito. De acordo com Lozano (2006), esta técnica de disposição de rejeitos não é muito empregada em virtude dos impactos ambientais. A disposição de rejeitos subterrânea consiste no preenchimento de câmaras resultantes da extração mineral com

rejeitos. Na disposição vinculada ao sistema de extração, os rejeitos são dispostos a céu aberto ou em câmaras subterrâneas para servirem de fundação para equipamentos utilizados no processo de extração mineral. A técnica de disposição mais utilizada é a céu aberto, onde a estrutura do barramento é construída em bacias ou vales (Bosco, 2012).

2.4.1 – Disposição Hidráulica

Os aterros hidráulicos são estruturas geotécnicas que possuem diversas aplicabilidades, como acumulação de água ou de rejeito. Esta técnica possui vantagens econômicas e tecnológicas, segundo Espósito (2000), as vantagens estão relacionadas ao alto grau de mecanização, aplicabilidade em materiais granulares, elevada taxa de construção, a técnica promove a separação de partículas, dentre outras vantagens.

Os aterros hidráulicos são barragens geotécnicas construídas através de processos hidromecânicos. Estes aterros são formados a partir da descarga da mistura entre partículas sólidas e fluidos, chamada de polpa, sobre uma área. No local da deposição da hidromistura, a polpa pode ter comportamento de um fluido monofásico, caso não sejam segregáveis, caso sejam segregáveis, podem ter comportamentos distintos entre os componentes da mistura.

De acordo com Melent'ev *et al* (1993) e Yufin (1965), citado por Ribeiro (2000), seguindo as recomendações soviéticas, a distribuição granulométrica do material de empréstimo é considerada a característica mais importante nos aterros hidráulico. A experiência dos soviéticos em aterros hidráulicos promoveu avanços no processo de hidromecanização implicando em maior controle de qualidade e melhorias na metodologia construtiva dos aterros hidráulicos

As propriedades deste tipo de estrutura estarão diretamente relacionadas à composição da mistura e ao método de disposição. Polpas não segregáveis implicam em praias de rejeito mais íngremes, com granulometria constante e menores densidades quando comparadas com depósitos de polpas que segregam, que são mais planos e com granulometria relativamente variável. O comportamento da deposição dos rejeitos para a formação do aterro hidráulico depende da velocidade de descarga, da concentração da polpa de rejeitos e da distribuição

de canhões de descarga, também conhecido como *spigots*. Ao longo da crista, esses parâmetros de deposição serão responsáveis pelas condições de fluxo do aterro hidráulico, portanto serão fatores determinantes para a garantia de segurança do projeto. Medidas como o rebaixamento da linha freática, aumento da concentração do rejeito, sistema de drenagem interna, utilização de camadas intermediárias com maiores granulometrias, são medidas que levam à diminuição do risco de liquefação e ocasionam um aumento da estabilidade da estrutura (Espósito, 2000).

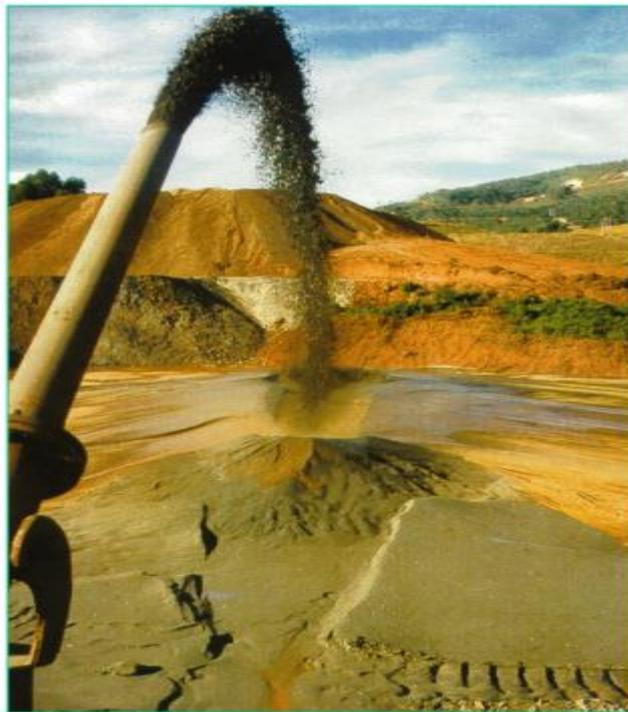


Figura 2.2 - Lançamento de rejeito em polpa (Espósito, 2000)

De acordo com Ribeiro (2000), a descarga de rejeitos também pode ser feita a partir de hidrociclones, onde a fração fina é separada da fração grosseira antes do lançamento, a fração com maior granulometria é lançada no corpo do aterro. O processo de ciclonagem implica no aumento da estabilidade da estrutura em função do aumento da permeabilidade com a separação das frações finas e grosseiras.

De acordo com Figueiredo (2007), a ciclonagem do rejeito consiste, primeiramente, na retirada de parte da água da polpa e sua eventual recirculação, e em seguida ocorre a separação do material com maior granulometria (*underflow*) e do material mais fino

(*overflow*). A fração correspondente ao *underflow* pode ser utilizada para o alteamento do barramento.

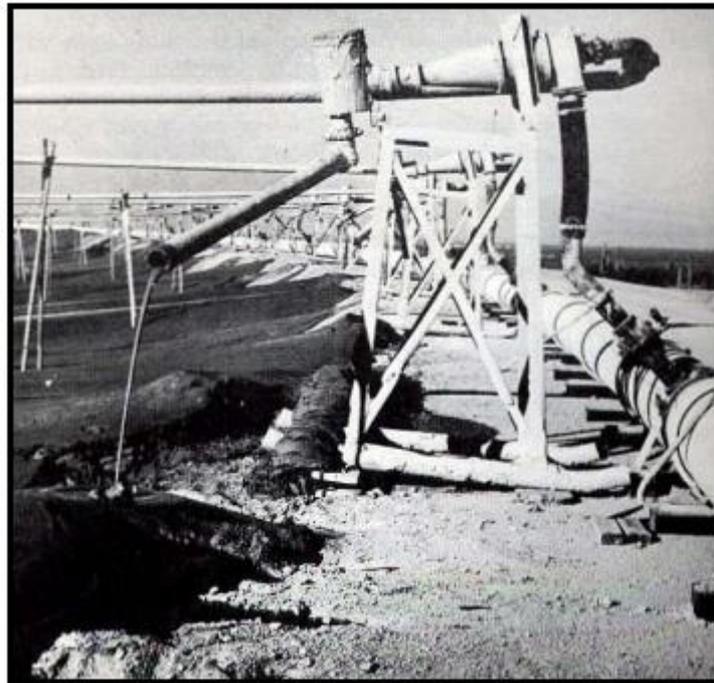


Figura 2.3 - Série de hidrociclones na crista do barramento. (Figueiredo, 2007)

Outro aspecto que implica na maior estabilidade dos aterros hidráulicos é a densidade do material do aterro, em virtude da maior susceptibilidade de ocorrência da liquefação, em função da formação de camadas de material granular fofo e saturado, a densidade, ou a porosidade do depósito são parâmetros essenciais para o controle dos aterros hidráulicos.

A disposição pelo método de hidromecanização se inicia a partir da construção de um dique de partida, que pode ser construído com solo compactado argiloso, enrocamento ou estéril (Cavalcante, 2004). Conforme Castro (2008), conforme o dique for preenchido com polpa, são efetuados alteamentos com a finalidade de aumentar a capacidade de disposição de rejeitos.

2.4.2 – Alteamento pelo método de montante

Neste método construtivo, a linha central da crista é deslocada para montante, tendo início em uma barragem de partida, em virtude das características construtivas, onde o rejeito apresenta maiores teores de umidade, pode ocorrer uma sub pressão, ou seja, fluxo ascendente de água originada pela variação da percolação (Castro, 2008).

Figueiredo (2007) listou algumas implicações relacionadas ao alteamento pelo método de montante, como a dificuldade no controle da linha freática, susceptibilidade à ocorrência de *piping* e liquefação. É importante ressaltar a importância do controle operacional e rigoroso controle de campo, com a finalidade de garantir maior qualidade no processo construtivo e, conseqüentemente, maior segurança.

As barragens de contenção de rejeitos alteadas pelo método de montante não são recomendadas para o armazenamento de grandes volumes de água, também não é recomendada a construção deste tipo de barramento em regiões que apresentam alta sismicidade. É importante considerar que a velocidade do alteamento deve ser controlada, para garantir controle da estrutura.

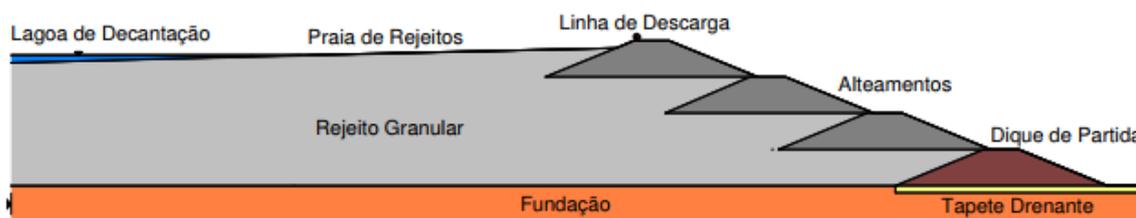


Figura 2.4 - Alteamento pelo método de montante. (Albuquerque Filho, 2004)

2.4.3 - Alteamento pelo método de jusante

Neste método as camadas subsequentes da estrutura de contenção de rejeitos são efetuadas a jusante do dique de partida. A maior segurança deste método está relacionada ao maior controle, podendo ser efetuada a impermeabilização do talude de montante e a construção de um sistema de drenagem interna na estrutura do barramento. Apesar do método ser mais

seguro quando comparado com o alteamento a montante, exige maior custo de investimento e maior tempo construtivo, por isso esta técnica pode ser inviável para disposição de rejeitos em mineradoras de menor porte. Um aspecto relevante relacionado ao alteamento pelo método de jusante é a necessidade de maior área a jusante para disposição dos rejeitos, outro fator que pode inviabilizar sua utilização; as vantagens, entretanto, estão relacionadas à segurança e ao aumento do volume útil do reservatório, aspecto divergente do método de alteamento a montante, em que a cada alteamento o volume a ser comportado pelo reservatório é reduzido (Castro, 2008). A Figura 2.5 ilustra as formas de alteamento, onde os aspectos geométricos de cada método de jusante podem ser visualizados e melhor compreendidos.

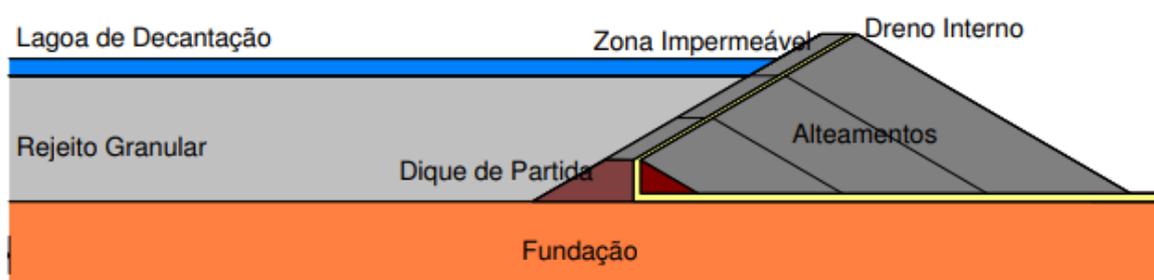


Figura 2.5 - Método de alteamento a jusante. (Albuquerque Filho, 2004)

2.4.4 – Alteamento pelo método linha de centro

De acordo com Albuquerque Filho (2004), o método consiste no alteamento a partir de um dique inicial, onde o eixo permanece na mesma posição, como mostrado na Figura 2.6. Este método possui, assim como o alteamento a jusante, a possibilidade da construção de um sistema de drenagem interna, possibilitando maior controle freático no maciço, aumentando a segurança da estrutura. A técnica possui facilidade construtiva e requer menores volumes de material no processo construtivo, o custo do alteamento pela linha de centro é elevado, contudo é inferior ao custo do método de jusante (Castro, 2008).

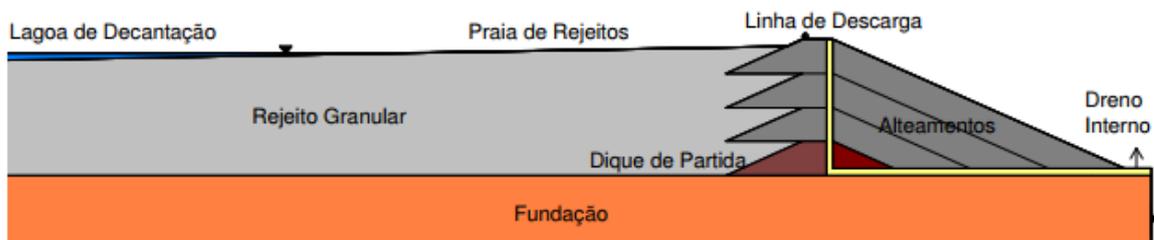


Figura 2.6 - Métodos de alteamento linha de centro. (Albuquerque Filho, 2004)

2.4.5 – Rejeito espessado

De acordo com Boccamino (2017), a geometria de disposição do rejeito em pasta pode ser confinada com estéril, rejeito filtrado ou confinado por vegetação. A Figura 2.7 apresenta algumas formas de disposição a depender da topografia do terreno e a Figura 2.8 a geometria usualmente utilizada para a disposição do rejeito em pasta.

