



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**CURSO DE MESTRADO EM GEOTECNIA E TRANSPORTES**

**AVALIAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE  
FERRO NAS CONSISTÊNCIAS POLPA E TORTA**

**ANDRÉA MÍRIAN COSTA PORTES**

Belo Horizonte, 15 de Julho de 2013

Andréa Mírian Costa Portes

# **AVALIAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO NAS CONSISTÊNCIAS POLPA E TORTA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes da Universidade Federal de Minas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geotecnia e Transportes.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador(a): Terezinha de Jesus Espósito Barbosa

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2013

P849a

Portes, Andréa Mírian Costa.

Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta [manuscrito] / Andréa Mírian Costa Portes. – 2013.

xix, 154 f., enc.: il.

Orientadora: Terezinha de Jesus Espósito Barbosa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.151-154.

Bibliografia: f. 140-150.

1. Engenharia de transportes – Teses. 2. Geotecnia – Teses.  
3. Indicadores – Teses. I. Espósito, Terezinha de Jesus. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 624.13(43)



## ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA ANDRÉA MÍRIAN COSTA PORTES

Realizou-se, no dia 15 de julho de 2013, às 09:00 horas, Escola de Engenharia - UFMG - Campus Pampulha - sala 3502 bloco1, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 23ª defesa de dissertação, intitulada *AVALIAÇÃO DA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO NAS CONSISTÊNCIAS POLPA E TORTA*, apresentada por ANDRÉA MÍRIAN COSTA PORTES, graduada no curso de ENGENHARIA CIVIL, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em GEOTECNIA E TRANSPORTES, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Terezinha de Jesus Esposito Barbosa - Orientador (UFMG), Prof(a). George Eduardo Sales Valadão (UFMG), Prof(a). Lucio Flavio de Souza Villar (UFMG), Prof(a). Paulo Ricardo Behrens da Franca (VOGBR).

A Comissão considerou a dissertação:

- Aprovada  
 Aprovada condicionalmente, sujeita a alterações, conforme folha de modificações, anexa  
 Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.  
Belo Horizonte, 15 de julho de 2013.

Katia Aparecida de Souza - Secretário(a)

Prof(a). Terezinha de Jesus Esposito Barbosa  
Doutora - UnB

Prof(a). George Eduardo Sales Valadão  
Doutor - UFMG

Prof(a). Lucio Flavio de Souza Villar  
Doutor - PUC-Rio

Prof(a). Paulo Ricardo Behrens da Franca  
Mestre - Queen's University - Canada

*Katia Aparecida de Souza*  
*Terezinha de Jesus Esposito Barbosa*

*George Eduardo Sales Valadão*

*Lucio Flavio de Souza Villar*

*Paulo Ricardo Behrens da Franca*



## DEDICATÓRIA

*Dedico esse trabalho aos meus pais, irmãos e familiares que apoiaram essa caminhada. Ao meu avô paterno (in memoriam), que sempre incentivou meus estudos.*

*Também dedico esse trabalho à Nylla Magalhães Mendes, pelo apoio durante todo o tempo e, inclusive, pela cobrança de resultados.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e permitir a realização de mais um grande sonho.

Aos meus pais, irmãos (Dedé e Delsim) e irmã mais linda do mundo (Lilica Rapolica), por propiciarem o que há de mais fundamental na vida: amor, carinho, presença constante, apoio, entendimento e uma base consolidada. E principalmente, por entenderem meus momentos de ausência durante a realização desse trabalho.

A todos os meus familiares, amigos e amigas, por propiciarem momentos únicos em minha vida e por torcerem pelos meus propósitos. Pelas cobranças de andamento e cumprimento de um cronograma tantas vezes modificado, pelo apoio e pela imensurável contribuição ao longo de todo esse tempo, agradeço à Nylla Magalhães Mendes.

À minha orientadora, Terezinha Espósito, por acreditar em mim e por conceder gentilmente sua amizade, conhecimento e profissionalismo, imprescindíveis não somente para o êxito desse trabalho, mas para minha carreira profissional e amadurecimento pessoal.

À Professora Judy Mantilla, por despertar em mim o interesse pela Geotecnia e por permitir o início da minha carreira no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFMG. Pela presença constante, mesmo em momentos muito difíceis em minha vida, pelas brincadeiras, pela amizade e ensinamentos.

A todos os professores do DETG, pela convivência, pelos ensinamentos e pelo respeito. Com certeza, posso dizer que passar um tempo da minha vida com esses fantásticos profissionais foi um grande aprendizado pessoal e profissional.

Aos colegas e amigos da Geomec Engenheiros Consultores, pelos ensinamentos aprendidos, os quais eu vou levar ao longo de minha vida. Aos colegas e amigos da AECOM, mesmo apesar do curto período em que convivemos juntos, agradeço pela amizade e confiança. Aos colegas e amigos da VOGBR, pelos ensinamentos, pela confiança e pelo apoio fundamental nesse trabalho. Em especial, à VOGBR, por disponibilizar os *softwares* necessários para a elaboração dos desenhos e das análises de estabilidade aqui presentes.

Aos amigos da Golder Peru, pela recepção, carinho e conhecimentos transmitidos. Agradeço à engenheira Marivalda e Silva Marques, pelos momentos incríveis numa das melhores experiências da minha vida. Ao engenheiro José Luiz Lara, pelo conhecimento transmitido. A todos os engenheiros geotécnicos, engenheiros de processo, geólogos e projetistas peruanos os quais tive o prazer de conhecer, pela amizade, carinho, confiança e pelas valiosas contribuições técnicas presentes nesse trabalho.

Agradeço ao Humberto Soares e ao Mateus Sabadini pelo fundamental apoio no desenvolvimento dos desenhos de projeto dessa dissertação. Ao Mateus Sabadini, também pelo auxílio nas análises de estabilidade.

Ao engenheiro José Mário Mafra, pelos ensinamentos, pela humildade, por acreditar em mim e por ter enriquecido esse trabalho com suas contribuições técnicas. Ao engenheiro Sidney Barradas, por ter me introduzido à área da mineração, pelos ensinamentos, pela confiança, amizade e desafios propostos. Ao engenheiro Aureliano Alves, pela amizade, confiança e exemplo de profissionalismo e conduta.

Aos docentes e discentes da Faculdade Pitágoras, onde tenho o enorme prazer de lecionar.

*"Jamais uma grande descoberta foi feita sem um palpite ousado"*

Isaac Newton

*"Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos por uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho."*

Dalai Lama.

# SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	VIII
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	XVI
RESUMO.....	XVIII
ABSTRACT.....	XIX
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 O minério de ferro.....	4
2.2 Reservas brasileiras de formação ferrífera.....	6
2.3 O beneficiamento do minério de ferro.....	7
2.4 Rejeito de minério de ferro.....	8
2.5 Métodos de disposição de rejeitos a céu aberto.....	11
2.5.1 Aterro Hidráulico.....	12
2.5.2 Empilhamento Drenado.....	15
2.5.3 Disposição em cava.....	16
2.5.4 Codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis.....	17
2.5.5 Disposição subaérea.....	19
2.5.6 Rejeitos Espessados.....	19

2.6	Rejeitos filtrados.....	34
2.6.1	Tipos de Filtros.....	38
2.6.2	Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero .....	41
2.6.3	Aspectos Construtivos e Estado da Prática .....	47
2.6.4	Descomissionamento e Recuperação da Área.....	50
2.7	Comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro .....	51
2.8	Gerenciamento de risco na disposição de rejeitos.....	64
3	METODOLOGIA .....	73
3.1	Revisão bibliográfica.....	73
3.2	Elaboração dos cenários de disposição dos rejeitos filtrados, em forma de polpa e ciclizados.....	74
3.3	Análises de estabilidade física determinísticas e probabilísticas .....	76
3.4	Análises de risco.....	79
4	ANÁLISES E RESULTADOS .....	84
4.1	Cenários de disposição dos rejeitos filtrados e em forma de polpa.....	84
4.2	Análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas .....	86
4.3	Análise de risco .....	96
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	124
5.1	Cenários de disposição dos rejeitos filtrados e em forma de polpa.....	124
5.2	Análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas .....	126
5.3	Análise de risco .....	130
5.4	Condicionantes de projeto para uma pilha de rejeito filtrado .....	131

6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140
	APÊNDICE.....	151

## LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
cm <sup>3</sup>	Centímetro cúbico
D <sub>80</sub>	Diâmetro equivalente para o qual passa 80% do material
e	Índice de vazios
g	Gramma
h	Hora
ha	Hectare
k	Condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade
km <sup>2</sup>	Quilômetro quadrado
kPa	Quilo Pascal
n <sup>o</sup>	Número
m	Metro
mm	Milímetro
Mt	Megatonelada
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
Mm <sup>3</sup>	Mega metro cúbico
n	Porosidade
S	Grau de saturação
s	Segundo (tempo)
t	Tonelada
US\$	Dólar Americano
$\rho_s$	Massa específica dos grãos
$\rho_d$	Massa específica aparente seca
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\mu\text{m}$	micrometro
$\emptyset$	Diâmetro ou diâmetro equivalente
%	Percentagem ou porcentagem
°	Grau
I	Número um, em algarismo romano
II	Número dois, em algarismo romano
III	Número três, em algarismo romano



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Percentagem do valor exportado no setor mineral, em dólar americano (US\$) (Fonte – adaptado de IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração, 2011)	5
FIGURA 2.2 – Investimentos do setor mineral por minério, em bilhões de US\$ (Fonte – adaptado de IBRAM, 2011)	5
FIGURA 2.3 – Localização das principais minas de minério de ferro no Brasil (Fonte – adaptado de Lamoso, 2001)	7
FIGURA 2.4 – Etapas do processo de beneficiamento	7
FIGURA 2.5 – Métodos construtivos de barragens de rejeito em várias etapas – (A) Método de Montante, (B) Método de Jusante e (C) Método de Linha de Centro (Fonte – adaptado de Vick, 1983)	13
FIGURA 2.6 – Disposição de rejeitos através do método de aterro hidráulico (Fonte – Espósito, 2000)	13
FIGURA 2.7 – Mecanismo clássico da variação da permeabilidade na disposição de rejeitos (Fonte – adaptado de Kealy e Busch, 1971 apud Vick, 1983)	14
FIGURA 2.8 – Camada de rejeito, disposto como empilhamento drenado, sendo escavado (Fonte – Pimenta, 2011)	16
FIGURA 2.9 – Disposição em <i>pit</i> (Fonte – Lozano, 2006)	17
FIGURA 2.10 – Disposição compartilhada de rejeitos e estéreis (Fonte – Australian, 2007)	18
FIGURA 2.11 – Codisposição de rejeitos granulares e finos (Fonte – Australian, 2007)	18
FIGURA 2.12 – Seção típica de um espessador (Fonte: adaptado de Azam e Imran, 2008)	21
FIGURA 2.13 – Consistências do rejeito com o aumento do teor de sólidos (Fonte: adaptado de Slottee e Johnson, 2009)	23
FIGURA 2.14 – <i>Slump test</i> sendo realizado para um mesmo rejeito e diferentes teores de sólido em peso (Fonte: Grabinsky, Theriault e Welch, 2002)	24
FIGURA 2.15 – Croquis qualitativos de disposição de polpas e pasta (Fonte: Laudriault, 2002 apud Osorio, 2005)	25
FIGURA 2.16 – <i>Flume test</i> sendo conduzido para determinação do ângulo de disposição (Fonte: Slottee, Johnson e Crozier, 2008)	25
FIGURA 2.17 – Testes laboratoriais ilustrando a mudança progressiva do comportamento de rejeitos não-segregáveis e rejeitos segregáveis (Fonte: adaptado de Robinsky, 1999)	26