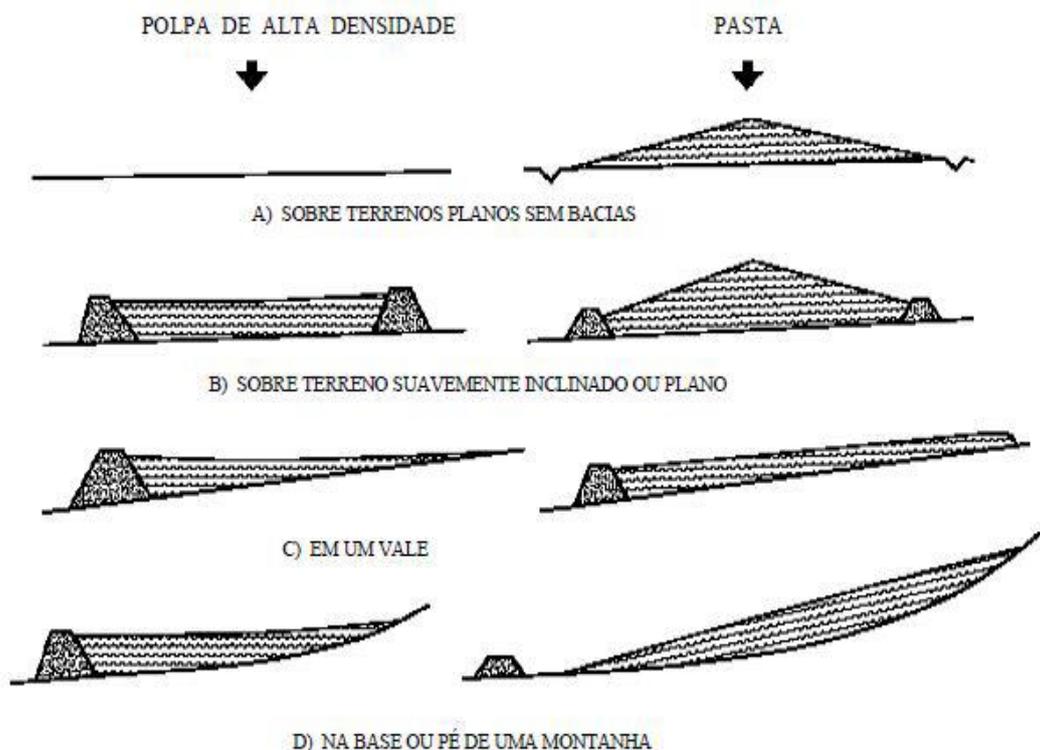


Figura 2.7 - Formas de disposição do rejeito espessado. (Boccamino, 2017, apud Landrialt, 2002)

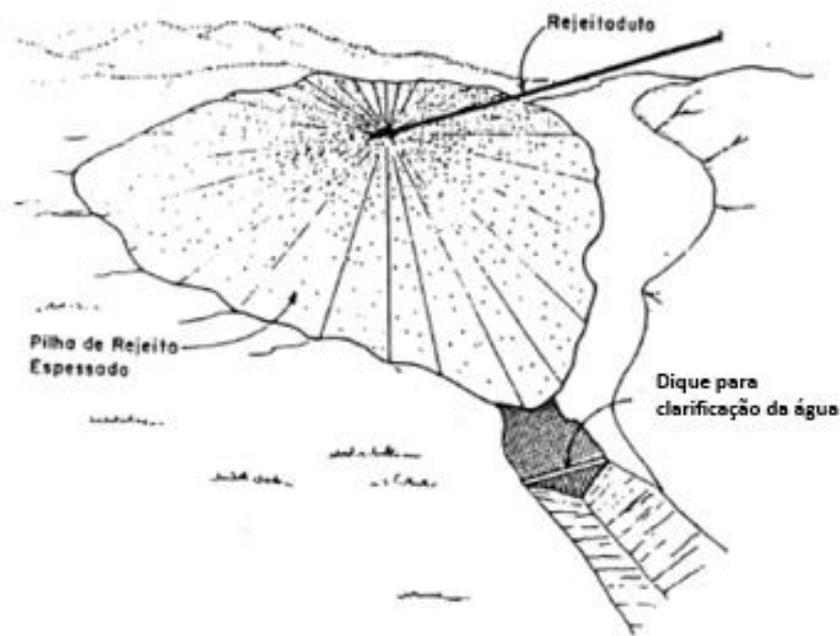


Figura 2.8 - Formação geométrica de uma pilha de rejeitos espessados. (Boccamino, 2017, apud Gomes, 2016)

2.4.6 – Rejeito filtrado

De acordo com Davies (2011), a filtragem pode ser feita a partir do uso de pressão ou vácuo, as características geotécnicas do rejeito são relevantes para a eficiência do método, não sendo indicado para rejeitos com percentuais elevados de argila $<74\mu\text{m}$. O desafio da técnica está em obter o tipo de filtragem com maior custo-benefício de acordo com as características do rejeito, sendo necessário o teste em escala piloto para essa determinação.

Ainda segundo Davies (2011), a aplicação desta tecnologia pode seguir os seguintes atributos: ser utilizada em regiões árida, onde o uso da água é restrito; zonas de sismicidade; regiões frias; condições topográficas que impossibilitam a disposição convencional; menores custos na fase do fechamento. A pilha formada pela deposição dos rejeitos granulares possui um sistema de drenagem interna, por isso há necessidade dos sólidos possuírem a granulometria mais elevada, para contribuir e otimizar o processo de drenagem (Portes, 2013).

Segundo Ávila (2011), este método de disposição possui as seguintes características: maior estabilidade do maciço, consequência da condição não saturada; maior densidade; redução do dano potencial; maior segurança no caso de alteamento a montante; esta técnica de disposição tem apresentado menor custo por tonelada de rejeito.

Para a tecnologia de disposição de rejeitos filtrados é necessário obter a tensão, o teor de umidade e a condutividade hidráulica. Em virtude de o teor de sólidos ser elevado, a alta densidade dos rejeitos filtrados possibilita a formação de taludes mais íngremes; há necessidade, contudo, do maior controle de fundação para evitar problemas na estabilidade das pilhas formadas. O sistema de drenagem das pilhas de disposição de rejeito filtrado deve ser projeto, levando em consideração o índice pluviométrico do local (Davies, 2011). As Figuras 2.9 e 2.10 apresentam exemplos de pilhas de disposição de rejeito filtrado.



Figura 2.9 - Exemplo de disposição de rejeito filtrado no Chile (Davies, 2011)



Figura 2.10 - Exemplo de pilha de rejeito filtrado. (Kaswalder et al, 2018)

2.4.6.1 – DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA

Há possibilidade de co-disposição e disposição compartilhada do rejeito filtrado com estéreis no mesmo espaço físico. A técnica de co-disposição apresenta como característica a mistura prévia do rejeito-estéril e possui como vantagens a melhoria das características do rejeito, redução do comprometimento ambiental de áreas de disposição de resíduos gerados na mineração; há necessidade, entretanto, de maior controle no projeto e operação do sistema, controle do rejeito ou os estéreis quanto a toxicidade. No sistema de disposição compartilhada o rejeito e os materiais estéreis são dispostos no mesmo espaço físico sem mistura prévia dos materiais. (Silva, 2014).

Os estéreis são provenientes do decapeamento de jazidas, são materiais sem valor comercial, sendo considerado um resíduo da atividade mineral, necessitando de disposição adequada. Usualmente o material estéril é disposto em pilhas ao longo dos talwegues ou encostas presentes nas imediações do processo de lavra. (Silva, 2014)

Para a formação da geometria de disposição compartilhada entre rejeito e estéril, Boccamino (2017) apresenta algumas associações, a Figura 2.11 apresenta a configuração final da geometria formada a partir da co-disposição de estéril, rejeito espessado e rejeito filtrado, a Figura 2.12 ilustra o processo construtivo da pilha de disposição compartilhada.

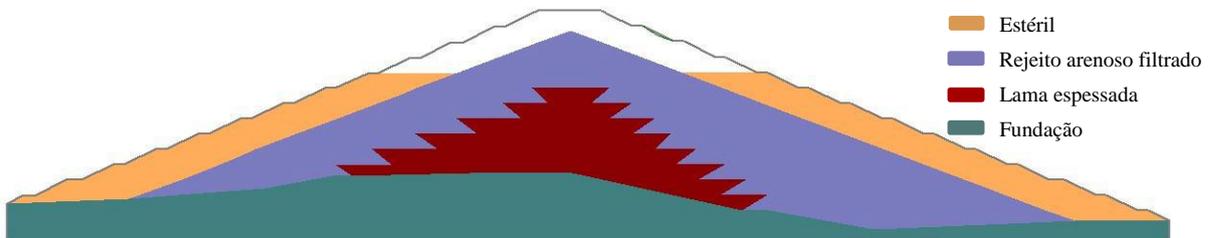


Figura 2.11 - Pilha de disposição compartilhada entre rejeitos desaguados e estéril.
(Boccamino, 2017)

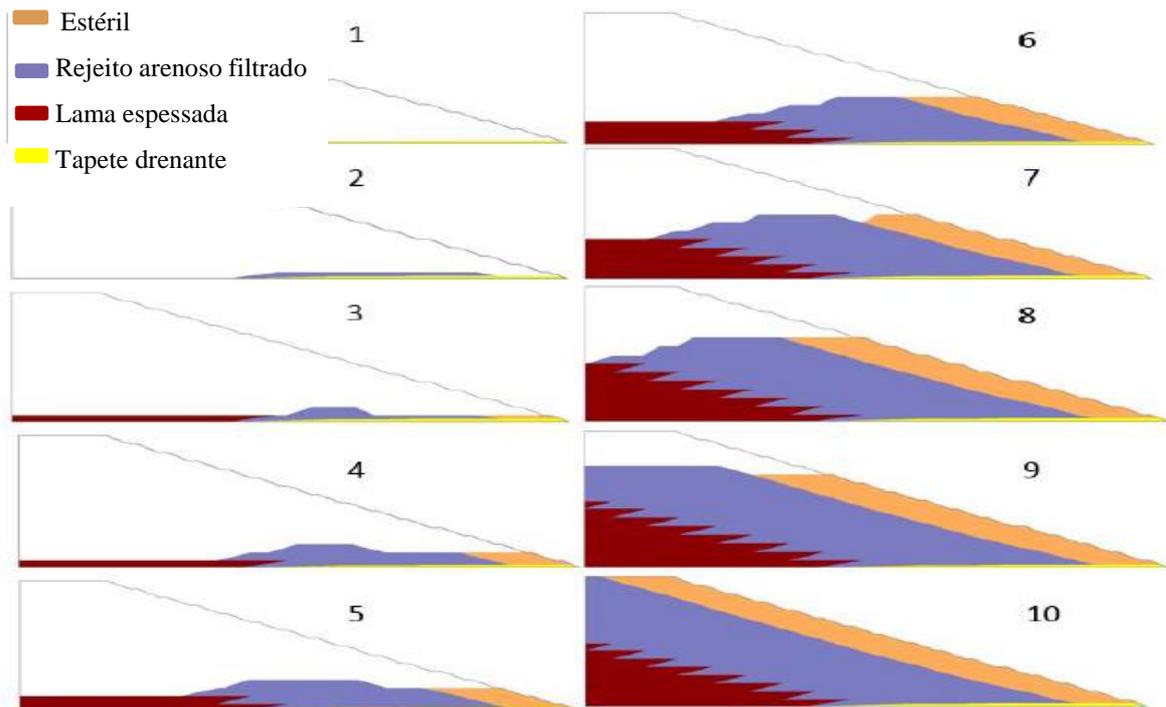


Figura 2.12 – Sequência construtiva de formação da pilha. (Boccamino, 2017)

2.5 – GERENCIAMENTO DE REJEITOS

O sistema de gerenciamento das atividades minerais inclui a minimização dos impactos ambientais em todo o projeto e todas as fases de operação de uma mina, bem como nas etapas

do fechamento e no uso futuro, devendo o projeto de concepção conter a identificação dos riscos potenciais. Conforme *Mining Association of Canada – MAC* (2017), a implementação de novas tecnologias de disposição de rejeitos deve seguir os seguintes princípios. A aplicação da tecnologia mais apropriada para gerir os riscos, durante todas as fases do ciclo de vida levando em consideração a minimização de impactos ambientais e a viabilidade econômica (*Best Available Technology – BAT*); a aplicação das melhores práticas para garantir maior eficiência na gestão técnica e econômica, envolvendo sistema operacional que apresente melhoria constante deve ser aplicada durante o ciclo de vida e no descomissionamento (*Best Available/Applicable Practices – BAP*), e bem como a seleção rigorosa do local de disposição de rejeitos (MAC, 2017).

Segundo Franca (2017), as *Best Available Technology (BAT)* têm como princípios a eliminação de água superficial, promoção da condição não-saturada dos rejeitos e atingir condições de dilatação no depósito de rejeitos por compactação. Uma das tecnologias de disposição que apresenta estes componentes é a filtragem de rejeitos. Para a operação de sistema de disposição alternativos, há necessidade de equipes operacionais qualificadas, a compactação deve ser adequada, o controle da umidade deve ser rigoroso. A operação deve contar ainda com controle erosão, controle de *run-off*, proteção do talude de jusante, controle das poropressões geradas durante o empilhamento e durante o transporte – havendo risco de liquefação -, controles específicos em períodos chuvosos. Há necessidade de um sistema de back-up caso ocorram problemas técnicos de operação da filtragem, por exemplo.

Tratando-se da disposição de rejeitos, a avaliação do risco é essencial para a estruturação do sistema de gerenciamento, esta avaliação deve considerar o impacto potencial em função das mudanças climáticas, de eventos climáticos extremos, tornando o sistema de disposição resiliente tanto no período operacional quanto no descomissionamento. A possibilidade de falha e os riscos associados, o controle associado aos modos de falha possíveis, bem como os indicadores e ações de controle e a verificação da efetividade do controle também fazem parte do sistema de avaliação de riscos (MAC, 2017).

Segundo Davies *et al* (2010), as experiências coletivas mostram que as técnicas de desidratação dos rejeitos têm se tornado alternativas viáveis a depender da escolha da tecnologia mais adequada de acordo com as características mineralógicas dos rejeitos, conforme as tecnologias de desaguamento forem sendo utilizadas serão obtidas maiores

informações sobre operação, regulamentação, entre outros aspectos. A Figura 2.13 apresenta as tendências no uso de tecnologias de desaguamento.

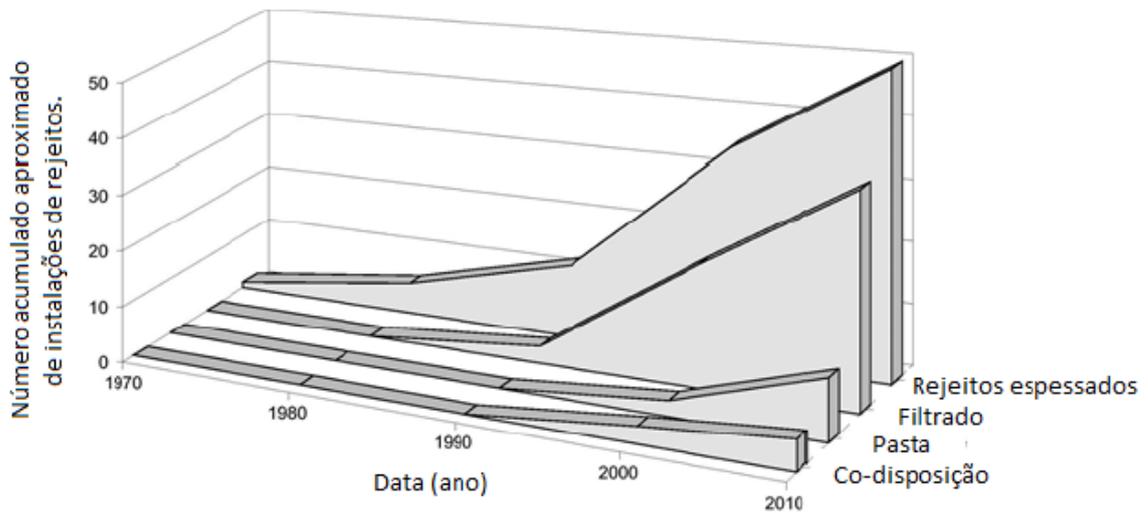


Figura 2.13 - Tendências no uso de técnicas de desaguamento na mineração
(Davies et al, 2010)

2.6 – MÉTODOS DE FALHA

Em função das condições de construção até que sejam atingidas as capacidades máximas, as barragens ou pilhas de rejeito estão sujeitas a instabilidades, em virtude do potencial de impacto ambiental e das perdas econômicas. O monitoramento dessas estruturas de contenção de rejeitos deve ser constante ao longo de toda vida útil e após sua desativação (Boscov, 2012).

As falhas em estruturas geotécnicas de contenção rejeitos estão associadas aos seguintes modos de ruptura:

- Instabilidade de taludes
- Erosão interna - *Piping*
- Galgamento
- Liquefação

A instabilidade está relacionada à perda da resistência do material e a pressão da água, o *piping* ocorre devido ao carreamento de materiais por meio de trincas, o galgamento ocorre pelo extravasamento de água pela crista (fenômeno mais relacionado à hidrologia/hidrogeologia, também está relacionado ao projeto inadequado de vertedouro, obstrução de vertedouro, adensamento da crista) e a liquefação é ocasionado pela elevada poropressão em solos não coesivos. A seguir serão detalhados os seguintes mecanismos de ruptura associados às estruturas de contenção de rejeitos: instabilidade de taludes, *piping* e liquefação.

Conforme Boscov (2012), os principais modos de ruptura em barragens de rejeito estão relacionados aos problemas na fundação; a elevação excessiva do nível d'água, que pode ocorrer em virtudes de elevação pluviométrica ou inadequações na utilização de ciclones; ao galgamento, onde como consequências possíveis tem-se a erosão da crista e do talude de jusante; a erosão interna que pode ocasionar a ruptura completa do barramento.

As elevadas taxas de construção, mais rápidas do que as velocidades previstas no projeto, podem implicar em elevação das poropressões; escavações no pé do talude também podem ocasionar instabilidade no corpo do barramento, e os problemas quanto a liquefação estão relacionados ao uso de maquinário que promovam vibração e da ocorrência de sismos, a depender do material constituinte do barramento, ou seja, material granular fofo saturado.

A estabilidade está diretamente relacionada ao comportamento das poropressões no corpo do barramento, que é obtida por meio de um estudo de percolação. Quando a capacidade de suporte de carga pela fundação é insuficiente o plano de ruptura ocorre sob a barragem. As falhas no mapeamento geológico-geotécnico, mau dimensionamento das campanhas de sondagem e nos ensaios podem levar a problemas de fundação.

As de falhas de estruturas de contenção de rejeitos podem ocasionar assoreamento e poluição dos corpos hídricos, bem como podem ocasionar impactos econômicos e também estão relacionadas a riscos ao ser humano e à fauna, por isso há necessidade de minimizar os danos potenciais e aumentar a segurança destas estruturas geotécnicas. As Figuras 2.14, 2.15 e 2.16 mostram, respectivamente, falhas em estruturas de contenção por galgamento, *piping* e liquefação.

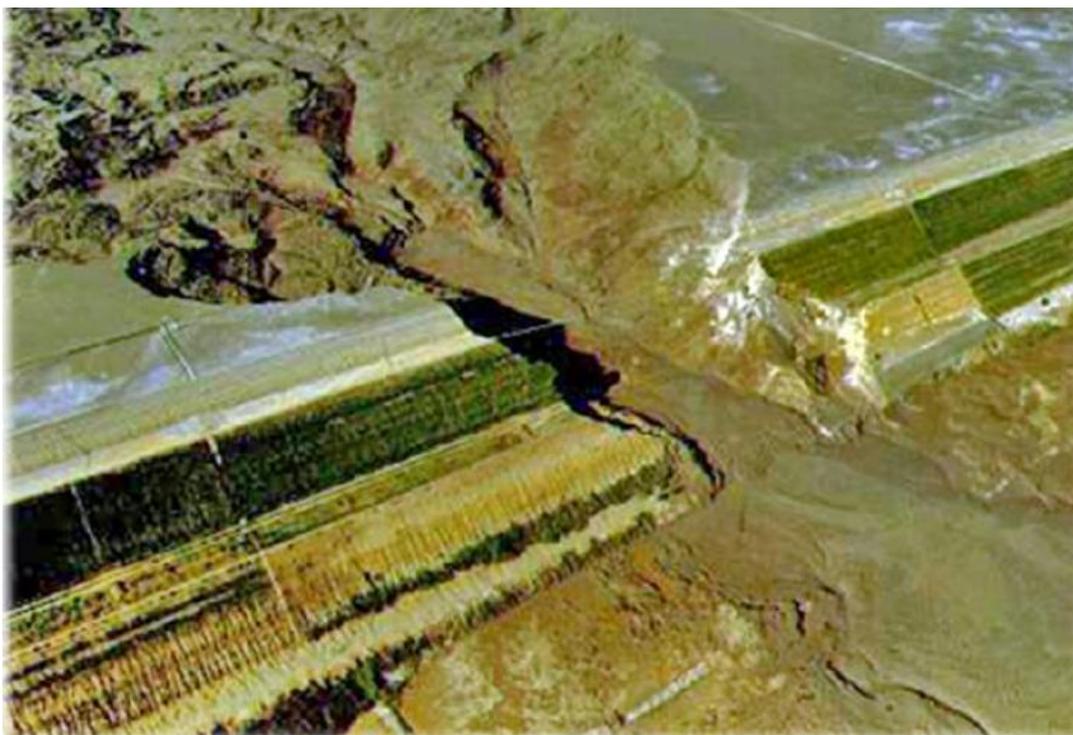


Figura 2.14 - Galgamento da barragem de Merriespruit, África do Sul, 1994
(Carneiro, 2017)



Figura 2.15 - Erosão interna (piping), Barragem de Fundão, Brasil, 2009
(Morgenstern *et al*, 2016)



Figura 2.16 - Liquefação, Barragem de Fundão, Brasil, 2015 (Morgenstern *et al*, 2016)

2.7 - INSTRUMENTAÇÃO GEOTÉCNICA E MONITORAMENTO

A instrumentação tem como objetivo medir as grandezas indicadoras de comportamento, como pressão de água e a vazão de percolação da água, para tanto devem ser avaliados os modos de rupturas descritos na Seção 2.6. A instabilidade está relacionada aos parâmetros de resistência do material e com a pressão de água; a erosão interna está relacionada a concentração de tensão e ao comportamento da água; o galgamento está relacionado ao modelo hidrológico incorreto, e a liquefação relaciona-se a elevação rápida da poropressão em solos não coesivos (Assis, 2003).

Para a água os indicadores de comportamento são a pressão de água e a vazão; tratando-se do comportamento estrutural os indicadores estão relacionados ao deslocamento, ou seja, recalque e deslocamento horizontal. O comportamento das tensões é importante para saber se há locais de concentração ou alívio de tensões.

Neste contexto, segundo Carneiro (2017), o estado da arte no monitoramento para o gerenciamento da segurança de estruturas é necessário um conhecimento prévio de anomalias para minimizar ou eliminar suas consequências, para a avaliação do comportamento de estruturas geotécnicas nas atividades de mineração há uma tendência no desenvolvimento de soluções e técnicas mais avançadas de monitoramento, implicando em redução de custos com reparos.

2.7.1 – Plano de monitoramento

Conforme Carneiro (2017), o plano de monitoramento consiste das seguintes etapas:

- projeto de instrumentação
- implantação da instrumentação
- aquisição de dados
- análise de dados
- ação: correção ou aprimoramento da aquisição de dados

A instrumentação pode ser feita com radar de estabilidade de talude, pode ser feito com radar direcionado (3D) ou monitoramento de área ampla (2D), e consiste da contínua medição de movimentos estruturais de alta precisão, até 4 km, independente de condições meteorológicas adversas e em grandes áreas, nesse caso há necessidade de utilização de prismas. A Figura 2.17 mostra a evolução dos radares interferométricos, comparando o *Synthetic Aperture Radar (SAR)*, radar 2D de abertura sintética de alta resolução, alcance de 4,5 km, entre outras características, e o *Real Aperture Radar (RAR)*, radar 2D de abertura real, alcance de 2800 m, alta resolução e ampla área monitorada, o *RAR* consiste em uma grande antena parabólica com um feixe fino que escaneia todo o talude, o *SAR* consiste em uma pequena antena com um feixe largo que se move ao longo de um trilho linear que garante a alta resolução (Carneiro, 2017).

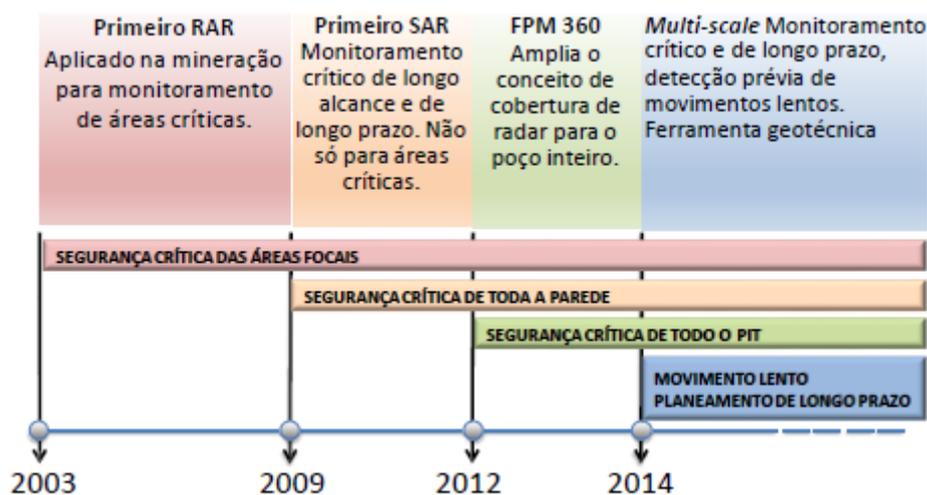


Figura 2.17 - Evolução dos radares interferométricos (Carneiro, 2017)

A estação total robotizada garante informações contínuas, com análise *on-line*, acesso remoto, e medem o movimento de um ponto específico, simplificando a avaliação da tendência e aceleração ao longo do tempo. Como desvantagens apontam-se as interferências atmosféricas e a dispersão de pontos. Devem ser instalados prismas de monitoramento. Quando comparados com os radares, o custo é menos elevado, contudo, o radar apresenta maior precisão, detectando pequenos deslizamentos não identificados por outros instrumentos (Carneiro, 2017).

Carneiro (2017) ainda aponta outro instrumento para detectar deslocamento é o *Global Navigation Satellite System (GNSS)*, que é um *GPS* automatizado para coleta e envio de deformação em tempo real. Este equipamento pode ser usado para monitoramento pontual rastreando o movimento de pontos individuais nos taludes usando satélites. Como vantagens o *GNSS* não sofre interferência de condições atmosféricas, entretanto apresenta um custo mais elevado e não estão disponíveis em tempo integral.