FIGURA 2.18 – Modificação da inclinação de disposição mediante variação do teor de sólidos dos rejeitos (Fonte: Robinsky, 1999)	27
FIGURA 2.19 – Erosão laminar em um depósito de rejeitos espessados (Fonte: Robinsky, 1999)	27
FIGURA 2.20 – Estrutura laminar formada pela disposição dos rejeitos espessados (Fonte: Robinsky, 1999)	28
FIGURA 2.21 – Variação do ângulo de disposição com a adoção de diferentes inclinações (incl.) de calha e percentagens de sólidos (Fonte: Osorio, Araújo e Valadão, 2008)	29
FIGURA 2.22 – Variação do ângulo de repouso para diferentes adições de cal (Fonte: Robinsky, 2002 apud Barreda, 2008)	30
FIGURA 2.23 – Detalhes da disposição de pasta em torres, formando camadas finas (Fonte: Theriault, Frostiak e Welch, 2003)	31
FIGURA 2.24 – Vista do tratamento de superfície para uma área de disposição convencional (polpa), onde há depressões e acúmulo de água (Fonte: Robinsky, 1999)	32
FIGURA 2.25 – Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração (Fonte: Davies, 2011)	35
FIGURA 2.26 – Operação em <i>dry stack</i> de La Coipa (Fonte: Davies, 2004)	36
FIGURA 2.27 – Operação em <i>dry stack</i> de Cerro Lindo (Fonte: Lara e León, 2011)	37
FIGURA 2.28 – Filtro de disco convencional	38
FIGURA 2.29 – Filtro de disco hiperbárico (Fonte: Guimarães, 2011)	39
FIGURA 2.30 – Filtro horizontal de correia (Fonte: Amarante, 2002)	40
FIGURA 2.31 – Filtro prensa de placas verticais (Fonte: Guimarães, 2011)	40
FIGURA 2.32 – Filtro prensa de placas horizontais (Fonte: Amarante, 2002)	41
FIGURA 2.33 – Faixas granulométricas dos rejeitos estudados pelo autor (Fonte: Guimarães, 2011)	43
FIGURA 2.34 – Fluxograma simplificado da Alternativa 1 (Fonte: Guimarães, 2011)	44
FIGURA 2.35 – Fluxograma simplificado da Alternativa 2 (Fonte: Guimarães, 2011)	46
FIGURA 2.36 – Fluxograma simplificado da Alternativa 3 (Fonte: Guimarães, 2011)	47
FIGURA 2.37 – Análise comparativa econômica das alternativas propostas para disposição de rejeitos (Fonte: Guimarães, 2011)	47
FIGURA 2.38 – Definição da faixa de compactação em <i>dry stack</i> (Fonte: Lupo e Hall, 2010)	49
FIGURA 2.39 – Seção típica de um <i>dry stack</i> (Fonte: Lupo e Hall, 2010)	49
FIGURA 2.40 – Relação entre massa específica seca e ângulo de atrito efetivo para o ensaio de cisalhamento direto (Espósito, 1995)	51
FIGURA 2.41 – Relação entre massa específica seca e coesão para o ensaio de cisalhamento direto (Espósito, 1995)	52

FIGURA 2.42 – Relação entre massa específica seca e o coeficiente de permeabilidade (Espósito, 1995)	52
FIGURA 2.43 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade para o ensaio triaxial CU (Espósito, 2000)	53
FIGURA 2.44 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio de cisalhamento direto para a pilha do Xingu (Espósito, 2000)	53
FIGURA 2.45 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio triaxial CD para a pilha do Xingu (Espósito, 2000)	54
FIGURA 2.46 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio de cisalhamento direto para a pilha do Monjolo (Espósito, 2000)	54
FIGURA 2.47 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio triaxial CD para a pilha do Monjolo (Espósito, 2000)	55
FIGURA 2.48 – Variação da massa específica dos grãos com o teor de ferro (Fonte: Hernandez, 2007)	56
FIGURA 2.49 – Variação do ângulo de atrito efetivo de pico com o teor de ferro (Fonte: Presotti, 2002)	57
FIGURA 2.50 – Variação do ângulo de atrito efetivo residual com o teor de ferro (Fonte: Presotti, 2002)	57
FIGURA 2.51 – Variação do ângulo de atrito efetivo de pico com o teor de ferro (Fonte: Hernandez, 2002)	58
FIGURA 2.52 – Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro (Fonte: modificado de Santos, 2004)	58
FIGURA 2.53 – Variação do ângulo de atrito de pico em função do teor de ferro para cada porosidade (Fonte: Russo, 2007)	59
FIGURA 2.54 – Variação do ângulo de atrito de pico em função da porosidade para cada teor de ferro (Fonte: Russo, 2007)	60
FIGURA 2.55 – Variação do ângulo de atrito residual em função do teor de ferro para cada porosidade (Fonte: Russo, 2007)	60
FIGURA 2.56 – Variação do ângulo de atrito residual em função da porosidade para cada teor de ferro (Fonte: Russo, 2007)	61
FIGURA 2.57 – Curva de compactação e densidades obtidas em campo (Fonte: Motta, 2008)	62
FIGURA 2.58 – Curva de compactação Proctor Normal para rejeito de minério de ferro (Fonte: Silva et al, 2010)	64
FIGURA 2.59 – Incidentes com barragens de rejeitos (Fonte: Alves, 2009)	65

FIGURA 2.60 – Matriz de risco para barragens de rejeitos, de acordo com a experiência dos autores (Fonte: Vanden Berghe et al, 2011)	67
FIGURA 2.61 – Distribuição do número de incidentes relacionados com a altura da barragem (Fonte: Rico et al, 2008)	68
FIGURA 2.62 – Distribuição do número de incidentes relacionados com a causa (Fonte: Rico et al, 2008)	68
FIGURA 2.63 – Funcionamento do gerenciamento de risco (Fonte: Colle, 2008)	70
FIGURA 3.1 – Matriz de risco adotada na análise FMEA	83
FIGURA 4.1 – Alternativas e volumes (Fonte: Rico et al, 2008)	85
FIGURA 4.2 – Análise determinística – pilha de rejeito filtrado – Fator de segurança de 1,843	88
FIGURA 4.3 – Análise determinística – barragem em solo compactado – Fator de segurança de 1,941	88
FIGURA 4.4 – Análise determinística – barragem ciclonaada – Fator de segurança de 2,059	89
FIGURA 4.5 – Análise determinística com $r_u$ – pilha de rejeito filtrado – Fator de segurança de 1,533	89
FIGURA 4.6 – Análise determinística com $r_u$ – barragem em solo compactado – Fator de segurança de 1,626	90
FIGURA 4.7 – Análise determinística com $r_u$ – barragem ciclonaada – Fator de segurança de 1,732	90
FIGURA 4.8 – Parâmetros adotados nas análises probabilísticas	91
FIGURA 4.9 – Análise probabilística– pilha de rejeito filtrado	92
FIGURA 4.10 – Análise probabilística com $r_u$ – pilha de rejeito filtrado	92
FIGURA 4.11 – Análise probabilística – barragem em solo compactado	93
FIGURA 4.12 – Análise probabilística com $r_u$ – barragem em solo compactado	93
FIGURA 4.13 – Análise probabilística – barragem ciclonaada	94
FIGURA 4.14 – Análise probabilística com $r_u$ – barragem ciclonaada	94
FIGURA 4.15 – Análise de sensibilidade com o parâmetro $r_u$	95
FIGURA 4.16 – Sistema de disposição de rejeito filtrado disposto em pilha de rejeito filtrado	96
FIGURA 4.17 – Sistema de disposição de rejeitos em forma de polpa em barragem em solo compactado alteada para jusante	97
FIGURA 4.18 – Sistema de disposição de rejeitos em forma de polpa em barragem ciclonaada alteada pelo método de linha de centro	98
FIGURA 4.19 – Matriz de risco obtida para a pilha de rejeito filtrado	120
FIGURA 4.20 – Matriz de risco obtida para a barragem em solo compactado	121

FIGURA 4.21 – Matriz de risco obtida para a barragem ciclona	122
FIGURA 4.22 – Matriz de risco comparativa para as estruturas, com destaque para os modos de falha da terceira célula classificada como severidade trágica	122
FIGURA 5.1 – Comparativo das áreas ocupadas para cada cenário	125
FIGURA 5.2 – Número de incidentes por método construtivo (Fonte: Icold, 2008)	131
FIGURA 5.3 – Umidade de torta de rejeitos de flotação de diferentes usinas (Fonte: Guimarães, 2011)	133
FIGURA 5.4 – Umidade de torta para lamas de diferentes usinas (Fonte: Guimarães, 2011)	133
FIGURA 5.5 – Umidade de torta de rejeitos totais (mistura) de diferentes usinas (Fonte: Guimarães, 2011)	134

## LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos (Fonte: Guimarães, 2011)	11
TABELA 2.2 – Tipos de espessadores comumente utilizados para o espessamento de rejeitos de minério de ferro (Fonte: adaptado de Guimarães, 2011)	22
TABELA 2.3 – Comparação entre alguns métodos alternativos de disposição de rejeitos (Fonte: Lima, 2006)	34
TABELA 2.4 – Relação das usinas onde foram coletadas as amostras de rejeitos no trabalho de Guimarães (2011)	42
TABELA 2.5 – Resultado do dimensionamento do número de filtros e teor de umidade final da torta, por alternativa técnica de filtro – Rejeito de Flotação (Fonte: Guimarães, 2011)	45
TABELA 2.6 – Resultado do dimensionamento do número de filtros e teor de umidade final da torta, por alternativa técnica de filtro – Lamas (Fonte: Guimarães, 2011)	45
TABELA 2.7 – Resultado do dimensionamento do número de filtros e teor de umidade final da torta, por alternativa técnica de filtro – Mistura (Fonte: Guimarães, 2011)	45
TABELA 2.8 – Principais operações de rejeito filtrado do mundo (Fonte: adaptado de Ulrich e Coffin, 2013)	50
TABELA 2.9 – Variação das características geotécnicas do rejeito com o tempo (Fonte: Lopes, 2000)	56
TABELA 2.10 – Outros métodos de análise de risco (Fonte: adaptado de Espósito e Caldeira, 2010)	72
TABELA 3.1 – Alternativas de rota de processo estudadas para rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero	75
TABELA 3.2 – Alternativas de rota de processo estudadas para rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero	76
TABELA 3.3 – Valores típicos de probabilidade de ruptura (Dell’Avanzi e Sayão, 1998)	78
TABELA 3.4 – Índice de Ocorrência	80
TABELA 3.5 – Índice de Detecção	81
TABELA 3.6 – Composição para definição da Severidade	82
TABELA 4.1 – Cálculo de volume de rejeitos a ser disposto para cada alternativa estudada	85
TABELA 4.2 – Cálculo de volume de rejeitos (base seca) a ser disposto para cada alternativa	86
TABELA 4.3 – Características geométricas obtidas para cada cenário	86

TABELA 4.4 – Parâmetros médios efetivos adotados nas análises de estabilidade	87
TABELA 4.5 – Fatores de segurança obtidos para cada cenário nas análises determinísticas	90
TABELA 4.6 – Características adotadas para cada cenário	100
TABELA 4.7 – FMEA Maciço principal – Pilha de Rejeito Filtrado	101
TABELA 4.8 – FMEA Maciço principal – Barragem em solo compactado	102
TABELA 4.9 – FMEA Maciço principal – Barragem ciclona	103
TABELA 4.10 – Características adotadas para cada cenário	104
TABELA 4.11 – FMEA Drenagem Interna – Pilha de Rejeito Filtrado	105
TABELA 4.12 – FMEA Drenagem Interna – Barragem em solo compactado	106
TABELA 4.13 – FMEA Drenagem Interna – Barragem ciclona	107
TABELA 4.14 – Características adotadas para cada cenário	108
TABELA 4.15 – FMEA Drenagem Superficial – Pilha de Rejeito Filtrado	108
TABELA 4.16 – FMEA Drenagem Superficial – Barragem em solo compactado	109
TABELA 4.17 – FMEA Drenagem Superficial – Barragem ciclona	109
TABELA 4.18 – Características adotadas para cada cenário	110
TABELA 4.19 – FMEA Fundação – Pilha de Rejeito Filtrado	110
TABELA 4.20 – FMEA Fundação – Barragem em solo compactado	111
TABELA 4.21 – FMEA Fundação – Barragem ciclona	111
TABELA 4.22 – Características adotadas para cada cenário	112
TABELA 4.23 – FMEA Dique de Contenção de Finos – Pilha de Rejeito Filtrado	112
TABELA 4.24 – Características adotadas para cada cenário	113
TABELA 4.25 – FMEA Reservatório – Barragem em solo compactado	113
TABELA 4.26 – FMEA Reservatório – Barragem ciclona	114
TABELA 4.27 – Classificação do risco em termos de NPR	115
TABELA 4.28 – Riscos críticos – Pilha de rejeito filtrado	116
TABELA 4.29 – Riscos críticos – Barragem em solo compactado	117
TABELA 4.30 – Riscos críticos – Barragem ciclona	118
TABELA 4.31 – Modos de falha da pilha de rejeito filtrado	119
TABELA 4.32 – Modos de falha da barragem em solo compactado	120
TABELA 4.33 – Modos de falha da barragem ciclona	121
TABELA 5.1 – Fatores de segurança (FS) determinísticos e mínimos	128

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al	Alumínio
CBR	California Bearing Ratio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de cálcio
CAPEX	Investimento em Bem de Capital
CD	Adensado e drenado
CPTu	<i>Cone Penetration Test</i> com medida de poropressão
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
CU	Adensado não drenado
D	Índice de Detecção
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EP	Espessador
ETG	Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia
Fe	Ferro
FIG.	Figura
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FS	Fator de Segurança
GEOTRANS	Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes
IABR	Instituto Aço Brasil
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ITMI VGR	Instalação de Tratamento de Minério de Vargem Grande
NA	Nível de água
NBR	Norma Brasileira
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Mg	Magnésio
MG	Minas Gerais
NM	Norma Mercosul
NPR	Número Potencial de Risco
N <sub>SPT</sub>	Índice de Resistência a Penetração
MS	Mato Grosso do Sul
O	Índice de Ocorrência
OF	<i>Overflow</i>
OPEX	Despesas Operacionais
P	Fósforo



PA	Pará
pH	Potencial Hidrogeniônico
ROM	<i>run-of-mine</i>
$r_u$	Parâmetro de poropressão
S	Índice de Detecção
S.A.	Sociedade Anônima
Si	Silício
SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
TAB.	Tabela
TQ	Tanque
UF	<i>Underflow</i>
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
VP	Valor Presente

## RESUMO

Dentre os diversos métodos de disposição de rejeitos tem-se verificado uma preferência das mineradoras brasileiras pela disposição em superfície na forma de polpa, com utilização de barragens de contenção de rejeitos. Entretanto, os rejeitos podem se apresentar sob diferentes estados físicos, ou seja, polpa, espessados, pasta ou torta, implicando em comportamentos geotécnicos específicos. A técnica de disposição de rejeitos espessados, que consiste na retirada de água da polpa, vem se apresentando como uma alternativa viável e necessária para disposição dos rejeitos gerados nas minerações, tendo em vista os potenciais riscos inerentes à disposição de rejeitos em formas de polpa nas barragens convencionais e/ou o grande impacto ambiental causado pelas barragens, também em caso de eventuais rupturas. Entretanto, reporta-se que esta prática não tem sido ainda de uso corrente nas empresas de mineração brasileiras, apesar de reconhecida internacionalmente. Desta forma, é avaliado nesse trabalho o uso da técnica de disposição de rejeitos filtrados de minério de ferro em comparação com o uso do sistema convencional de disposição dos rejeitos em forma de polpa, principalmente no que se refere à inovação ambiental e de segurança. A metodologia consiste basicamente na elaboração de cenários para as alternativas de disposição de rejeitos, análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas, além de análises de risco através do FMEA, com o propósito de identificar os modos de falha e suas consequências para os subsistemas que compõem cada cenário. Os cenários elaborados e avaliados são: pilha de rejeito filtrado, barragem em solo compactado e barragem de rejeito ciclonado. Ao longo do desenvolvimento do trabalho foi possível contemplar aspectos do estado da prática para as pilhas de rejeitos filtrados compactados. Com os cenários obtidos constata-se que o cenário da pilha de rejeito filtrado propicia menor impacto ambiental, sendo uma estrutura facilmente recuperada. As análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas atestam a geometria proposta para a pilha de rejeito filtrado e indicam, para os parâmetros assumidos, menores riscos associados se comparado com os cenários das barragens. As análises de risco através do FMEA foram importantes para evidenciar os possíveis modos de falha e suas consequências para cada cenário proposto. Dentre os cenários analisados, a pilha de rejeito filtrado apresenta menor risco de ocorrência de falhas.

**Palavras Chaves:** *rejeito filtrado, minério de ferro, métodos de disposição, riscos associados.*

## ABSTRACT

Among the various tailings disposal methods, Brazilian mining companies generally opt for disposal at the surface in the form of slurry held behind earthen dams. However, besides slurry, tailings can be processed to take on other physical states, such as thickening into paste or cake form, implying specific geotechnical behaviors. The thickening process, involving filtering to remove the water, is a feasible alternative that can mitigate many of the risks of conventional disposal of tailings in slurry form behind dams, due to their improper construction and/or maintenance and the inherent environmental risks, especially in the event of rupture. Despite the internationally recognized environmental advantages of the filtering/dewatering practice, it is not typically used by Brazilian miners. Therefore, this article presents the results of a conceptual analysis of the environmental performance and safety of filtering iron ore tailings to produce cake in comparison with conventional disposal in slurry form. The method basically consists of preparing alternative scenarios for disposal of tailings, deterministic and probabilistic stability analyses, as well as risk assessment through FMEA, for the purpose of identifying the failure modes and their consequences in each scenario. The three scenarios analyzed were disposal in piles of filtered tailings, in tailings ponds held by compacted earth dams and by dams made of cycloned tailings. During the work it was possible to contemplate aspects of the state of the practice for disposal in piles of compacted filter cake. The results indicate that this disposal method has the least environmental impact, since the structure is easily recovered. The deterministic and probabilistic stability analyses attest to the good geometry of these piles and indicate, for the assumed parameters, lower risks compared to the two dam scenarios. The risk assessments through FMEA were important do reveal the possible failure modes and their consequences for each scenario studied. Among the three, the filtered tailings pile presents the lowest risk of failures.

**Key words:** *filtered tailings, iron ore, disposal methods, associated risks.*

# 1 INTRODUÇÃO

Os rejeitos são consequências inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente, ao produto de interesse. Esses rejeitos, que são produzidos em grande quantidade, impactam o meio ambiente. Por este motivo, a grande produção de rejeitos tem gerado uma preocupação cada vez maior nas empresas, que buscam minimizar os impactos ambientais e os custos associados aos processos de disposição e contenção desse material.

Tendo em vista a quantidade de rejeitos gerados torna-se imprescindível a utilização de processos sistemáticos de disposição. Desta forma, os rejeitos têm sido alvos de grande interesse por parte das empresas do setor de mineração que vêm procurando alternativas de disposição desses materiais, de forma econômica e segura. Dentre os diversos métodos de disposição, tem-se verificado uma preferência das mineradoras brasileiras pela disposição dos rejeitos em superfície, com utilização de barragens de contenção de rejeitos. Estas barragens podem ser construídas em etapas, com alteamentos sucessivos e ao longo do tempo, sendo que em muitos casos o próprio rejeito pode se constituir o material de construção.

De forma geral, nos sistemas de disposição de rejeitos, principalmente nos associados às barragens de contenção, os rejeitos são encontrados na forma de polpa, ou seja, mistura sólido – água, tipicamente passível de segregação. Entretanto, os rejeitos podem se apresentar sob diferentes consistências, ou seja; polpa, espessados, pastas ou tortas; implicando em comportamentos geotécnicos específicos e formas de disposições alternativas às barragens de contenção de rejeitos, proporcionando redução da área impactada.

Todos os conceitos geotécnicos utilizados para o projeto do sistema de disposição de rejeitos em forma de polpa devem ser aplicados no caso dos rejeitos espessados, ou seja, determinação de parâmetros de resistência do material, condições de adensamento e condutividade hidráulica, assim como estudos de liquefação e determinação das condições de disposição.

A evolução da tecnologia de espessamentos de rejeitos nas últimas décadas ocorreu devido à sua disposição no subsolo como material de preenchimento nas minas subterrâneas. A disposição em superfície também se tornou muito atraente, pois desta forma pode-se reduzir os riscos associados

quando da disposição de rejeitos em polpa através de barragens de contenção, principalmente no que concerne ao meio ambiente e à sociedade.

A tecnologia de rejeitos espessados tem se apresentado como um método eficaz de disposição de rejeitos no que se refere à segurança das estruturas formadas por estes materiais, assim como quando o objetivo é a recuperação de água. Países como Peru, Canadá e Austrália já vêm utilizando esta técnica com muito sucesso, sendo garantido o ganho ambiental durante o processo, a redução de custos no descomissionamento e a recuperação de água.

Os benefícios ambientais relacionados com a disposição destes tipos de rejeitos em superfície decorrem das características físicas do rejeito espessado e das vantagens operacionais associadas com a sua disposição. Destaca-se que os processos de desaguamento e espessamento dos rejeitos proporcionam maior densidade e menor risco às estruturas de disposição, acarretando menor susceptibilidade à liquefação e a rupturas catastróficas; menor potencial de contaminação das águas subterrâneas e maior facilidade de aceleração dos procedimentos de reabilitação das áreas degradadas como no caso da pilha de rejeito filtrado (tortas).

O espessamento gerando rejeitos de mais alta densidade não tem sido ainda de uso corrente nas empresas de mineração brasileiras, tampouco a filtragem de rejeitos. A motivação para este estudo reside, portanto, na busca de melhores condições para o desenvolvimento sustentável da mineração, ou seja, atender as necessidades atuais sem, entretanto, prejudicar as gerações futuras.

Inserido nesse contexto, este projeto de pesquisa tem como objetivo geral a avaliação do uso da técnica de disposição de rejeitos filtrados de minério de ferro em comparação com o uso do sistema convencional de disposição dos rejeitos em forma de polpa, principalmente no que se refere à inovação ambiental e de segurança. São objetivos específicos deste trabalho:

- Contextualização do problema.
- Elaboração do “estado da arte” e “estado da prática” do uso da tecnologia de rejeitos filtrados, além de aspectos relacionados aos rejeitos de minério de ferro, outros métodos de disposição, segurança de pilhas e barragens e ferramentas de análise de risco aplicadas nestas estruturas geotécnicas.
- Apresentação de um caso hipotético que compreende duas alternativas para a disposição de rejeitos: rejeitos em forma de polpa e rejeitos filtrados.
- Elaboração do arranjo geométrico para cada alternativa, para fins comparativos.

- Aplicação do FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) para cada alternativa, considerando os estágios de disposição e o descomissionamento.
- Análise crítica dos resultados.