Os principais sensores geotécnicos para o monitoramento são: extensômetros, inclinômetros, piezômetros e células de pressão de terra por contato. Os extensômetros são utilizados para monitorar o deslocamento entre pontos, serve para monitorar trincas superficiais, como apresentam medições em tempo real pode servir como alerta, já que o sistema é automatizado. Os inclinômetros são utilizados para aferir deslocamentos horizontais, possuem leitura manual. Os In-place inclinômetros monitoram o movimento do solo e a sua direção de forma automatizada. Os piezômetros medem o nível de água e as poropressões, eles podem ser de tubo aberto (piezômetro de Casagrande), de corda vibrante ou pneumático.

As inspeções visuais também são importantes quando se trata de monitoramento, pois permitem uma avaliação qualitativa. O sistema de alerta também é fundamental, pois minimizam impactos de uma eventual falha do sistema de contenção de rejeitos. O sistema de alerta deve estar integrado com a instrumentação, sendo os limites de alerta ajustados, a Figura 2.18 mostra os componentes de um sistema de alerta.



Figura 2.18 - Fluxograma de atividades do sistema de alerta (Carneiro, 2017)

3 - GEOSTUDIO

3.1 – SEEP/W

As simulações a partir do *SEEP/W* tem como objetivo obter o comportamento da linha freática, determinando a distribuição da poropressão, a vazão e direção do fluxo de água. O controle no nível freático é de fundamental importância para a estabilidade da estrutura de contenção, por isso as análises de fluxo serão usadas como base para as análises de estabilidades que serão obtidas com a plataforma *SLOPE/W*.

O comportamento do fluxo na modelagem tem como base as seguintes delimitações:

- Condição de saturação
- Regime (constante/transiente)
- Malha de elementos finitos

Os parâmetros necessários para a modelagem da percolação serão:

- Permeabilidade do solo (k)
- Teor de umidade volumétrico saturado (θ_{sat})
- Teor de umidade volumétrico residual (θ_r)
- Anisotropia (k_v/k_h)

Para o fluxo em meio não saturado, o coeficiente de permeabilidade varia de acordo com o grau de saturação do meio. Para baixos teores de umidade, o coeficiente de permeabilidade diminui, podendo necessitar de gradientes hidráulicos elevados ou grandes intervalos de tempo para a detecção do fluxo (Mendoza, 2005). Para a determinação indireta da função condutividade hidráulica, o SEEP/W apresenta, dentre outros, o método de Van Genuchten (1980), que propôs a Equação 3.1 para a determinação analítica do coeficiente de permeabilidade do meio não saturado em função da sucção mátrica (k_ψ):

$$k_\psi = k_s \cdot \frac{[1 - (a\psi)^{n-1}] * (1 + (a\psi)^n)^{-m}]^2}{[(1 + a\psi)^n]^{m/2}} \quad (3.1)$$

k_s : coeficiente de permeabilidade na condição saturada

a, n, m : parâmetros para ajuste da curva ($m = 1 - 1/n$), $n > 1$

Os parâmetros a, n e m podem ser estimados a partir da função teor de umidade volumétrico adotando como referencial um ponto P equidistante do teor de umidade volumétrico para as condições saturada (θ_s) e residual (θ_r), a inclinação S_p da tangente à função no ponto P pode ser calculada segundo a Equação 3.2, os demais parâmetros podem ser calculados a partir das Equações 3.3, 3.4 e 3.5.

$$S_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \cdot \left[\frac{d\theta_p}{d(\log \psi_p)} \right] \quad (3.2)$$

$$m = 1 - \exp(-0,8S_p), \text{ para } 0 < S_p < 1 \quad (3.3)$$

$$m = 1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3}, \text{ para } S_p > 1 \quad (3.4)$$

$$a = \frac{1}{\psi_p} \left[2^{1/m} - 1 \right]^{(1-m)} \quad (3.5)$$

3.2.2 – SLOPE/W

A análise computacional da estabilidade de taludes tem como objetivo retornar a superfície de ruptura relacionada ao menor Fator de Segurança (*FS*). A análise de estabilidade é feita pelo método do equilíbrio limite, que consiste na divisão da superfície de ruptura em várias fatias, o método possui como considerações: fatias em equilíbrio e com o mesmo fator de segurança. As Figuras 3.1 e 3.2 mostram a superfície uma superfície de ruptura circular e o diagrama de forças atuantes em uma fatia genérica, respectivamente.

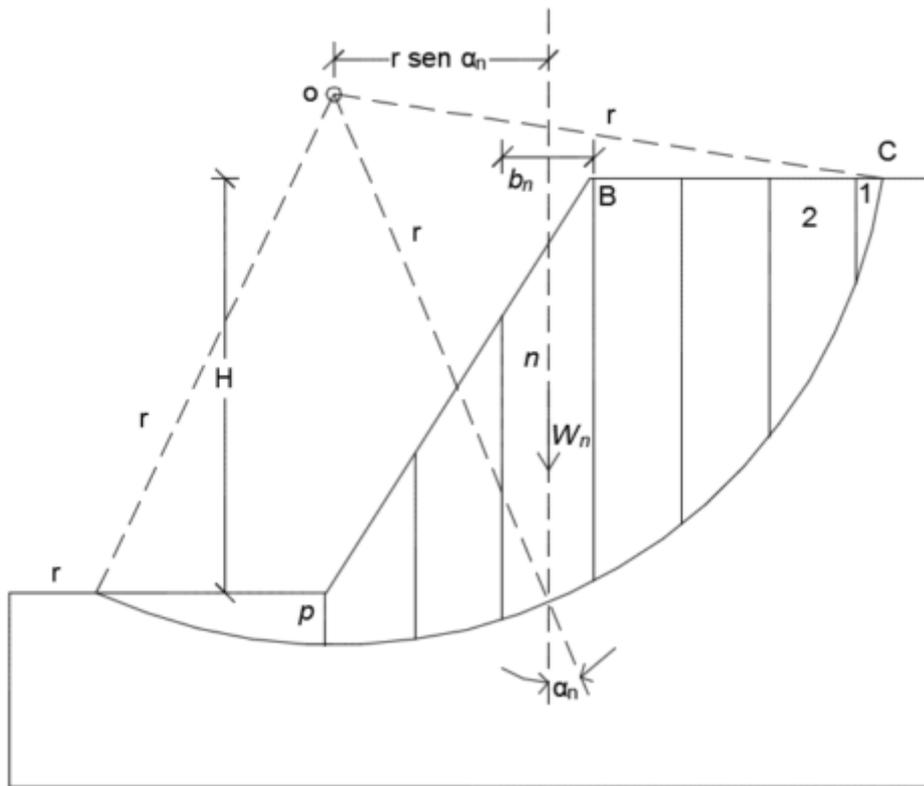


Figura 3.1 - Superfície de ruptura genérica para a análise de estabilidade pelo método das fatias (Das, 2011)

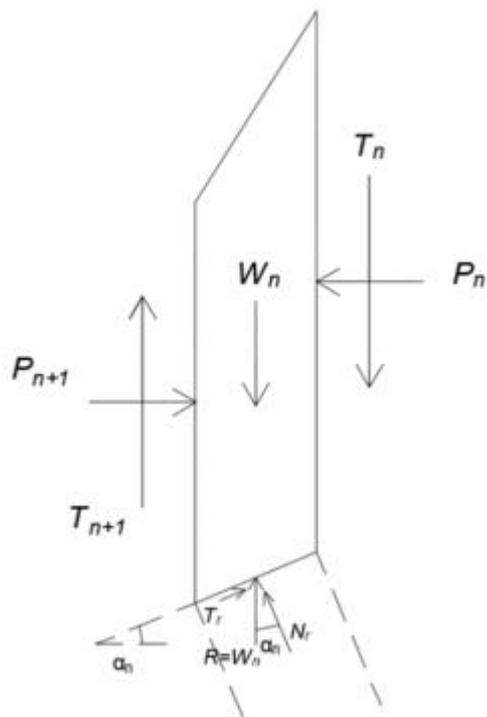


Figura 3.2 - Forças atuantes em uma fatia genérica (Das, 2011)

Onde:

n – Fatia em análise

W_n – Peso da fatia

b_n – Largura da fatia

r – raio da envoltória de ruptura (circular)

α_n – ângulo de atuação da força cisalhante

T_r – Força de cisalhamento tangente à envoltória

N_r – Força normal a envoltória

ΔL_n – Contato entre a fatia a envoltória e o maciço

As demais forças atuantes representam o contato com as fatias adjacentes

A partir do método descrito, surgiram simplificações de modo a solucionar o equacionamento das forças aplicadas nas fatias, o *SLOPE/W* apresenta alguns métodos

simplificados para a resolução das equações de equilíbrio, podem ser citados: Método de Bishop simplificado, Jambu simplificado, Sepencer, Morgenstern-Price, entre outros.

A simplificação feita por Morgenstern & Price será utilizada para o equacionamento das forças e dos momentos para a obtenção do fator de segurança. O método propôs a seguinte equação de correlação entre as forças normais e de cisalhamento:

$$X = E\lambda f(x) \quad (3.1)$$

Onde:

X – Força de cisalhamento pelo contato com fatias adjacentes

E – Força normal pelo contato com fatias adjacentes

f (x) – função utilizada

λ – Porcentagem da função utilizada

A função padrão de força entre fatias adotado na modelagem é a função meio seno, como mostra a Figura 3.3.

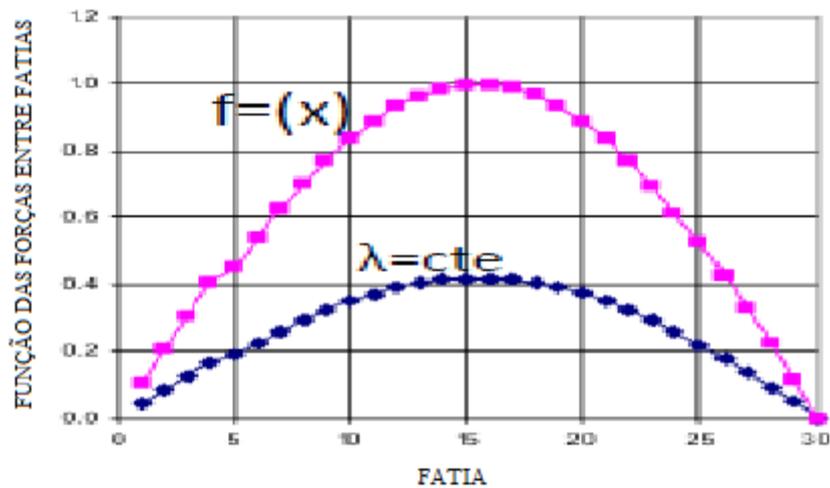


Figura 3.3 - Função meio seno de correlação das forças entre fatias, em f (x) corresponde à função aplicada e λ corresponde ao percentual da função utilizada (Ribeiro, 2016)

A Figura 3.4 apresenta a aplicação das forças em uma fatia genérica.

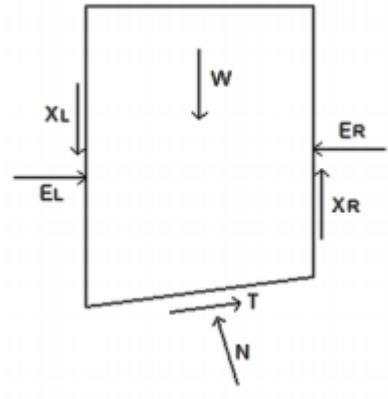


Figura 3.4 – Forças atuantes aplicadas em uma fatia pelo método de Morgenstern-Price (Silva, 2013)

O equilíbrio de momentos é dado pela equação 3.2 e o equilíbrio de forças é dado pela equação 3.3.

$$F_m = \frac{\sum(c' \beta R + N - u \beta) R \tan \phi'}{\sum W_x - \sum N_f \pm \sum D d} \quad (3.2)$$

$$F_f = \frac{\sum(c' \beta \cos \alpha + N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (3.3)$$

$$N = \frac{w + (X_R - X_L) - \frac{(c' \beta \sin \alpha + u \beta \sin \alpha \tan \phi')}{F}}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \tan \phi'}{F}} \quad (3.4)$$

Em que:

F_m – Equilíbrio de momentos

F_f – Equilíbrio de Forças

c' – coesão efetiva

ϕ' - ângulo de atrito efetivo

u – poropressão

Dd – Carregamento

W – Peso da fatia

X_R – Força cisalhante do contato com fatias adjacentes

X_L – Força normal de contato com fatias adjacentes

Os demais parâmetros têm relação com a geometria da fatia analisada

Os parâmetros de entrada necessários para a modelagem serão:

- Peso específico (γ)
- Coeficiente de Poisson (ν)
- Coesão (c')
- Ângulo de atrito (ϕ')

3.2.3 – SIGMA/W

A modelagem de tensão-deformação retorna o comportamento e a magnitude dos recalques das estruturas de contenção de rejeitos a partir de modelos constitutivos, que estabelecem uma relação de comportamento dos materiais. O Sigma possui alguns modelos constitutivos incorporados, na Figura 3.5 é apresentado o modelo linear de comportamento entre tensão (σ) e deformação (ϵ), a Figura 3.6 apresenta o modelo hiperbólico.

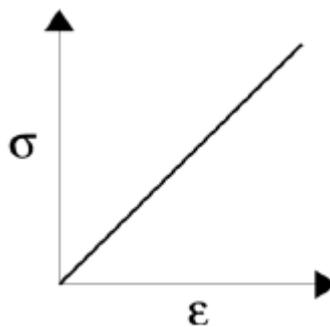


Figura 3.5 - Modelo constitutivo linear, comportamento elástico (Ribeiro, 2016)

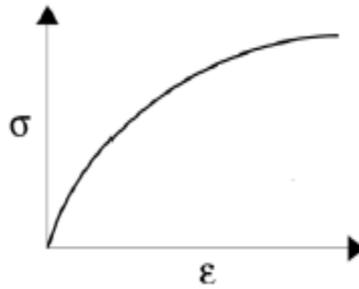


Figura 3.6 - Modelo constitutivo hiperbólico (Ribeiro, 2016)

Os parâmetros de entrada necessários para a simulação irão depender do modelo constitutivo de representação do comportamento relação entre tensão e deformação. O modelo numérico faz uma análise do fator de segurança local, ou seja, faz uma análise da envoltória de ruptura para cada elemento da malha. Resultando em um plano de tensões ortogonais entre si, σ_1 e σ_3 , podendo ser identificados pontos de ruptura em virtude do cisalhamento e da tração.