Dessa forma, esse trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- Resumo/Abstract – apresenta o resumo do conteúdo dessa dissertação, em português e em inglês, ressaltando a sua natureza, objetivos e importância.
- Capítulo 1 – Introdução – apresenta a motivação e a contextualização do estudo, discussão formal do tema da pesquisa, ressaltando a abrangência e a importância do trabalho, assim como os objetivos deste e a metodologia empregada.
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – contempla a revisão bibliográfica que visa conhecer o “estado da arte” assim como o “estado da prática” do uso da tecnologia da obtenção e disposição de tortas, no mundo e no Brasil, com as informações relevantes presentes na literatura. Também deverá abordar aspectos relacionados aos métodos de análise de risco aplicados em barragens.
- Capítulo 3 – Metodologia – neste capítulo é descrita a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.
- Capítulo 4 – Análises e Resultados – é composto pela apresentação dos resultados de forma detalhada, com algumas análises críticas ao longo do capítulo.
- Capítulo 5 – Discussão dos Resultados – apresenta a discussão dos resultados obtidos, interpretação e comparação com a literatura.
- Capítulo 6 – Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras – são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras, além das principais discussões das análises e aplicabilidade dos resultados. Ao final são indicadas recomendações de pesquisas futuras.
- Referências Bibliográficas – contempla a listagem de todos os materiais técnicos consultados e referenciados ao longo do texto, em conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Apêndices – contempla os documentos complementares dos arranjos obtidos para os distintos cenários de disposição de rejeitos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo está apresentada a revisão da literatura, compreendendo aspectos gerais sobre o minério de ferro, as reservas brasileiras, o beneficiamento, métodos alternativos da disposição de rejeitos de minério de ferro, técnica de espessamento de rejeitos com ênfase em rejeitos filtrados, a influência do teor de ferro no comportamento dos rejeitos e os aspectos ambientais e riscos associados à disposição de rejeitos de minério de ferro.

### 2.1 O minério de ferro

O ferro (Fe) é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, ocorrendo como constituinte em todas as classes minerais. Mais de 400 minerais apresentam Fe em teores detectáveis, cujas concentrações variam de menos de 1% a até mais de 70%. Esta diversidade existe devido a sua abundância e alta capacidade de oxidar, conforme o ambiente (Takehara, 2004).

De acordo com Mapa (2006), o termo minério de ferro deve ser usado, preponderantemente, para se referir a um agregado de minerais que está sendo ou poderá vir a ser explorado com vantagem econômica devido ao seu conteúdo de ferro. Para Takehara (2004), o “minério de ferro” é definido como um material natural de vários graus, composições e qualidades físicas, passível de ser minerado e processado de acordo com o benefício econômico e as circunstâncias de mercado. Além disto, deve ser composto por alto teor de Fe e baixos teores de contaminantes, tais como silício (Si), alumínio (Al), magnésio (Mg), fósforo (P) e carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

A extração do minério de ferro é de suma importância para a produção e consumo do aço. Cerca de 99 % do minério de ferro produzido é utilizado na fabricação do aço e ferro fundido (DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral, 2011). Este número expressa o papel do setor siderúrgico como o principal motivador do seu beneficiamento.

O IABR, Instituto Aço Brasil, (2011), relata que a primeira descoberta no Brasil de depósitos de minério de ferro se deu em 1554 no interior da capitania de São Paulo Vicente (atual estado de São Paulo). Atualmente, o minério de ferro ocupa o primeiro lugar na lista de produtos que geram as maiores rendas nas exportações brasileiras no setor da indústria mineral, conforme FIG. 2.1. Além

disso, o minério de ferro também ocupa a primeira posição no que diz respeito à previsão de novos investimentos do setor mineral, para os anos de 2011 a 2015, conforme FIG. 2.2.

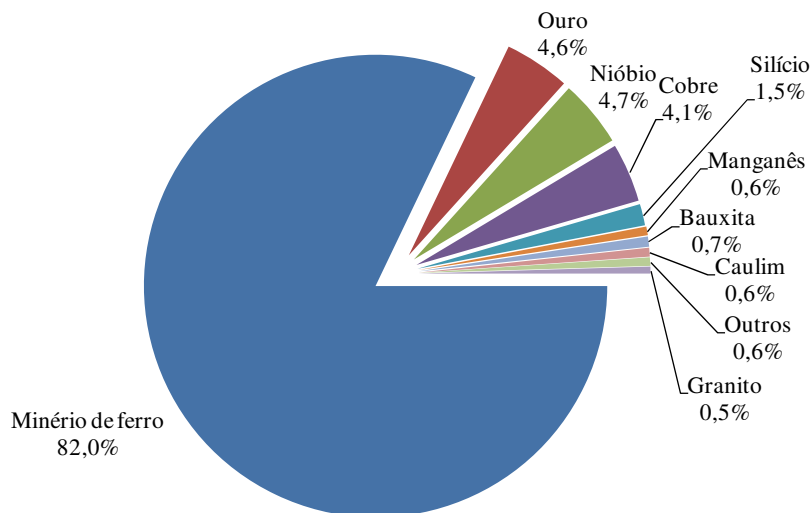


FIGURA 2.1 – Percentagem do valor exportado no setor mineral, em dólar americano (US\$) (Fonte – adaptado de IBRAM, Instituto Brasileiro de Mineração, 2011)

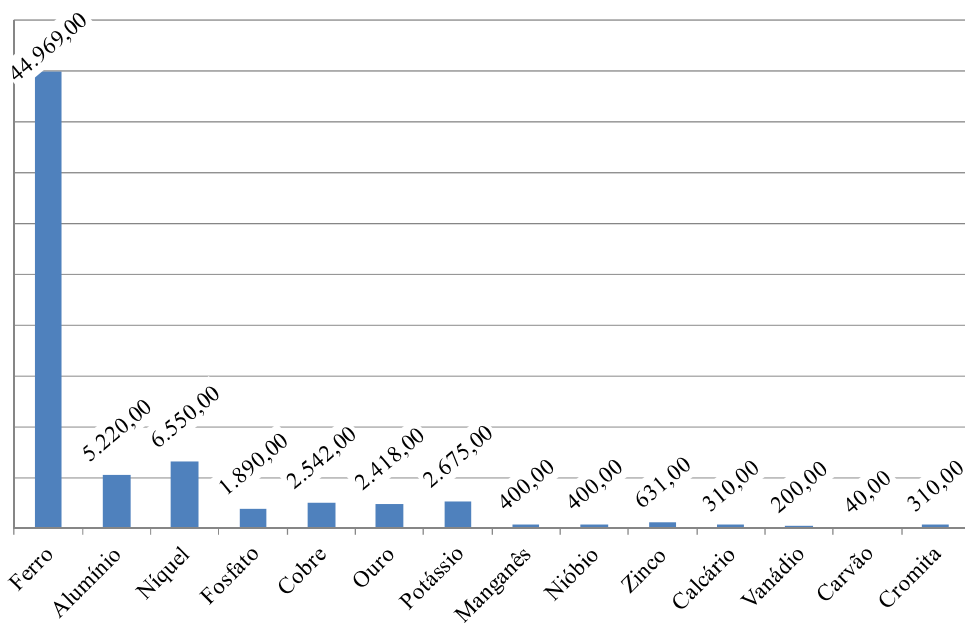


FIGURA 2.2 – Investimentos do setor mineral por minério, em bilhões de US\$ (Fonte – adaptado de IBRAM, 2011)

Diante do cenário positivo de investimentos para a exploração do minério de ferro, também é de conhecimento que toda atividade de mineração gere, inevitavelmente, grandes quantidades de rejeito. O rejeito é o material descartado resultante do processo de beneficiamento do minério (lavagem, moagem, britagem, tratamento químico, etc.), geralmente dispostos em barragens. Por se



tratar de um processo via úmida, os rejeitos são comumente encontrados sob a forma líquida e sólida. Nessa dissertação são utilizados os seguintes termos correlacionados ao rejeito:

- Lama: mistura segregável da fração fina do rejeito e água.
- Rejeito de flotação: mistura segregável da fração granular do rejeito e água.
- Polpa: mistura segregável da lama e rejeito de flotação.

## 2.2 Reservas brasileiras de formação ferrífera

No Brasil, a atividade metalúrgica do ferro foi exercida desde o início da colonização, quando a matéria prima ainda era inicialmente importada. Em 1876, a fundação da Escola de Minas de Ouro Preto proporcionou grande evolução na mineração de ferro, formando profissionais que ajudaram a instalar as primeiras usinas no país (Azevedo, 2007).

Atualmente, o Brasil ocupa o quarto lugar em relação às reservas mundiais, estimadas em 160 bilhões de toneladas, alcançando destas cerca de 29 bilhões de toneladas (aproximadamente 18%) (IBRAM, 2011). Considerando as reservas em termos de ferro contido, o Brasil assume lugar de destaque no cenário internacional devido ao alto teor nos minérios hematita, predominante no Pará, e itabirito, predominante em Minas Gerais (IBRAM, 2011).

Conforme o DNPM (2011), Minas Gerais ocupa o primeiro lugar na distribuição de reservas de minério de ferro em nível nacional, com cerca de 67%. Em seguida, o Pará ocupa a segunda posição com 16%, seguido do Mato Grosso do Sul (15,5%). Os Estados Alagoas, Amazonas, Bahia, Ceará, Goiás, Pernambuco, Rio Grande do Norte e São Paulo somam 1,5%.

As principais minas de ferro se situam na Serra do Carajás, Pará, no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, e em Corumbá, Mato Grosso do Sul (ver FIG. 2.3). No Pará, a produção atual da jazida de Carajás é da ordem de 54 Mt/ano de minério de ferro. As reservas totais foram estimadas como superiores a 18 bilhões de toneladas de minério com teores de ferro de até 67%. Em Minas Gerais, o Quadrilátero Ferrífero é a região que mais se destaca no que diz respeito às jazidas de minério de ferro e se localiza na região centro sul do Estado de Minas Gerais. Compreendendo uma área total de cerca de 7000km<sup>2</sup>, o teor de ferro pode atingir 65% (Bizzi et al, 2003).

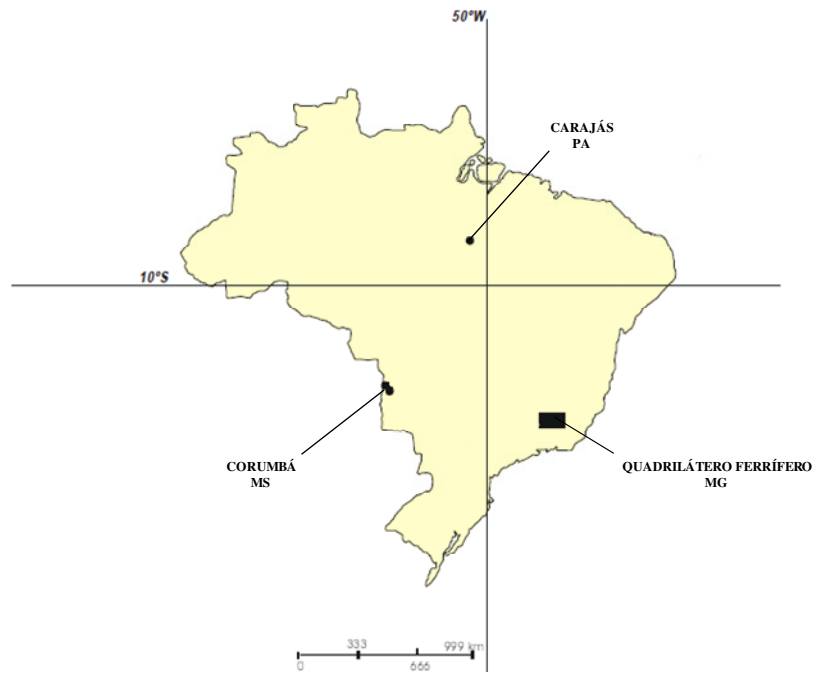


FIGURA 2.3 – Localização das principais minas de minério de ferro no Brasil (Fonte – adaptado de Lamoso, 2001)

### 2.3 O beneficiamento do minério de ferro

O processo de beneficiamento mais comumente utilizado do minério de ferro objetiva a redução e regularização da granulometria, remoção de ganga (parte do minério sem interesse econômico) e aumento da qualidade do produto final. O beneficiamento tem início com a fragmentação do mineral por meio da britagem e moagem, conforme FIG. 2.4 (Milonas, 2006).

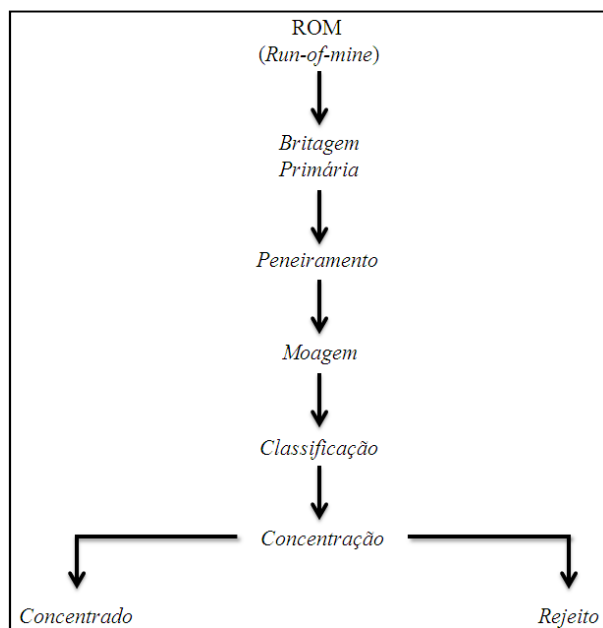


FIGURA 2.4 – Etapas do processo de beneficiamento

O ROM (*run-of-mine*), ou minério bruto lavrado, passa pelo processo de beneficiamento, sendo a parte fina direcionada para a sinterização e a fração grossa rebitada na granulometria desejada. Após beneficiamento do minério bruto são gerados produtos granulares ( $6,3 < \varnothing < 31,5\text{mm}$ ) e finos, estes últimos denominados *sinter feed* ( $0,15 < \varnothing < 6,3\text{mm}$ ) e *pellet feed* ( $\varnothing < 0,15\text{mm}$ ) (Guimarães, 2011).

Gomes (2009a) relata que, no Brasil, o beneficiamento do minério de ferro permite que grande parte do produto seja gerada apenas nas etapas de britagem, peneiramento e classificação. A moagem pode ser necessária para liberação do minério ou redução granulométrica para a próxima etapa do processo. Utiliza-se a etapa de concentração devido ao fato de a simples separação por tamanho não obter produtos com elevados teores de ferro. Guimarães (2011) cita que o emprego da concentração faz-se também necessária para reduzir os contaminantes presentes, principalmente sílica e alumina. Segundo Gomes (2009a), em geral quanto maior o teor de finos maior será o teor de contaminantes (sílica, alumina, etc). Takehara (2004) relata que, atualmente, as mineradoras se preocupam com a extração de elementos contaminantes e com a homogeneidade quando do processo de beneficiamento do minério de ferro, garantindo assim a qualidade do produto final.

Na etapa de beneficiamento grandes quantidades de água são utilizadas para lavar e retirar as impurezas, sendo o produto desse processo apresentado em forma de lama. Da lama, produzida na moagem ou classificação, são separados o produto final daqueles economicamente pobres (rejeito) através de processos físicos e químicos (Milonas, 2006).

#### 2.4 Rejeito de minério de ferro

Raramente os minerais se encontram puros na natureza, sendo geralmente e cada vez mais encontrados em pequenas concentrações no minério bruto. Desta forma, durante o processo de beneficiamento há geração de resíduos denominados “rejeitos de mineração”, conforme já mencionado. Gomes & Pereira (2002) apud Russo (2007) citam que os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro geram um volume de rejeitos da ordem de 40% para minério de ferro. Todavia, este valor percentual dependerá muito do teor de ferro presente nas jazidas e das condições de mercado.

De acordo com a NBR 13028 (ABNT, 2006), rejeito é “todo e qualquer material não aproveitável economicamente, gerado durante o processo de beneficiamento de minérios”. Milonas (2006) conceitua os rejeitos da mineração como subprodutos das atividades de extração das riquezas minerais, oriunda de minerais de ganga, que correspondem à porção mineral com pequeno ou nenhum valor econômico. A autora caracteriza os rejeitos de minério de ferro, como sendo inertes, classificados como Classe III da NBR 10004 (ABNT, 2004), granulares, de baixa deformabilidade e boas condições de drenagem e resistência.

Como um subproduto do beneficiamento do minério, é fato que as características do rejeito são intrínsecas ao mineral lavrado e ao processo de beneficiamento adotado que, por sua vez, deve atender às necessidades atuais do mercado.

Os rejeitos de minério de ferro são divididos em rejeitos finos e rejeitos granulares. Apesar da existência da fração fina nos rejeitos gerados no processo de beneficiamento do minério de ferro, trabalhos presentes na literatura, como os de Mendes (2008), Gomes (2009b), Milonas (2006) e Machado (2007), indicam que a fração granulométrica que controla as características geotécnicas do rejeito de minério de ferro é a fração granular. Entretanto, não se pode afirmar que os rejeitos de minério de ferro apresentarão comportamento de areia dada sua granulometria, pois os parâmetros geotécnicos serão também afetados, por exemplo, pelo teor de ferro presente neste material.

Os rejeitos finos geralmente são obtidos após a deslamagem do minério de ferro, na fase de concentração, sendo constituídos pelas frações de siltes e argilas. Lima (2006) identifica os rejeitos finos de minério de ferro como materiais em geral plásticos e altamente compressíveis, transportado via tubulações e dispostos em forma de lama fluída, contendo grande quantidade de água.

Espósito (2000) afirma que os rejeitos de minério de ferro são formados por hematita (de 10 a 15% dos sólidos), cuja massa específica dos grãos ( $\rho_s$ ) é em torno de  $5,25\text{g/cm}^3$ , sendo o restante formado por quartzo ( $\rho_s$  entre  $2,65$  a  $2,70\text{g/cm}^3$ ). Ao realizar uma caracterização mineralógica dos rejeitos dispostos na Mina do Córrego do Feijão, Minas Gerais, Gomes (2009a) verificou que praticamente todo o ferro presente era proveniente da hematita e o quartzo era responsável por praticamente toda sílica existente nas amostras estudadas, sendo os demais minerais presentes em baixos teores.

Wolff (2009) caracterizou física e quimicamente rejeitos de sete usinas da VALE S.A., a saber: Brucutu, Córrego do Feijão, Conceição, Cauê, Fábrica Nova, Alegria IBII, Alegria IBIII e Carajás. O objetivo da autora era o de fornecer informações para o desenvolvimento de novos produtos e escolha de técnicas de processamento mineral mais adequada. Como resultados, os rejeitos apresentaram granulometria ultrafina com  $D_{80}$  variando entre 10 a  $30\mu\text{m}$ . O teor de ferro variou entre 44 e 64% e foi encontrado principalmente nas formas de hematita e goethita. O fósforo e a alumina, provavelmente associados à estrutura da goethita, estão também presentes em quantidades elevadas e quanto mais fina as partículas maiores os teores destes. Ainda de acordo com a autora, o rejeito de Carajás é o que apresenta granulometria mais fina, com  $D_{80}$  de  $10\mu\text{m}$ , apresentando 64% de ferro e apenas 9% de minerais considerados contaminantes, essencialmente quartzo e gibbsita. Estas características do rejeito de Carajás faz com que este apresente o maior potencial de reprocessamento para a recuperação de ferro, que pode ser realizada através do desenvolvimento de técnicas de aglomeração e produtos comerciais para este rejeito. Além disso, as análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) feitas pela autora mostraram que as partículas dos rejeitos estudados não são esféricas.

Victorino et al (2008) realizaram uma campanha de ensaios CPTu (Cone Penetration Test com medida de poropressão) numa barragem de rejeito de minério de ferro localizada em Minas Gerais. Os autores alertaram para a heterogeneidade dos materiais que constituem uma barragem deste tipo e sua praia de rejeitos, ressaltando a importância da consideração desta variabilidade em projetos e a importância de uma investigação geotécnica detalhada. Neste mesmo âmbito, Machado (2007) cita que a heterogeneidade deste material está associada às necessidades da mineradora em obter o minério com as características desejadas, aliada também à falta de metodologias de controle, assim como às flutuações de processo em função da qualidade do minério. Mendes (2008) apresentou em seu trabalho o estudo do comportamento da Barragem 1, localizada no Córrego do Feijão, MG, destinada a conter rejeito de minério de ferro. A referida barragem foi construída com dique de partida em solo compactado e alteada com rejeito compactado, pelo método de montante e linha de centro. Dentre as irregularidades encontradas devido à heterogeneidade do maciço como um todo estão: diferentes níveis piezométricos em profundidade, gradientes hidráulicos descendentes junto aos diques iniciais, surgência de água em taludes onde piezômetros indicam poropressões nulas e artesianismo próximo à fundação. Após campanha geotécnica composta por ensaios de campo e laboratório, o autor ressalta que não conseguiu estabelecer correlação entre os parâmetros geotécnicos e a profundidade ou distância da crista ou tensão efetiva.

Diante das variáveis que governam as características dos rejeitos, é importante saber que as formas de disposição deste rejeito dependerão de suas propriedades geotécnicas. De acordo com Figueiredo (2007), a forma de disposição dos rejeitos é relacionada ao tipo de minério e ao processo empregado para o seu beneficiamento. O teor de sólidos do rejeito, quando da sua disposição, pode ser alterado, não acarretando em modificação das características físico-químicas e mineralógicas.

Guimarães (2011) apresenta, de forma esquemática, a geração de rejeitos nas etapas de classificação e concentração do minério de ferro, além da forma de disposição mais utilizada (ver TAB. 2.1).

TABELA 2.1 – Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos (Fonte: Guimarães, 2011)

Fração	Método de concentração	Produto	Rejeito	Destinação do rejeito
$(6,3 < \varnothing < 31,5)\text{mm}$	-	Granulado	-	-
$(1 < \varnothing < 6,3)\text{mm}$	Jigagem	Sinter feed	Rejeito da jigagem	Pilhas de rejeitos ou moagem e incorporação ao circuito
$(0,15 < \varnothing < 1)\text{mm}$	Concentração magnética ou espirais		Produto não magnético ou rejeito de espirais*	Pilhas de rejeitos ou barragens
$(\varnothing < 0,15)\text{mm}$	Concentração magnética e/ou flotação	Pellet feed	Produto não magnético e/ou rejeito de flotação*	Barragens
$(\varnothing < 0,010)\text{mm}$	-	-	Lamas*	Barragens

\* Direcionados juntos, sempre, para as barragens na forma de polpa (Guimarães, 2011).

A disposição de rejeitos de mineração pode ser feita de forma subterrânea, subaquática ou a céu aberto. Conforme Lozano (2006), a disposição subaquática não é muito utilizada devido a problemas ambientais.

## 2.5 Métodos de disposição de rejeitos a céu aberto

No Brasil, a disposição de rejeitos em forma de polpa ainda é a técnica comumente usada e requer grandes estruturas de terra (barragens) para sua disposição. Este tipo de disposição, como é sabido, pode acarretar impacto ao meio ambiente e riscos associados, assim como outras formas de disposição.