4 - METODOLOGIA

Com o objetivo de avaliar o comportamento das tecnologias para disposição de rejeitos, serão propostas análises para a disposição do rejeito em polpa e a disposição de rejeito filtrado, com a intenção de avaliar o comportamento das estruturas perante os métodos de falha relacionados às poropressões, à instabilidade de taludes e em função concentração de tensões

O estudo consistirá na escolha de estruturas de disposição, complementação bibliográfica, aquisição dos dados, inserção dos dados obtidos com auxílio do GeoStudio para análise do fluxo de água, da estabilidade de taludes e da tensão-deformação.

4.1 – ESCOLHA DAS SEÇÕES TÍPICAS

Serão avaliadas três estruturas de disposição de rejeitos: Pilha de rejeito filtrado, pilha de rejeito filtrado/lama espessa e disposição compartilhada – Estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado. Serão aferidas as características mineralógicas e geotécnicas dos materiais como:

peso específico, permeabilidade, módulo de elasticidade, coesão, ângulo de atrito, entre outros.

4.2 – MODELAGEM GEOSTUDIO

O GeoStudio possui ferramentas que permitem avaliar o comportamento de estruturas geotécnicas de forma a retornar informações sobre possíveis métodos falha, com a intenção de observar o comportamento de estruturas de contenção de rejeitos com diferentes teores de umidade e com diferentes formas de disposição, a análise computacional permitiu analisar o comportamento da percolação, com o *SEEP/W*; da estabilidade de taludes, com o *SLOPE/W*, e da tensão/deformação, com o *SIGMA/W*.

5 – PARÂMETROS GEOTÉCNICOS

Nas Tabelas 5.1 e 5.2 estão presentes os parâmetros do rejeito arenoso, da lama espessada, do material estéril, da fundação e do dreno. As características dos rejeitos apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 foram obtidas por Boccamino (2017) para os rejeitos de minério de ferro da Mina do Pico, em Minas Gerais, os parâmetros do sistema de drenagem foram apresentados por Ribeiro (2017), cujos dados resultam de valores obtidos para a barragem de Fundão, Minas Gerais.

Tabela 5.1- Parâmetros para análise de permeabilidade. (Boccamino, 2017, Ribeiro, 2017 - adaptado)

Parâmetros	Rejeito filtrado	Rejeito Espessado	Estéril	Fundação	Dreno
Permeabilidade (m/s)	3,15×10-6	3.3×10-6	4.5×10-5	4.5×10-7	0,001
Teor de umidade volumétrico saturado (m³/m³)	0,47	0,47	0,47	0,40	0,40
Teor de umidade volumétrico residual (m³/m³)	0,06	0,06	0,06	-	-
Anisotropia	0,3	0,3	0,3	1	1

Tabela 5.2 - Parâmetros geotécnicos para análise de estabilidade. (Boccamino, 2017, Ribeiro, 2017 - adaptado)

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ADOTADOS				
Material	Peso Específico natural (KN/m ³)	Peso específico saturado (KN/m ³)	Parâmetros de resistência	
			c' (KN/m ²)	φ °
Rejeito arenoso	20	22	0	33
Lama espessada	18	20	0	0
Estéril	20	22	25	32
Fundação	20	22	50	35
Tapete drenante	20	22	0	35

6 – SEÇÕES DE ESTUDO

Foram propostas três geometrias para análise: empilhamento drenado do rejeito filtrado (Figura 6.1), disposição compartilhada rejeito filtrado e rejeito espessado (Figura 6.2) e disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado (Figura 6.3). O dimensionamento da estrutura seguiu o proposto por Boccamino (2017), cujas dimensões estão apresentadas na Tabela 6.1.

O material estéril pode ser utilizado nas estruturas de disposição para aferir maior estabilidade na pilha, uma vez que os rejeitos filtrados apresentam potencial de erodibilidade. De acordo com Boccamino (2017) os estéreis são indicados quando a pilha formada pela disposição dos rejeitos apresentarem $FS < 1,5$, não havendo uma espessura determinada para a camada de estéril, o material deve ser disposto de forma a garantir um $FS > 1,5$.

Tabela 6.1 – Dimensões das estruturas de disposição analisadas.

Altura talude (m)	15
Largura berma (m)	10
Inclinação talude	26.6°
Inclinação pilha	22°
Nº bancos	13

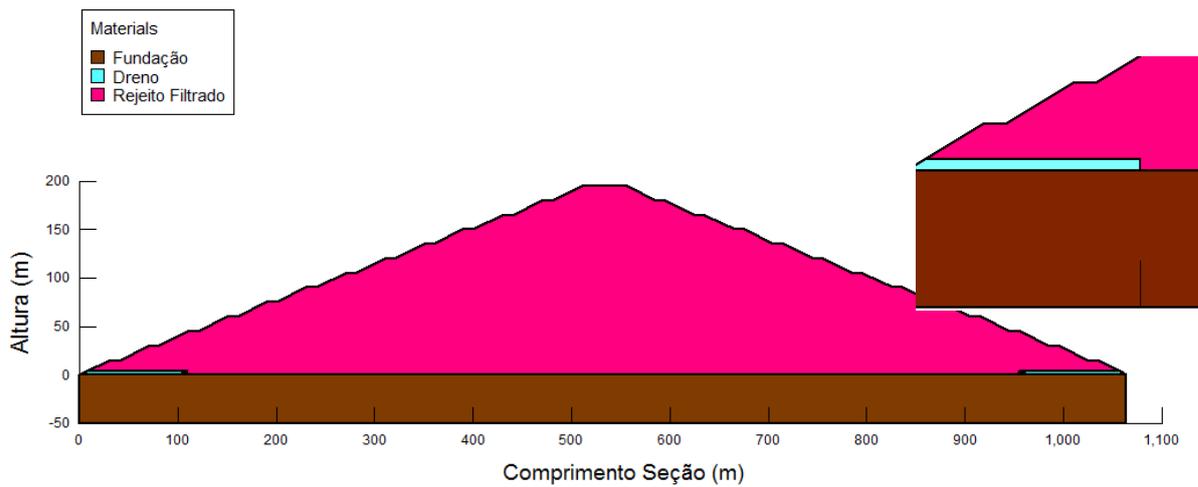


Figura 6.1 – Geometria de disposição de rejeito filtrado.

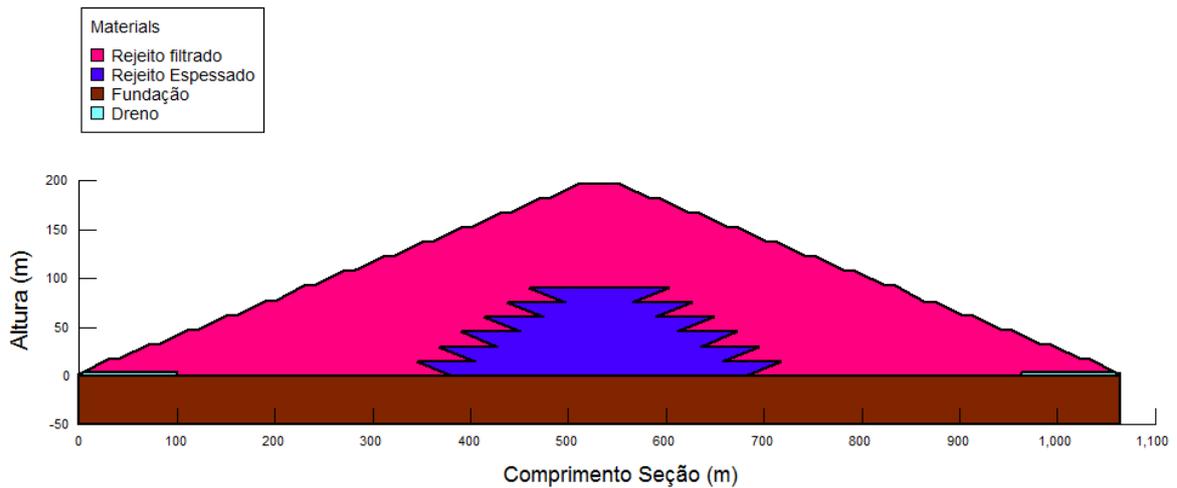


Figura 6.2 – Geometria de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado.

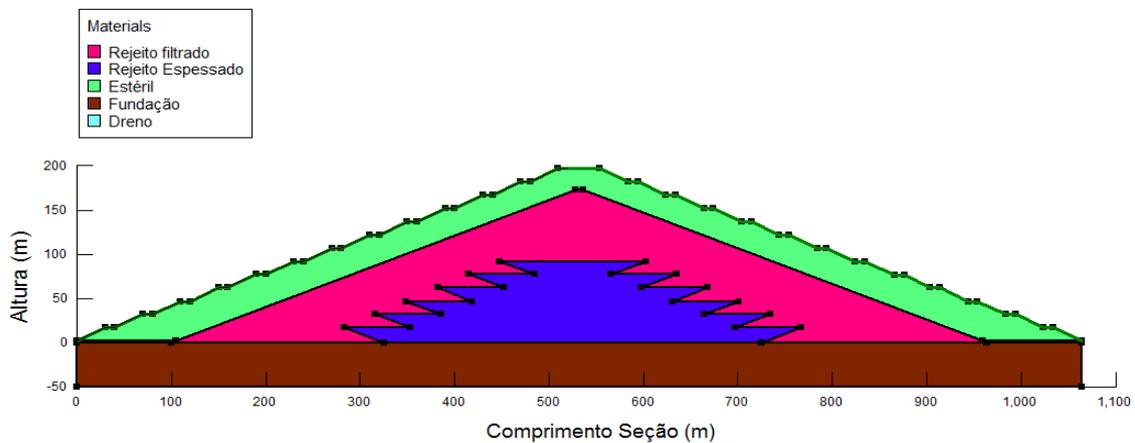


Figura 6.3 – Geometria de disposição compartilhada – Estéril, rejeito filtrado e lama espessada.

7 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 – DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO

Para a análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado, a linha freática foi elevada hipoteticamente até a cota de 110 m, sendo considerada uma condição crítica para a estabilidade da pilha. As análises foram realizadas para as condições de fluxo livre e com elevação da linha freática, as Figuras 7.1 e 7.2 apresentam os resultados do fluxo para as duas condições simuladas pelo SEEP/W e nas Figuras 7.3 e 7.4 estão presentes os resultados das análises de estabilidade pelo SLOPE/W.

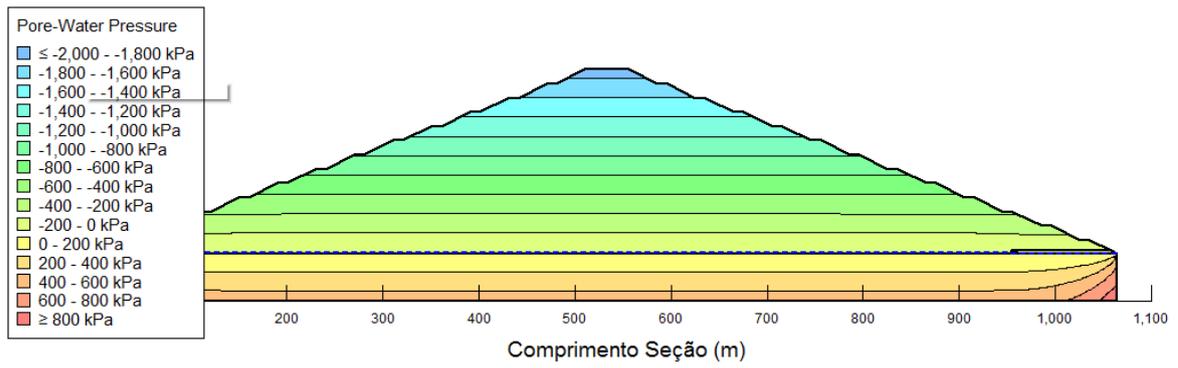


Figura 7.1 – Análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado.

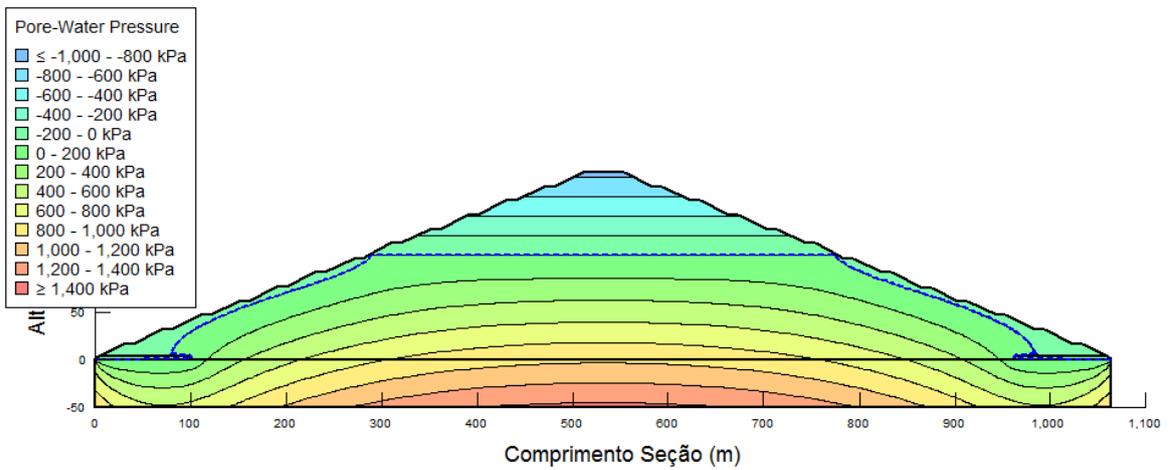


Figura 7.2 - Análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado com elevação de 110 na linha freática.