Na NBR 13.028 (ABNT, 2006), barragem é definida como “qualquer estrutura que forme uma parede de contenção de rejeitos, para sedimentos e/ou para formação do reservatório de água”. Segundo a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental, COPAM (2002), barragem é definida como qualquer estrutura – barramento, dique ou similar – que forme uma parede de contenção de rejeitos, de resíduos e de formação do reservatório de água.

Para a Lei Federal 12.334 (Brasil, 2010), barragem é “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

Na mineração brasileira, é muito comum a utilização de barragens para contenção dos rejeitos gerados no processo de extração do minério. Gomes (2009b) considera que a história da disposição de rejeitos até o momento atual é dividida em quatro gerações, sendo elas:

- Primeira geração: descartes descontrolados.
- Segunda geração: descartes contidos.
- Terceira geração: uso dos rejeitos na construção das barragens.
- Quarta geração: descargas espessadas e filtradas.

A seguir estão relatados alguns métodos de disposição de rejeitos a céu aberto, a saber: aterro hidráulico, disposição em cava, codisposição de rejeitos e estéreis, disposição subaérea, empilhamento drenado e rejeitos espessados. Neste último, um maior enfoque será dado para os rejeitos filtrados.

### 2.5.1 Aterro Hidráulico

A técnica do aterro hidráulico consiste em se utilizar o próprio rejeito como material de construção, através da técnica de hidromecanização, que por sua vez consiste no transporte e disposição do rejeito com auxílio da água. Inicialmente é executado um dique de partida e, a partir de então, o rejeito é lançado em sua crista de forma a constituir a fundação e o alteamento seguinte.

A construção da barragem de rejeito pode ser feita em uma única etapa ou em várias etapas. A vantagem de ser realizar a construção desta estrutura em várias etapas é eliminar algumas desvantagens da etapa única, sendo elas: obrigatoriedade de área de empréstimo, disponibilidade de

área, utilização de métodos construtivos convencionais, elevado investimento inicial, dentre outros (Russo, 2007). Os métodos construtivos realizados em várias etapas podem ser de jusante, de montante e de linha de centro, conforme FIG. 2.5. De acordo com Espósito (2000), Figueiredo (2007) e Milonas (2006), o método de montante é considerado o mais econômico, mas seu comportamento depende fundamentalmente da competência da fundação e dissipação das poropressões, sendo o método de maior dificuldade construtiva. A FIG. 2.6 ilustra a técnica de aterro hidráulico.

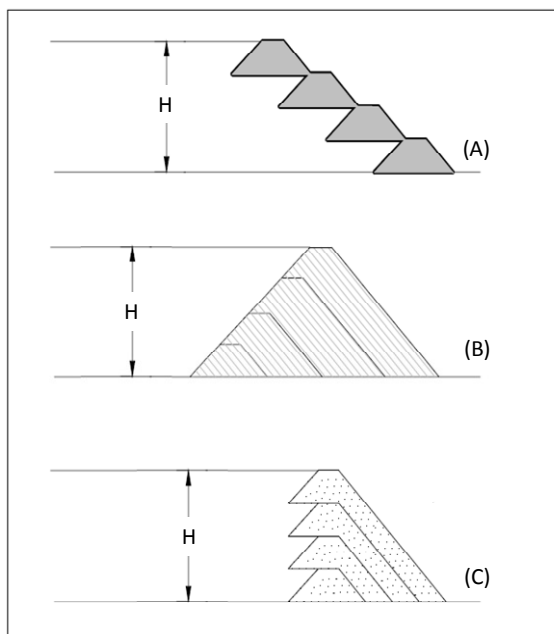


FIGURA 2.5 – Métodos construtivos de barragens de rejeito em várias etapas – (A) Método de Montante, (B) Método de Jusante e (C) Método de Linha de Centro (Fonte – adaptado de Vick, 1983)



FIGURA 2.6 – Disposição de rejeitos através do método de aterro hidráulico (Fonte – Espósito, 2000)



O lançamento do rejeito pode ser concretizado com a utilização de canhões ou ciclones. Os ciclones são utilizados quando o rejeito não apresenta as características geotécnicas adequadas, possuindo a função de retirar a água da polpa, promovendo a recirculação de água no processo industrial, e separar as frações finas e granulares, denominadas respectivamente de “*overflow*” e “*underflow*”. A fração granular, ou *underflow*, é utilizada na construção dos aterros e a fração fina, lama ou *overflow*, é disposta em reservatório.

No que diz respeito ao comportamento do rejeito de minério de ferro, a técnica de aterro hidráulico por meio de ciclones ocasiona uma segregação hidráulica distinta do mecanismo clássico. O mecanismo clássico é descrito por Kealy e Busch (1971) apud Vick (1983) e consiste na formação de zonas de permeabilidades, conforme FIG. 2.7. Devido ao fato da segregação hidráulica selecionar as partículas de acordo com seu peso, próximo ao ponto de descarga é formada uma zona de alta permeabilidade (material granular) e distante do ponto de descarga é formada uma zona de baixa permeabilidade (material fino). Uma zona de permeabilidade intermediária é formada entre as duas zonas supracitadas. Esta afirmação é válida para uma massa específica dos grãos constante.

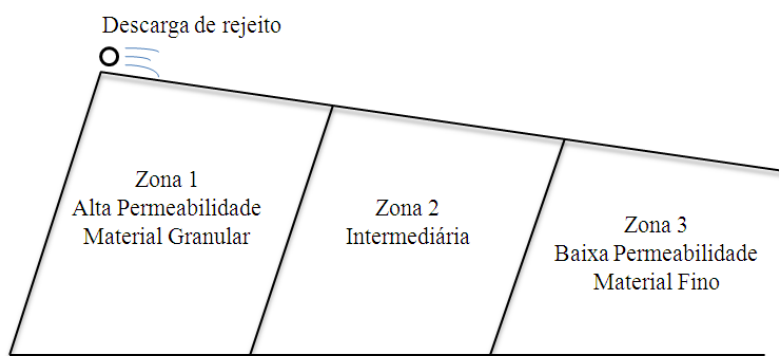


FIGURA 2.7 – Mecanismo clássico da variação da permeabilidade na disposição de rejeitos (Fonte – adaptado de Kealy e Busch, 1971 apud Vick, 1983)

Conforme mencionado, os rejeitos de minério de ferro são compostos por hematita ( $\rho_s$  na ordem de  $5,25 \text{ g/cm}^3$ ) e quartzo ( $\rho_s$  entre  $2,65$  a  $2,70 \text{ g/cm}^3$ ). Desta forma, próximo ao ponto de lançamento do rejeito existirá predominância da fração de maior peso que é composta por partículas de menores diâmetros, que são constituídas por hematita. As partículas mais leves, compostas por quartzo, apresentam maiores diâmetros e são depositadas distantes do ponto de lançamento (Espósito, 2000). Este tipo de segregação faz com que o coeficiente de permeabilidade junto ao maciço seja baixo, pois neste caso a fração fina irá compor o barramento. Este comportamento poderá ocasionar elevação da linha freática no maciço, reduzindo a estabilidade da estrutura.

Lima (2006) afirma que as lamas podem permanecer saturadas por anos se a água resultante do processo de sedimentação e de adensamento não for eliminada, seja por evaporação e/ou por drenagem.

Segundo Espósito (2000) e Milonas (2006), apesar do aspecto econômico vantajoso, o método construtivo de montante aliado à técnica de disposição hidráulica submete a estrutura a riscos como liquefação, elevação da linha freática e *piping*, devido ao fato dos alteamentos serem construídos sobre fundação composta por camadas fofas de rejeito associado a dificuldade de implantação da drenagem interna. Neste âmbito, o método de jusante fornece menores riscos, pois facilita o desempenho geotécnico da estrutura, possibilitando o controle da linha de saturação.

Silva (2010) apresentou uma preocupação com relação à técnica de disposição hidráulica de rejeitos em barragens alteadas para montantes e seu gerenciamento em função da segurança, sugerindo diretrizes para aumento da segurança desses tipos de barragens. Espósito (2000) e Figueiredo (2007) relatam que a ocorrência de acidentes aliada à falta de controle do método de lançamento e, por conseguinte, a dificuldade em se prever o comportamento geotécnico deste tipo de estrutura, ocasionam maiores fatores de riscos geotécnicos.

### 2.5.2 Empilhamento Drenado

Nesta técnica de disposição os rejeitos granulares são depositados sob a forma de pilha, através da técnica de aterro hidráulico. A pilha deve ser dotada de um sistema de drenagem interna eficiente e os rejeitos devem ter coeficiente de permeabilidade tal que permitam a drenagem da camada lançada de forma otimizada com a área operacional disponível e a produção diária. De acordo com Pimenta (2011), os principais objetivos deste método são:

- Obter um maciço não saturado e estável.
- Obter maior densidade e, portanto, maior capacidade e vida útil.
- Obter menor potencial de dano em uma eventual ruptura.
- Obter maior facilidade para o fechamento e recuperação ambiental.
- Aplicação segura do método de montante, com baixo risco de liquefação e de ruptura.

O alteamento da estrutura pode ser feito com o próprio rejeito disposto na pilha, como ilustra a FIG. 2.8. Observa-se também a boa capacidade de suporte que a camada de rejeito apresenta, propiciando o tráfego de equipamentos de terraplenagem para o alteamento da pilha.



FIGURA 2.8 – Camada de rejeito, disposto como empilhamento drenado, sendo escavado (Fonte – Pimenta, 2011)

Este método não pode ser utilizado para disposição de rejeitos finos, pois os mesmos não possuem condições geotécnicas apropriadas. Os rejeitos finos devem ser, portanto, dispostos a parte, quando esta alternativa é adotada.

### 2.5.3 Disposição em cava

A disposição de rejeitos em cava, também denominada “disposição em *pit*” (Lozano, 2006) consiste em se dispor rejeito em minas exauridas ou naquelas em que ainda há extração de minério, conforme ilustrado na FIG. 2.9.

Dentre as vantagens deste método pode-se citar a facilidade de recuperação das áreas lavradas concomitante ao avanço da lavra, redução de impactos ambientais e visuais, redução de riscos, minimização de custos operacionais, facilidade de recuperação da área quando do descomissionamento, dentre outros.



FIGURA 2.9 – Disposição em *pit* (Fonte – Lozano, 2006)

As desvantagens envolvem a logística de extração de minério devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava, pouco volume disponível para disposição de rejeitos dado o grande volume ocupado pela estrutura de contenção (elevado desnível da cava), problemas de percolação e estabilidade (Vick, 1983).

#### 2.5.4 Codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis

Alves (2009) considera que codisposição de rejeitos e estéreis “é a situação em que se misturam previamente os rejeitos ou o rejeito com o estéril para em seguida dispor”. O autor também define a disposição compartilhada como sendo “a situação em que os rejeitos ou o rejeito e o estéril são dispostos num mesmo local, porém sem estarem previamente misturados”. Um exemplo de disposição compartilhada é apresentado na FIG. 2.10.

De acordo com Figueiredo (2007), existem várias maneiras de se realizar a codisposição e disposição compartilhada de estéreis e rejeitos, a saber:

- Disposição de rejeito em pontos específicos no depósito de estéril, formando pequenas camadas.
- Codisposição durante atividades de processamento e transporte ou no próprio depósito de estéril.
- Injeção de rejeito espessado no depósito de estéril através de furos de injeção.

- Disposição de rejeito em camadas finas no depósito de estéril que, após secas, recebem nova cobertura de estéril.



FIGURA 2.10 – Disposição compartilhada de rejeitos e estéreis (Fonte – Australian, 2007)

Além das formas supracitadas há também outras, como a codisposição de rejeitos granulares e finos. Por exemplo, em uma mina de carvão é possível combinar rejeitos grossos e finos da lavagem de carvão para sua disposição, conforme FIG. 2.11. A mistura produz um material trafegável e estável (Australian, 2007).



FIGURA 2.11 – Codisposição de rejeitos granulares e finos (Fonte – Australian, 2007)

Jaouhar, Aubertin e James (2011) investigaram a influência da utilização de inclusão de estéril para acelerar o processo de adensamento de um depósito de rejeitos em forma de polpa. Os fatores que influenciaram significadamente a dissipação de poropressão durante a disposição de rejeitos foram o espaçamento entre as inclusões e a permeabilidade do rejeito. Fatores como comprimento da inclusão de estéril, módulo de Young, anisotropia do rejeito e a razão entre a permeabilidade do rejeito e do estéril não influenciaram significativamente.

#### 2.5.5 Disposição subaérea

Na disposição subaérea o rejeito é disposto em camadas de forma que, anterior ao lançamento da próxima camada, é permitido o adensamento e ressecamento do material da camada lançada. O objetivo é obter um menor volume pela densificação do material, assim como ganho de resistência devido à densificação e ressecamento do rejeito.

Lima (2006) realizou um estudo de retroanálise de um depósito de rejeitos de minério de ferro na barragem de Germano, da Samarco Mineração S.A.. O depósito foi construído via disposição subaérea e, após análises realizadas, o autor verificou que o processo de ressecamento não teve a eficiência esperada. Como consequência, houve impacto na otimização do volume que, neste caso, aproximou-se ao que seria esperado no método de disposição convencional ou mesmo numa codisposição convencional.

#### 2.5.6 Rejeitos Espessados

De acordo com Mapa (2006), “dada as crescentes exigências sócio-ambientais nos cenários interno e mundial, investimentos estão sendo promovidos em melhoria tecnológica, visando produtos de melhor qualidade, menores custos e reduzidos efeitos negativos ao meio ambiente. Os fatos relatados denotam a necessidade de níveis cada vez maiores de produção e qualidade do minério de ferro, concomitantemente com a alimentação das usinas de tratamento com minérios cada vez mais complexos e de menor teor de Fe, dado à necessidade de melhor aproveitamento das reservas. Essa situação antagônica mostra investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para assegurar a manutenção da competitividade e, até mesmo, a sobrevivência das empresas dedicadas à exploração e tratamento do minério de ferro em um cenário de competição global”.

A nítida tendência do aumento da produção rejeitos de minério de ferro se confronta com as dificuldades impostas pelos órgãos ambientais para o licenciamento de novas áreas de disposição de rejeitos. Além disto, existe a preocupação dos órgãos ambientais, diante da atividade minerária, no que diz respeito aos aspectos operacionais, de segurança e possíveis danos associados às barragens que compõem o reservatório para disposição destes rejeitos.

Diante dos fatos expostos nos parágrafos anteriores, é necessário despertar para a necessidade de se estudar e adotar métodos alternativos de disposição de rejeitos. Neste âmbito, a disposição ideal de rejeitos seria aquela que utilizasse menor área possível, reduzindo os passivos ambientais, e oferecesse melhores condições geotécnicas para as estruturas empregadas como disposição, sejam elas pilhas ou barragens. Este último aspecto está diretamente associado à redução de riscos para o meio ambiente e para a população. Conforme citado por Gomes (2009b), esta solução ideal seria a disposição em forma de rejeitos desaguados, que traz consigo vantagens e desvantagens que serão abordadas ao longo deste subitem.

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 desaguamento é, portanto, um processo mecânico.

Para auxiliar o processo de sedimentação podem ser utilizados reagentes. Os reagentes atualmente mais utilizados no processo de espessamento de rejeitos são os floculantes e os coagulantes. Floculantes são polímeros naturais ou sintéticos de alto peso molecular que auxiliam na sedimentação de partículas suspensas. Coagulantes são minerais naturais, tais como cal e sais férricos, que são eficazes para suspensões coloidais, sendo menos eficientes se comparados aos floculantes (Meggyes e Debreczeni, 2006). Nesse contexto, ressalta-se também a importância do pH no estado de agregação e dispersão das polpas.

Azam e Imran (2008) citam que a adição de polímeros no espessamento, para floculação de rejeitos, influencia no comportamento geotécnico durante a disposição, não sendo ainda, todavia, bem compreendida no meio técnico. Ainda de acordo com o autor, a adição destes componentes químicos possui impacto insignificante para o meio ambiente. Entretanto, o impacto ambiental causado pela adição de polímeros carece de estudos complementares.

Doucet e Paradis (2010) afirmam que os espessadores originaram da indústria de carvão e muitos dos conceitos desenvolvidos foram úteis para as teorias utilizadas atualmente.

O funcionamento de um espessador convencional consiste na alimentação da polpa, seguida pela sedimentação das partículas. Na parte superior do tanque a água clarificada (*overflow*) transborda, enquanto que as partículas sedimentadas (*underflow*) são direcionadas por pás até o cone de descarga. Uma seção típica de um espessador pode ser vista na FIG. 2.12.

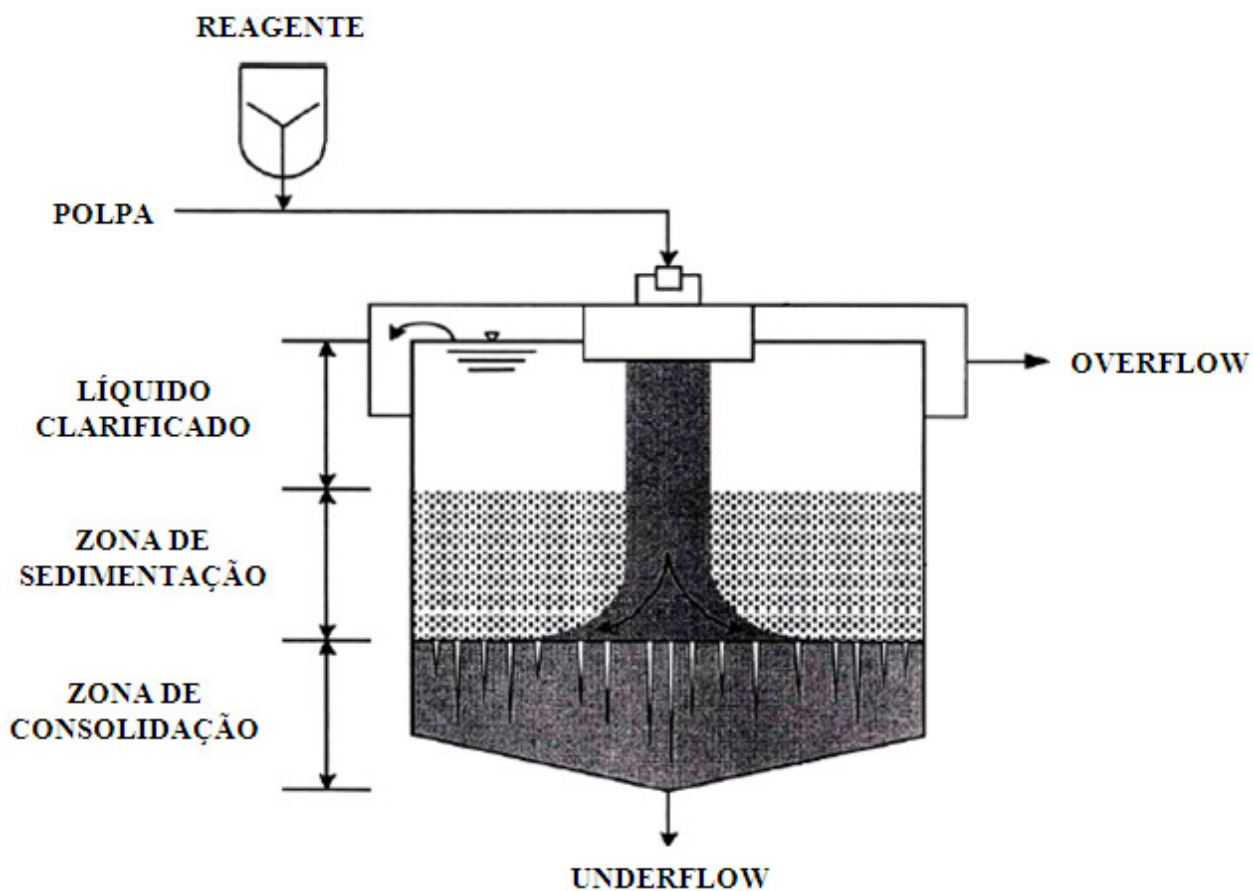


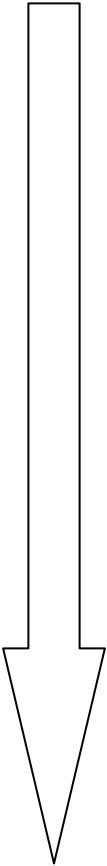








FIGURA 2.12 – Seção típica de um espessador (Fonte: adaptado de Azam e Imran, 2008)

Guimarães (2011) apresenta os tipos de espessadores usualmente utilizados para polpas de minério de ferro, conforme TAB. 2.2.



TABELA 2.2 – Tipos de espessadores comumente utilizados para o espessamento de rejeitos de minério de ferro

(Fonte: adaptado de Guimarães, 2011)

Tempo	Tipo	Forma	Características
	<p>Convencional</p> 		<p>Ação ineficiente do floculante,</p> <p>Grande área, Ø até 150m,</p> <p>Obtém baixa densidade.</p>
	<p><i>High Rate</i> ou <i>High Capacity</i></p> 		<p>Adição de floculante,</p> <p>Menor área se comparado ao Convencional,</p> <p>Obtém densidade similar ao Convencional.</p>
	<p><i>High Density</i></p> 		<p>Menor área e maior altura que o <i>High Capacity</i>,</p> <p>Obtém máxima densidade.</p>
	<p><i>Deep Cone</i></p> 		<p>Aumento da altura em relação ao <i>High Density</i>,</p> <p>Maior redução de área,</p> <p>Produção de pasta.</p>

É possível observar na TAB. 2.2 o desenvolvimento histórico dos espessadores. Com o passar dos anos e com o desenvolvimento de novas tecnologias e reagentes, a geometria destes equipamentos tiveram sua área em planta reduzida e sua altura majorada.

A FIG. 2.13 apresenta as diversas consistências obtidas para os rejeitos espessados com o aumento do teor de sólidos, que é uma característica intrínseca do material. Não foi estabelecido o teor de sólidos da fronteira para cada consistência do rejeito em função desse valor ser uma característica

do próprio rejeito e do processo de eliminação da água. Além disso, há poucos dados publicados na literatura técnica para rejeitos de minério de ferro. Experimentos publicados em uma fonte bibliográfica reportam valores de teores de sólido (em massa) para as pastas de rejeito de minério de ferro variando de 60 a 80% (Osorio, Araújo e Valadão, 2008).

Na extremidade esquerda do fluxograma encontra-se a polpa, de baixa densidade e alto teor de água. Para o transporte da polpa via tubulação existe uma velocidade crítica onde, acima desta, o fluxo é turbulento e arrasta os sólidos, mas abaixo desta os sólidos se sedimentam e podem tamponar a tubulação. A polpa também é suscetível ao fenômeno da segregação durante disposição, conforme mencionado no item 2.5.1.