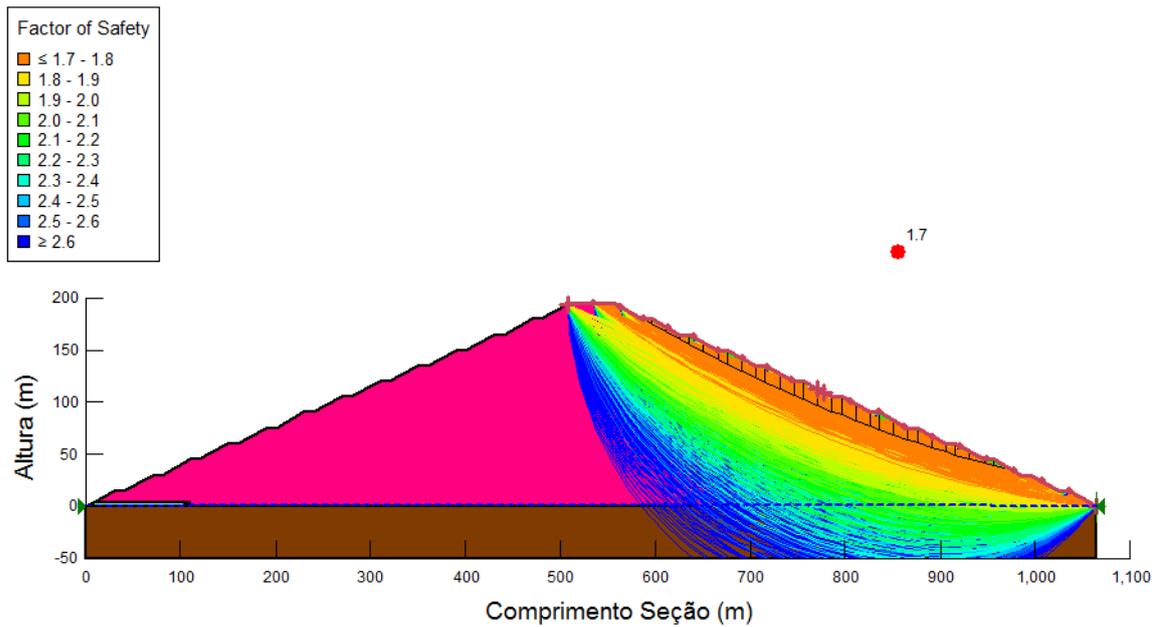


Figura 7.3 – Análise de estabilidade para a geometria de disposição e rejeito filtrado

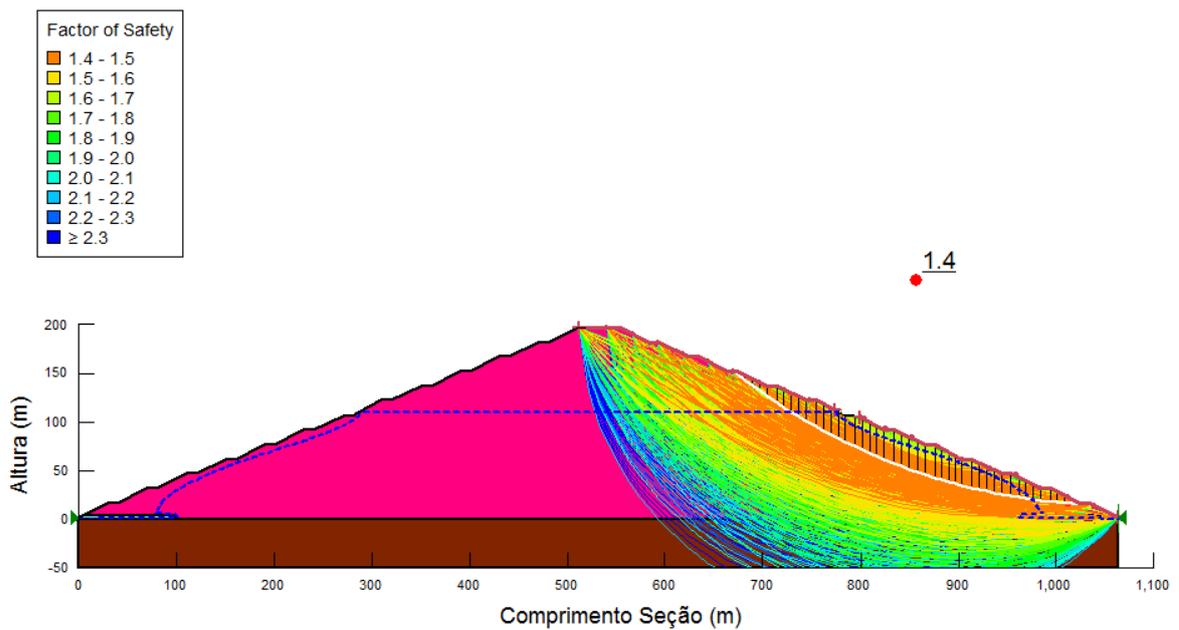


Figura 7.4 - Análise de estabilidade para a geometria de disposição e rejeito filtrado com elevação de 110 m no nível freático.

Com base nos resultados de percolação no interior da pilha em condições de fluxo livre e com elevação de 110 m, Figuras 7.1 e 7.2, nota-se um acréscimo nas poropressões para a condição prejudicada de fluxo. A análise de percolação é uma ferramenta importante para o dimensionamento do sistema de drenagem da geometria, sendo necessários estudos

hidrológicos e um projeto em escala piloto para definir o comportamento real do fluxo no interior da pilha.

Quanto à estabilidade, conforme o nível freático foi elevado para 110 m, o Fator de Segurança reduziu de 1,7 (Figura 7.3) para 1,4 (Figura 7.4), indicando um comportamento instável da geometria para condições críticas de elevação do nível d'água. Para aumentar a segurança da geometria proposta, poderia ser utilizada uma camada de estéril para proteção do talude, para aferir melhores condições para estabilidade. Destaca-se que os taludes devem ser protegidos contra ação do vento, contra ação de máquinas ou quaisquer fatores que possam gerar desgaste, podendo ser protegido com enrocamento ou com vegetação conforme as camadas forem sendo finalizadas.

Ressalta-se que as dimensões da geometria, como altura das camadas e largura das bermas, poderiam ser modificadas para aferir maior estabilidade, garantindo maior segurança perante às condições prejudicadas de fluxo.

7.2 – DISPOSIÇÃO DE REJEITO FILTRADO E LAMA ESPESADA

Para a análise de percolação, a linha freática foi elevada hipoteticamente até o nível 110 m, simulando uma situação crítica para a estabilidade da pilha, as Figuras 7.5 e 7.6 apresentam a linha freática e as poropressões nas condições sem elevação do nível d'água e com elevação, respectivamente. A partir das condições de percolação no interior da geometria proposta, foram realizadas análises de estabilidade, cujos resultados estão presentes nas Figuras 7.7 e 7.8.

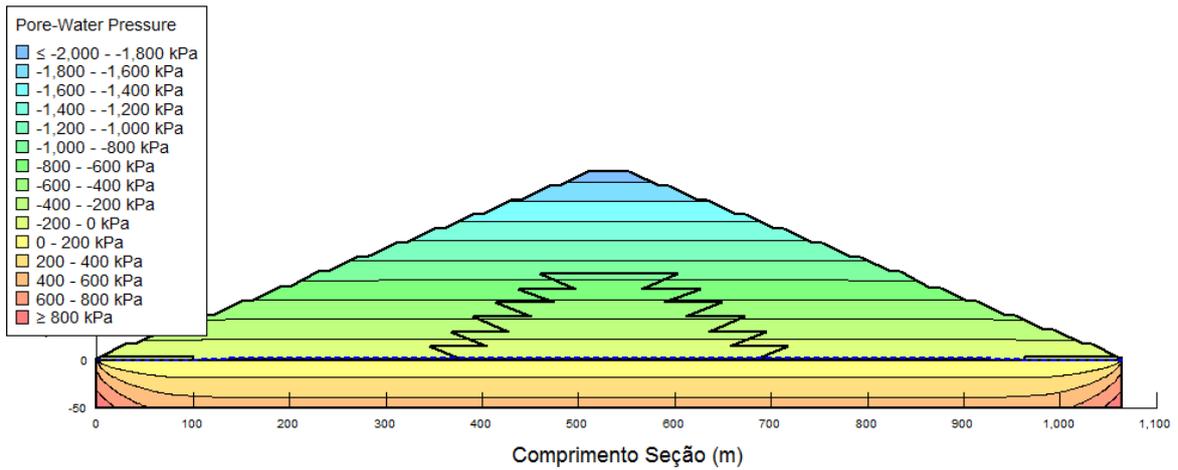


Figura 7.5 – Resultados da análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado.

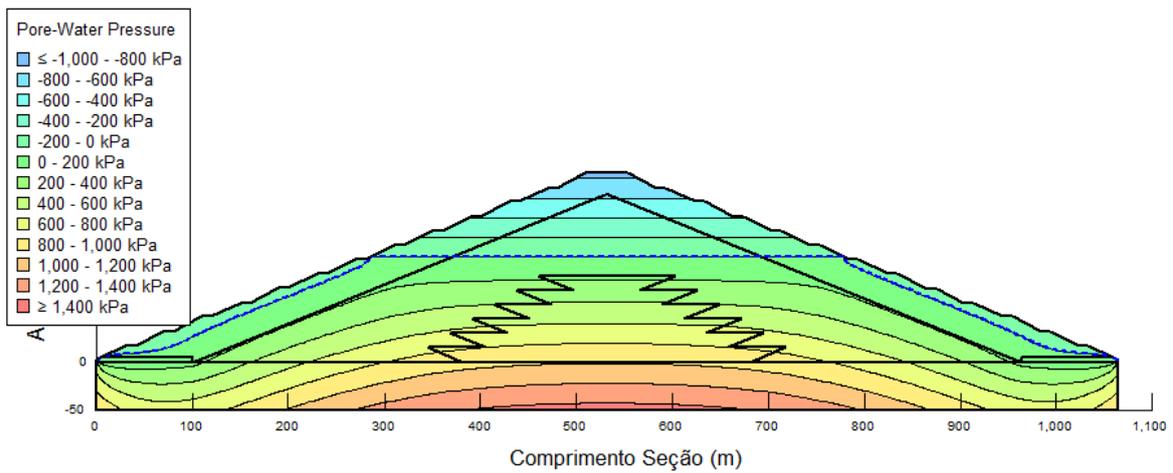


Figura 7.6 – Resultados da análise de percolação no interior da pilha de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado com elevação de 110 do nível freático.

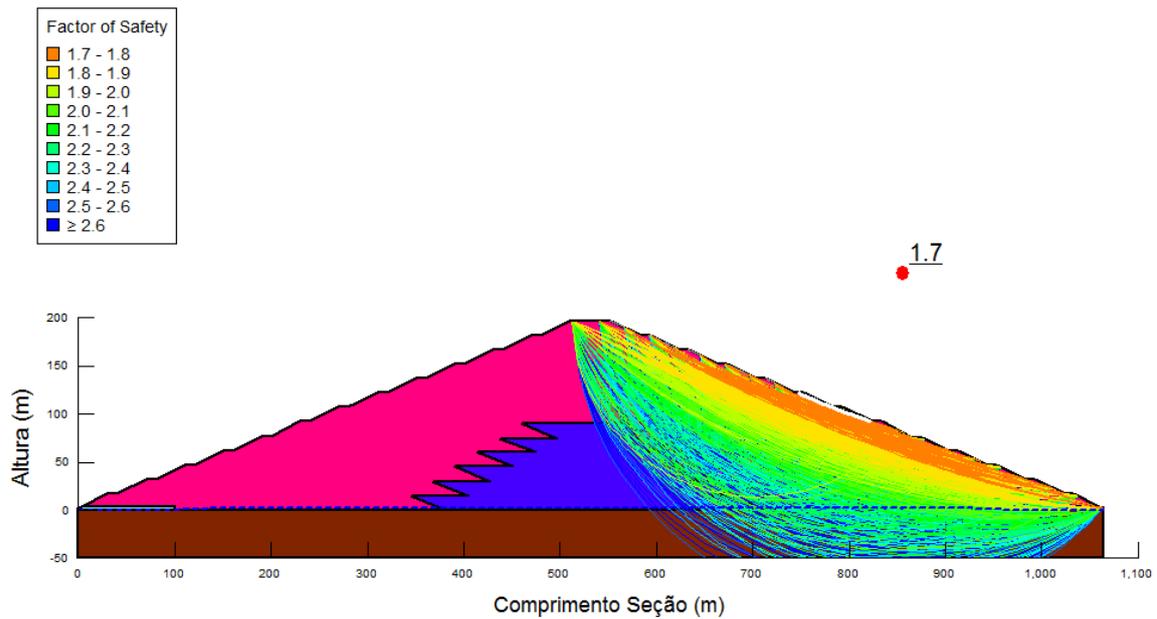


Figura 7.7 – Resultado da análise de estabilidade na pilha de rejeito filtrado e rejeito espessado.

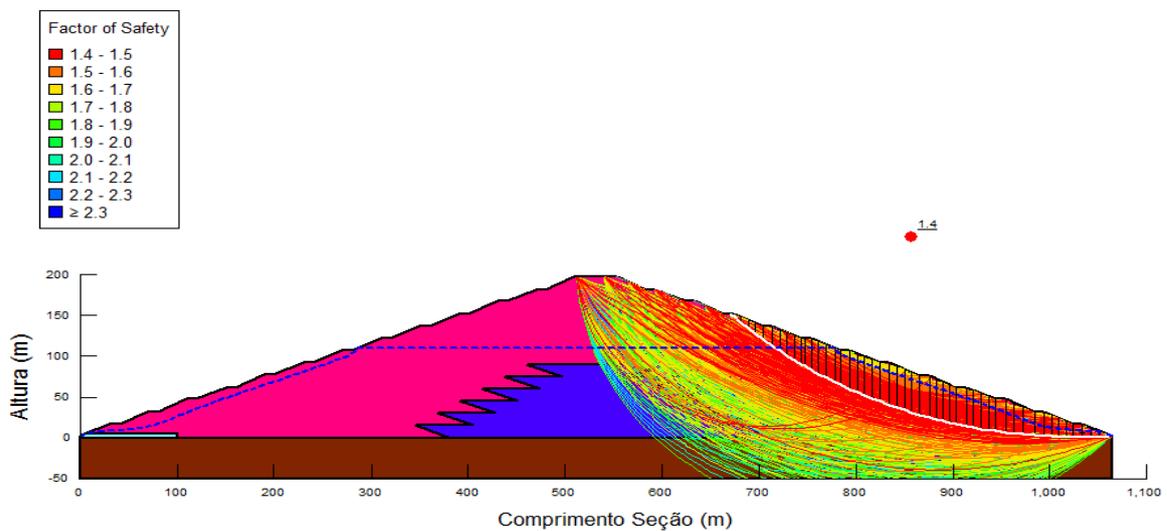


Figura 7.8 – Resultado da estabilidade na pilha de disposição de rejeito espessado e rejeito filtrado com elevação de 110 no nível freático.

Com base nas análises de estabilidade, destaca-se que com a elevação do nível freático a pilha de disposição de rejeito filtrado e rejeito espessado apresentou uma redução no fator de segurança de 1,7 (Figura 7.7) para 1,4 (Figura 7.8), indicando que para este caso a

geometria não seria aplicada, devendo acrescentar o material estéril para aferir maior segurança à estrutura.

De acordo com a Figura 7.7, o círculo crítico está localizado na extremidade da pilha, indicando uma instabilidade local no talude, um dos fatores de instabilidade e erosões nos taludes de pilhas de rejeito filtrado é a ausência ou ineficiência do sistema de proteção - que pode ser feito com enrocamento, com vegetação, entre outras medidas -, para as análises não foram consideradas camadas de proteção nos talutes da pilha.

7.3 – DISPOSIÇÃO COMPARTILHADA – ESTÉRIL, REJEITO FILTRADO E REJEITO ESPESSADO

Para a geometria de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado, foram efetuadas análises para as condições sem elevação e com elevação de 110 m da linha freática no interior da pilha. As análises de percolação estão apresentadas nas Figuras 7.9 e 7.10, os resultados das tensões efetivas estão apresentadas nas Figuras 7.11 - 7.14 e as análises de estabilidades nas Figuras 7.15 e 7.16.

Com base nas análises das Figuras 7.9 e 7.10 é possível identificar um aumento das poropressões no interior da pilha com a elevação do nível de água, destaca-se que o aumento de 110 m no nível de água foi hipotético, é importante frisar que em projetos de disposição compartilhada o dimensionamento da geometria é efetuado de acordo com as precipitações locais e com a avaliação prévia do comportamento geomecânico a partir de estruturas em escala piloto.

De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 7.11 a 7.14., ressalta-se que há no centro da pilha predominância de tensões de compressão e na parte inferior externa há forças de tração. Os deslocamentos devem ser avaliados no período construtivo da pilha e que a partir do conhecimento das tensões podem ser calibrados os valores para monitoramento do sistema, que pode ser feito a partir da instalação de medidores de deslocamento e demais ferramentas utilizadas para aferir o comportamento da estrutura de disposição de rejeitos desaguados.

Quanto à estabilidade, com elevação do nível d'água a estrutura apresentou o $FS = 1,5$, Figura 7.16, houve uma redução quando comparado com o fluxo livre, Figura 7.15, cujo FS foi 1,8. O controle do fluxo no interior da pilha deve ser controlado e monitorado a partir de um projeto de auscultação da estrutura, podendo ser estabelecidos limites de normalidade, alerta e emergência para o sistema de empilhamento drenado, esses limites devem ser preconizados por normas e devem ser fiscalizados por entidades governamentais, bem como as dimensões e os fatores de segurança e demais parâmetros de dimensionamento devem seguir norma técnica específica.

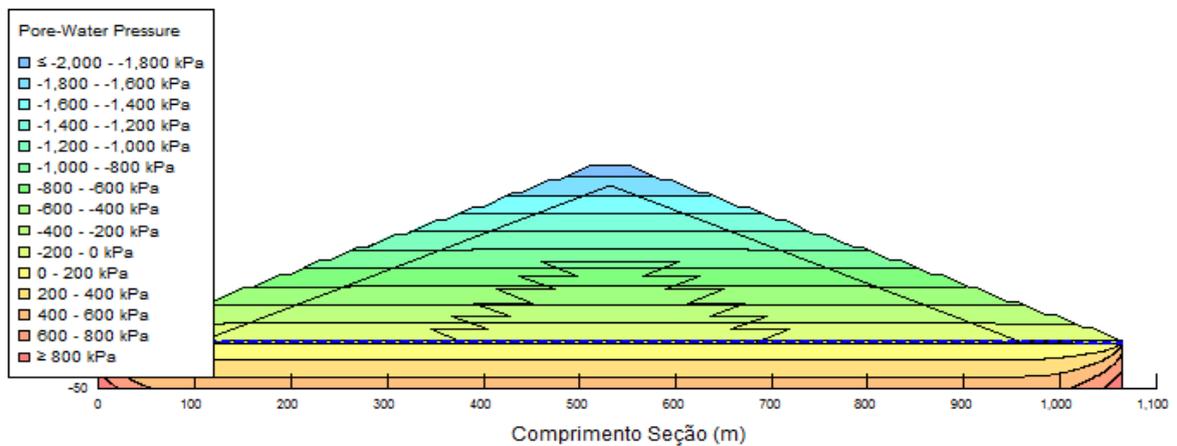


Figura 7.9 – Análise de percolação na geometria de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

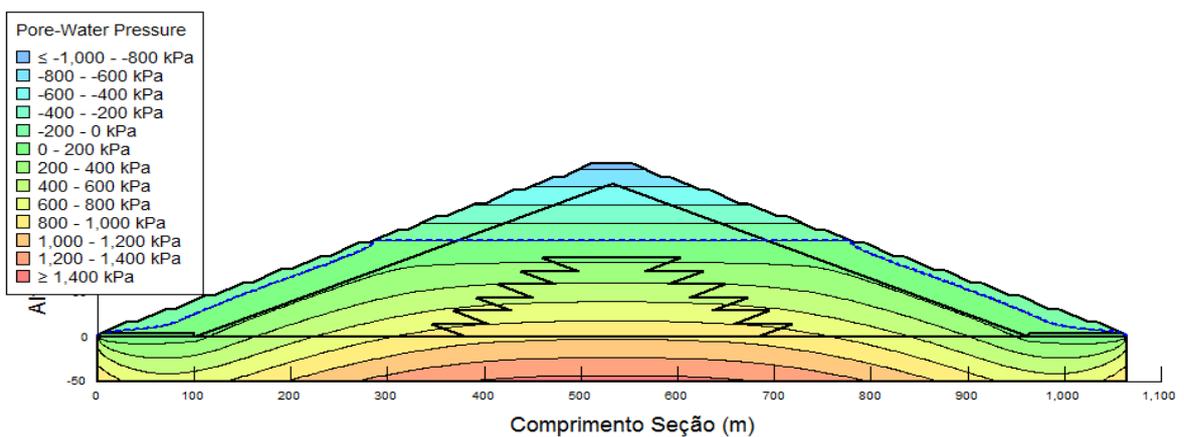


Figura 7.10 – Análise de percolação com elevação da linha freática para 110 m na geometria de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

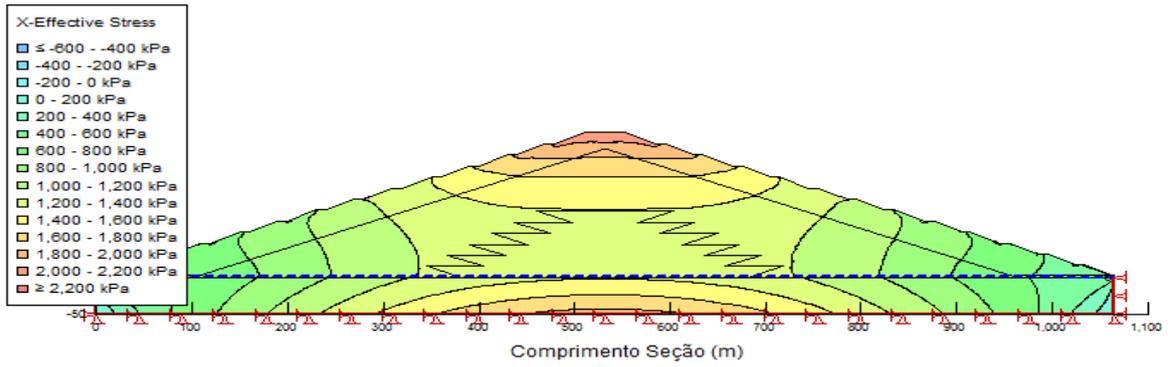


Figura 7.11 – Tensões efetivas na direção x no interior da pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

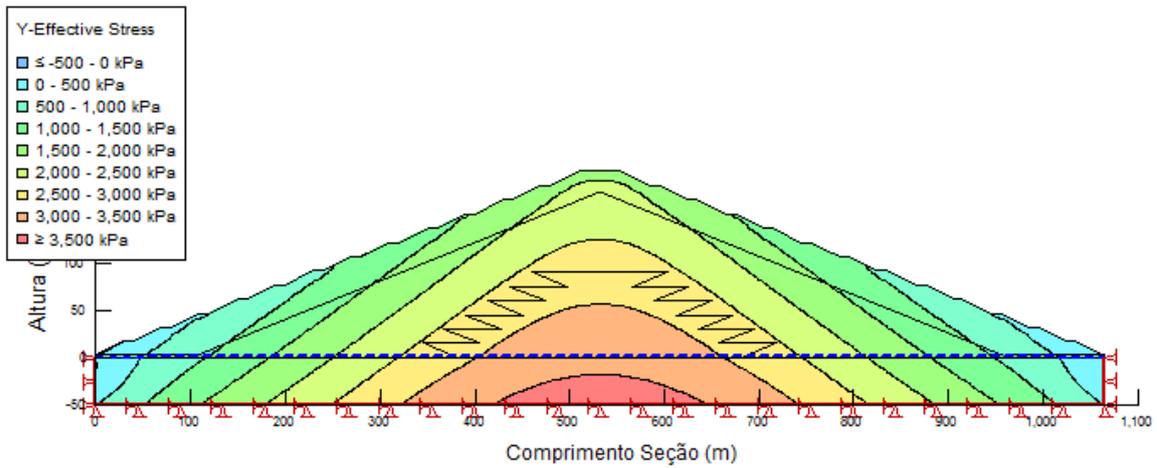


Figura 7.12 – Tensões efetivas na direção y no interior da pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

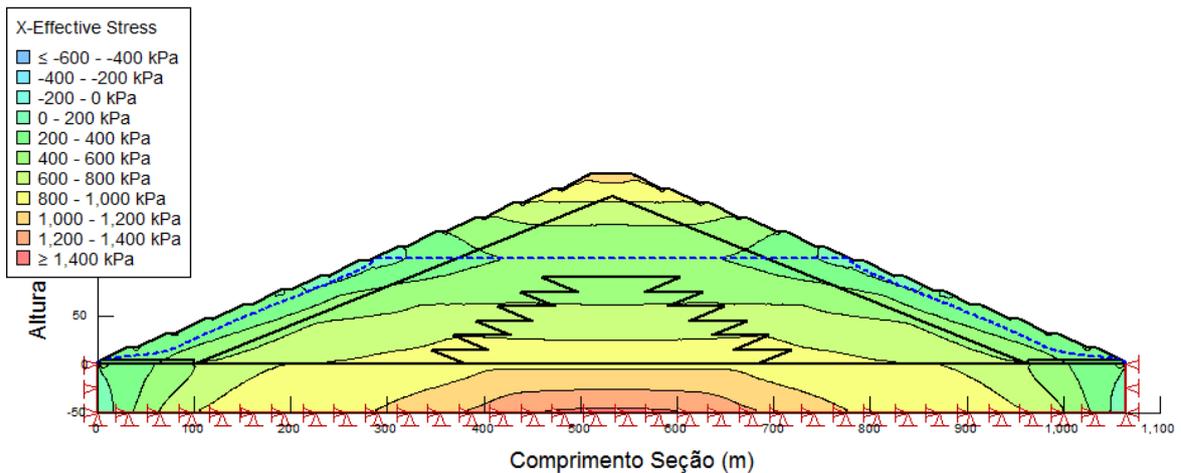


Figura 7.13 – Tensões efetivas na direção x no interior da pilha de disposição compartilhada com elevação de 110 m no nível d'água – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

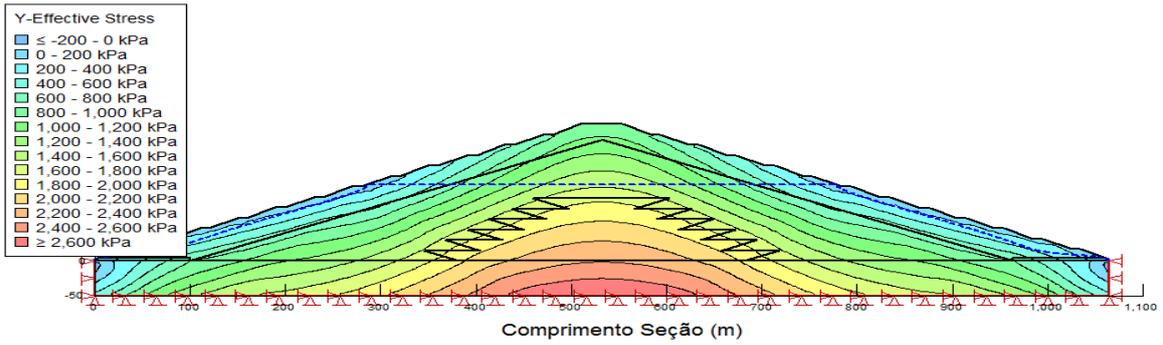


Figura 7.14 – Tensões efetivas na direção y no interior da pilha de disposição compartilhada com elevação de 110 m no nível d'água – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

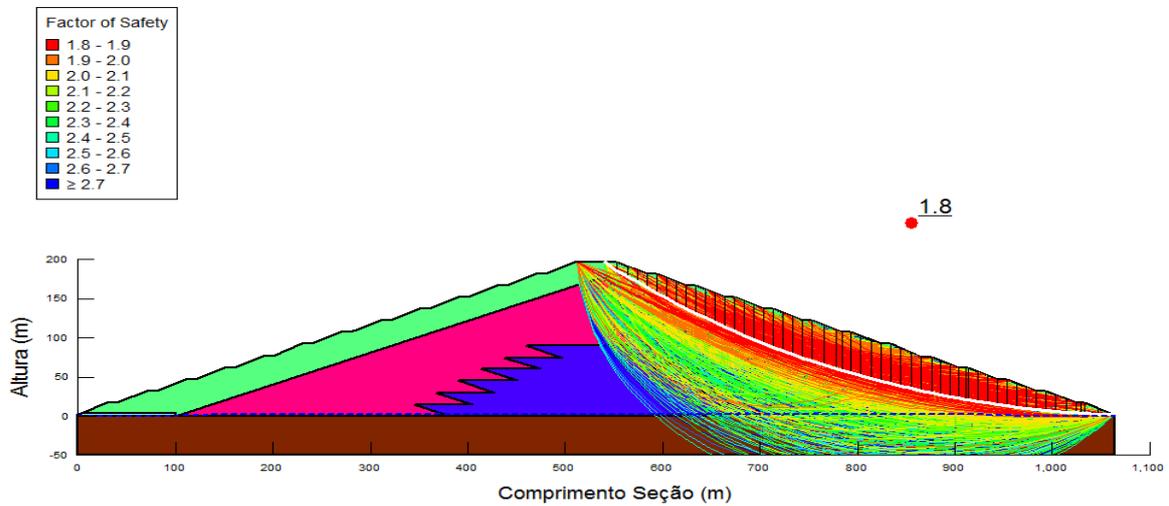


Figura 7.15 – Resultado da análise de estabilidade na pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado.

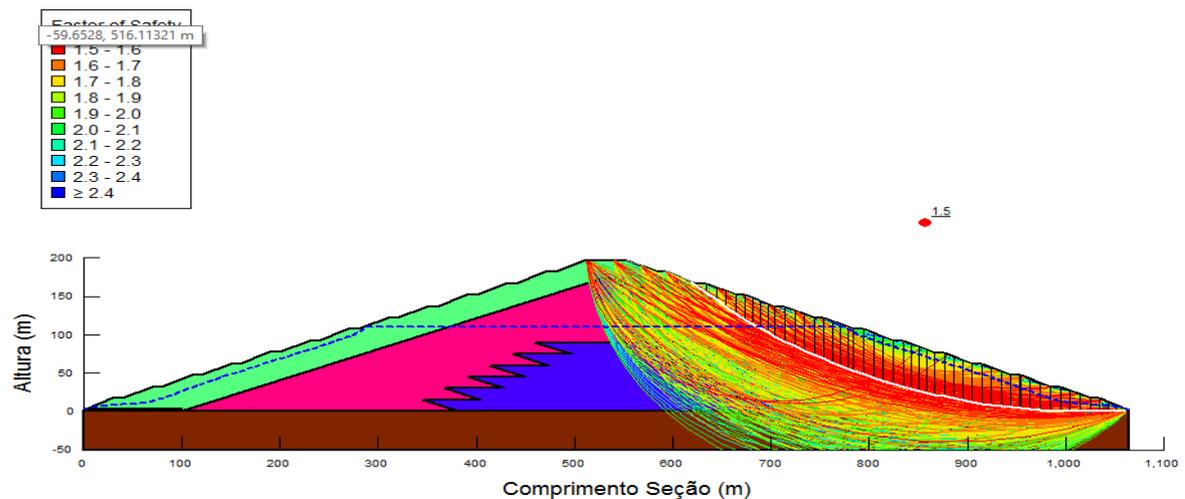


Figura 7.16 – Resultado da análise de estabilidade na pilha de disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado, com elevação de 110 m no nível freático.

8 – CONCLUSÕES

O presente trabalho estudou estruturas e situações hipotéticas para a disposição de rejeitos desaguados; os resultados, contudo, mostraram um bom desempenho de todas as estruturas simuladas para as condições de fluxo livre. O comportamento das geometrias de disposição de rejeitos perante a ação da água é um fator limitante para a estabilidade e para o desempenho eficiente em qualquer sistema de disposição de rejeitos; o gerenciamento da água, todavia, deve ser avaliado em estudos hidrológicos e em escala piloto, de forma a garantir um sistema eficiente de drenagem interna e coleta de águas pluviais em pilhas de disposição de rejeitos desaguados.

As geometrias propostas para o estudo apresentaram significativa redução do FS, Tabela 8.1, para condições de elevação do fluxo de água, ressaltando que o material estéril aplicado nas faces dos taludes na disposição compartilhada – estéril, rejeito filtrado e rejeito espessado – aferiu maior segurança, pelo estéril apresentar maior coesão e melhor comportamento geomecânico, podendo ser uma alternativa a ser implementada em empilhamento de rejeitos desaguados.

Tabela 8.1 – Resultados dos fatores de segurança para as geometrias e condições aplicadas de fluxo.

GEOMETRIA	FS	
	Condição drenada	Elevação da freática
Rejeito filtrado	1,7	1,4
Rejeito filtrado- rejeito espessado	1,7	1,4
Disposição compartilhada	1,8	1,5

Apesar da maior segurança ocasionada pelo desaguamento de rejeitos, o aspecto econômico ainda é limitante para a realidade do Brasil, uma vez que a abundância em recursos hídricos e as condições climáticas são condições que favorecem a utilização de técnicas de disposição de rejeitos com elevados teores de água em estruturas de contenção. Entretanto, destaca-se a necessidade de minimizar os impactos relacionados às atividades de extração mineral, para

tanto a recirculação de água com o processo de desaguamento de rejeitos deve ser considerada mesmo em locais onde os recursos hídricos não sejam fator limitante. Novas tecnologias devem ser implementadas e estudadas para promover o melhor desempenho, conciliando o meio ambiente, o meio social e os aspectos econômicos, garantindo um sistema de disposição de rejeitos mais eficiente, colaborando para a redução dos impactos gerados pelo processo extrativo.

Há necessidade de desenvolver normas e regulamentação aplicadas aos sistemas de disposição de rejeitos desaguados, como normas técnicas projeto, critérios para fiscalização e cadastramento das estruturas, entre outras diretrizes governamentais, visto que no presente momento o Brasil não possui legislação específica aplicada ao empilhamento drenado de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrão, G.S. (1999). *Permeabilidade e Percolação em Barragens Alteadas com Rejeitos*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 41p.
- Assembleia Legislativa de Minas Gerais. Decreto 46.993 de 02 de maio de 2016. Disponível em: < www.almg.gov.br>. Acesso em: novembro de 2017.
- Assis, A.P. (2003). *Apostila de Barragens*. Universidade de Brasília, Brasília, 180p.
- Albuquerque Filho, L.H. (2004). *Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 215p.
- Ávila, J.P. (2011). “*The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass.*” Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, 11p.
- Barrera, S., Cacciuttolo, C. & Caldwell, J. (2015). “*Reassessment of best available tailings management practices.*” Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, 18p.
- Boccamino, G.D. (2017). *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 itabiríticos (ITM-I) em operação na mina do Pico*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 110p.
- Boscov, M.E.G. (2012). *Geotecnia Ambiental*. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 248p.
- Carneiro, S.R.C. (2017). Notas de aula: Instrumentação geotécnica e monitoramento tecnológico. GeoFast Geotechnical Modelling, Belo Horizonte, 105p.
- Carneiro, A. & Fourie, A.B. (2018). “*A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia*”. Paste 2018. Western, Austrália.
- Casa Civil, Presidência da República. Lei 12.334 de 20 de setembro de 2010. Disponível em: < <http://www.planalto.gov.br>>. Acesso em: novembro de 2017.
- Castro, L.V.P. (2008). *Avaliação do Comportamento do Nível D'água em barragem de Contenção de Rejeito Alteada a Montante*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Departamento de engenharia de Minas e de Petróleo, São Paulo, SP, 103p.
- Cavalcante, A.L.B. (2000). *Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade de Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante*. Dissertação de Mestrado Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 190p.
- Cavalcante, A.L.B. (2004). *Modelagem e Simulação do Transporte por Arraste de Sedimentos Heterogêneos Acoplado ao Mecanismo de Tensão-Deformação-*

- Poropressão Aplicado a Barragens de Rejeitos*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 313p.
- CBDB. Comitê Brasileiro de Barragens. “*A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI*”: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011, 524p.
- Das, B.M. (2011). *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. Cengage Learning, São Paulo, 610p.
- Davies, M.P. (2011). *Filtered dry stacked tailings: the fundamentals*. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC.
- Davies, M., Lupo, J., Martin, T., McRoberts, E., Musse, M. & Ritchie, D. (2010). “*Deewatered Tailings Practice – Trends and Observations*”. Proceedings of Tailings and Mine Waste, Balkema.
- Espósito, T.J. (2000). *Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de engenharia Civil e ambiental, Brasília, DF, 394p.
- European Commission (2009). Reference Document on Best Available Techniques for Management of tailings and waste-rock in mining activities.
- Figueiredo, M.M. (2007). *Estudo de Metodologias Alternativas de disposição de Rejeitos para a Mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 147 p.
- Guimarães, N.C. (2011). *Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 129p.
- IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração*. Brasília, 2016, 128p.
- IBRAM. Instituto Brasileiro de Mineração. *Relatório Anual de Atividades*. 2017
- ICOLD (2001). International Commission on Large Dams. “*Tailings Dams Risk of Dangerous Occurrences*”: Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121, Paris, 144p.
- Kaswalder, F., Cavalli, D., Hawkey, A. & Paglianti, A. (2018) *Tailings dewatering by pressure filtration: process optimisation and design criteria*. Paste 2018, Western, Austrália.
- Lozano, F.A.E. (2006). *Seleção de Locais para barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, SP, 115p.
- MAC. The Mining association of Canada. Ed. 3, Canadá, 2017.

- Mendoza, P.P. (2005). *Análise numérica do fluxo e da estabilidade de uma pilha de lixiviação de minério de cobre*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 129 p.
- Ministério de Minas e Energia. DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria Nº 416 de 03 de setembro de 2012. Revogada
- Ministério de Minas e Energia. DNPM. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria Nº 70.389 de 17 de maio de 2017.
- Morgenstern, N.R; vick, S.G., & Watts, B.D. (2016). *Fundão Tailings Dam Review Panel. Final Report*, 88p.
- Pinto, C.S. (2011). *Curso Básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos, São Paulo, 363p.
- Portes, A.M.C. (2013). *Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, MG, 180p.
- Ribeiro, L.F.M. (2000). *Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a barragens de Rejeito*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e ambiental, Brasília, DF, 235p.
- Ribeiro, S.G.S. (2016). *Notas de Aula: Técnicas e artifícios de modelagens numérica – sistema GeoStudio*. Belo Horizonte, 228p.
- Ribeiro, S.G.S. (2017). *Notas de Aula: Ruptura de Barragens por Liquefação*. Belo Horizonte, 118p.
- Rezende, V.A. (2013). *Estudo do comportamento de barragem de rejeito arenoso alteada por montante*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 153p.
- Saliba, F.P.M. (2007). *Avaliação Hidrogeotécnica da fundação da pilha de estéril nº da Mina de Andrade – Bela Vista de Minas*. Dissertação de Mestrado, Program de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 224p.
- Silva, K.K.A. (2014). *Co-disposição e Disposição de Rejeitos e Estéreis em Cava Exaurida*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto, MG, 158p.
- Silva, M.J.F. (2013). *Análise de Estabilidade de Taludes pelo Método de Equilíbrio Limite Geral*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, Portugal, 87p.
- Silva, J.P.S. (2016). *Viabilidade técnica da disposição compartilhada de rejeito filtrado e estéril em pilhas no Quadrilátero Ferrífero*. Seminário em Geotecnia 1, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 21p.
- Wise Uranium Project (2017). *World Information Service on Energy. Chronology of major tailings dam failures*. Disponível em: < <http://www.wise-uranium.org>>. Acesso: novembro 2017.