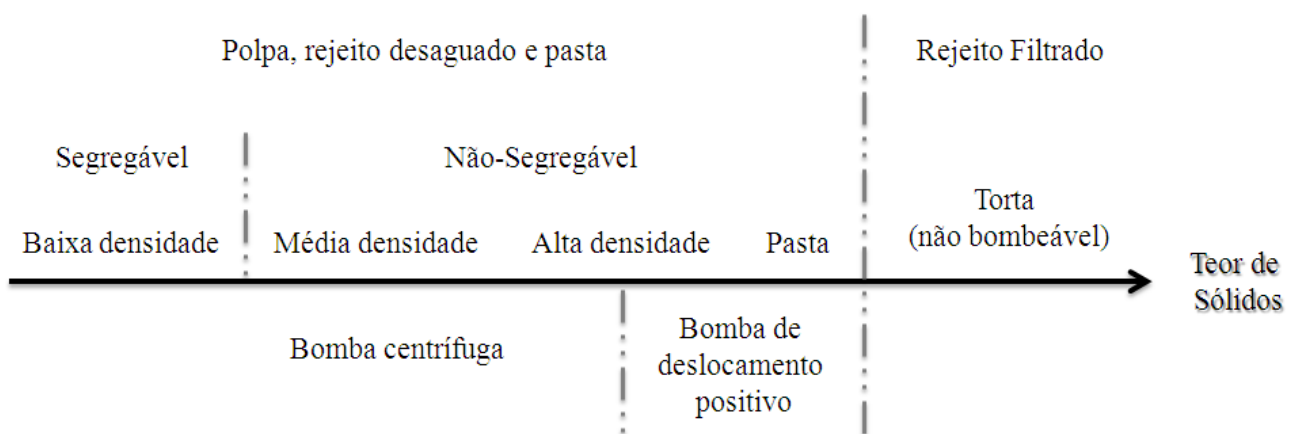


FIGURA 2.13 – Consistências do rejeito com o aumento do teor de sólidos (Fonte: adaptado de Slottee e Johnson, 2009)

O rejeito desaguado, ou polpa de alta densidade, resulta do aumento da densidade da polpa. Nesta consistência, ainda apresentam segregação e liberação de água em pequenas quantidades, sendo o transporte deste material também condicionado à sua velocidade crítica.

A pasta resulta do aumento da densidade da polpa de alta densidade. Não apresenta uma velocidade de escoamento crítica, sendo o transporte realizado por meio de bombas de deslocamento positivo. A liberação de água livre é insignificante e não apresenta segregação durante transporte e disposição. Estes fatores possibilitam que o transporte via tubulação possa ser interrompido por um curto período, sem que ocorra o tamponamento dos tubos e sedimentação de sólidos.

Na extremidade direita do fluxograma encontra-se o rejeito filtrado, ou torta, obtido através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Os rejeitos nessa consistência apresentam

comportamento geotécnico similar ao dos solos naturais, com umidades relativamente baixas. O transporte deste tipo de rejeito pode ser realizado via caminhões ou transportadores de correia para as áreas de destino, dependendo do seu teor de umidade, não sendo passível de bombeamento. Um enfoque maior será apresentado sobre disposição de rejeitos filtrados, ou tortas, no item 2.6 desse capítulo.

Os aspectos relacionados à fluidez e consistência de rejeitos espessados podem ser obtidos através de ensaios de “*slump test*”, ou teste do cone, conforme procedimento de ensaio padronizado pela NBR NM 67 (ABNT, 1998). A FIG. 2.14 apresenta os ensaios de *slump test* para diferentes consistências de rejeito.



FIGURA 2.14 – *Slump test* sendo realizado para um mesmo rejeito e diferentes teores de sólido em peso (Fonte: Grabinsky, Theriault e Welch, 2002)

A conformação durante a disposição também pode ser previamente avaliada. Para tanto, ensaios de “*flume test*”, ou teste de calha, podem ser realizados para se conhecer o ângulo final de disposição. Este aspecto é importante, pois a partir do momento em que se aumenta o teor de sólidos é possível obter ângulos de disposição maiores e, conseqüentemente, maior volume disposto, conforme FIG. 2.15.

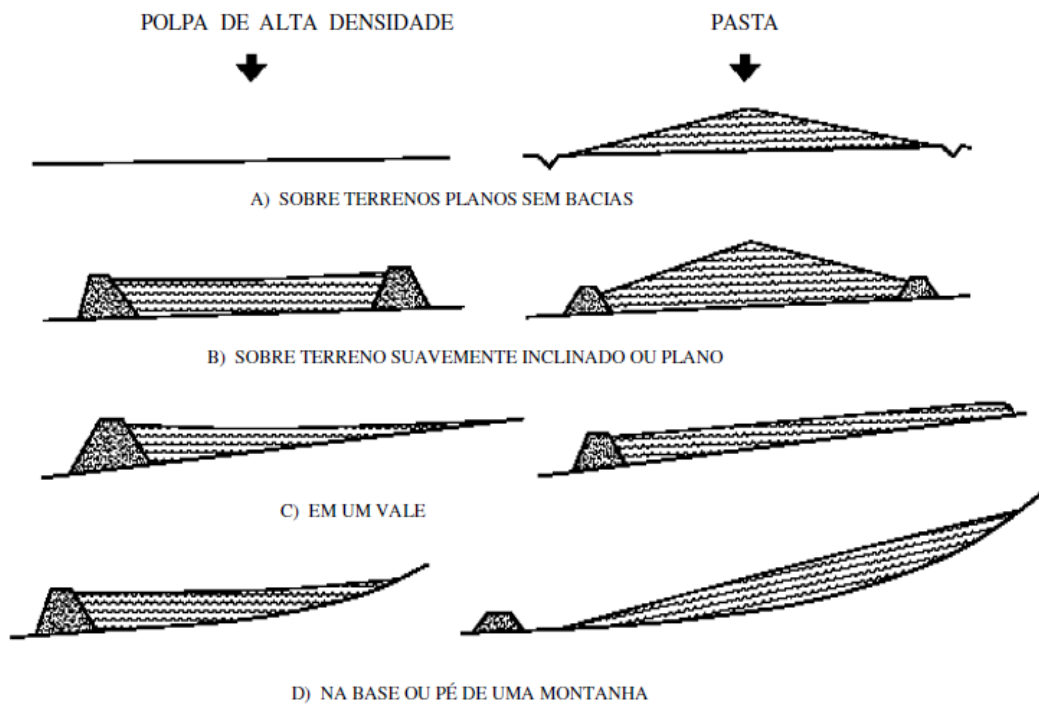


FIGURA 2.15 – Croquis qualitativos de disposição de polpas e pasta (Fonte: Laudriault, 2002 apud Osorio, 2005)

O *flume test* é de simples execução e consiste em simular, em laboratório ou em campo, o processo de disposição dos rejeito medindo-se o ângulo de disposição final. A FIG. 2.16 ilustra o procedimento deste ensaio em campo.



FIGURA 2.16 – *Flume test* sendo conduzido para determinação do ângulo de disposição (Fonte: Slottee, Johnson e Crozier, 2008)

Através de ensaios laboratoriais, Robinsky (1999) demonstra que os rejeitos exibem uma única mudança gradual do estado não-segregável para o segregável, no que diz respeito ao seu ângulo de disposição. Esta mudança gradual é ilustrada na FIG. 2.17.

Os rejeitos granulares não-segregáveis atingem o ângulo de pico a um determinado teor de sólidos, onde a água e as partículas finas não exercem influência devido ao fenômeno da segregação. Com o aumento do teor de sólidos começa a ser criada uma massa homogênea, onde os finos influenciam o ângulo de disposição. Depois de atingida a condição de não-segregável, o ângulo de disposição tenderá a aumentar com o aumento do teor de sólidos.

Há de se ter em consideração, todavia, que o teor de sólidos obtido na planta de espessamento de rejeitos nem sempre será uniforme. Conforme mencionado por Robinsky (1999), esta variação pode ser resultado da composição dos rejeitos, da usina de operação ou até mesmo mudanças na acidez (pH ou potencial hidrogeniônico) do rejeito. Manutenções, eventuais falhas de equipamentos e até mesmo mudanças no pH do rejeito podem também ser responsáveis por mudança no teor de sólidos dos rejeitos, afetando o ângulo de disposição.

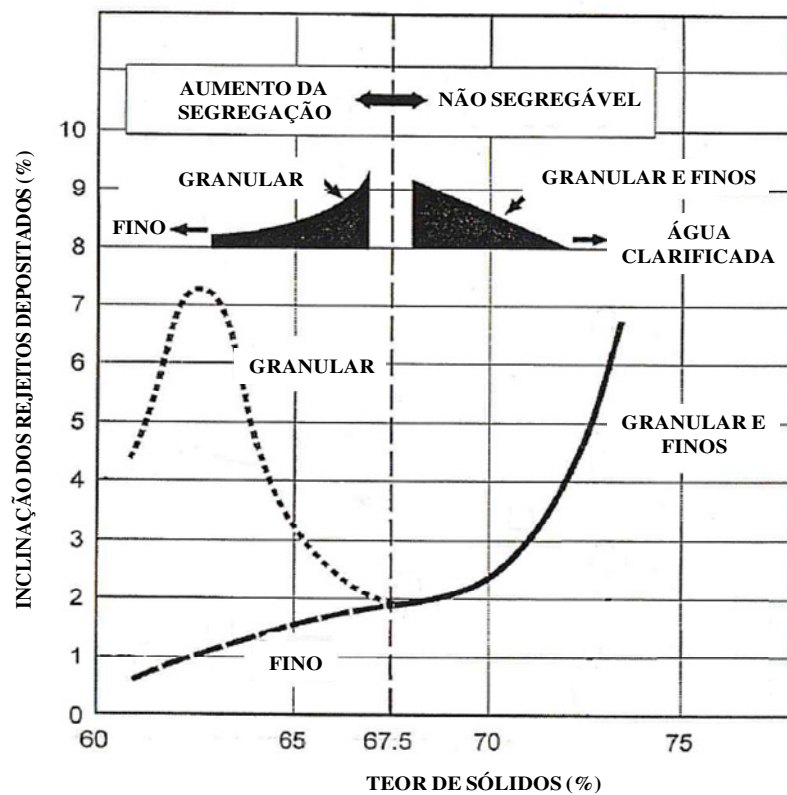


FIGURA 2.17 – Testes laboratoriais ilustrando a mudança progressiva do comportamento de rejeitos não-segregáveis e rejeitos segregáveis (Fonte: adaptado de Robinsky, 1999)



Na FIG. 2.18, Robinsky (1999) mostra que, apesar da variação do teor de sólidos e do efeito da diluição devido às precipitações, quando o teor de sólidos retornar ao valor projetado as camadas a serem dispostas serão capazes de corrigir o ângulo final de disposição.

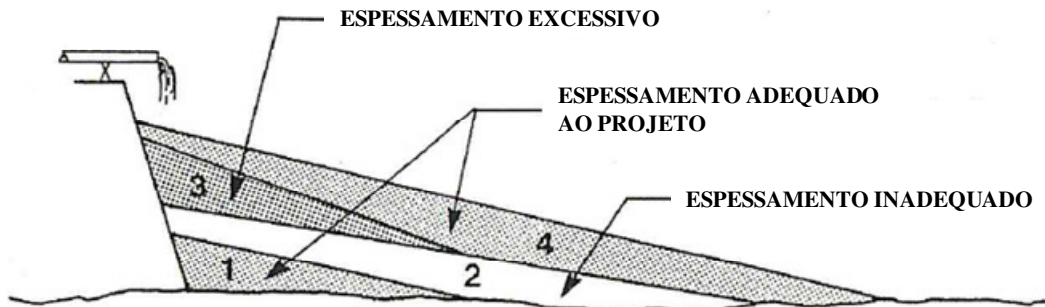


FIGURA 2.18 – Modificação da inclinação de disposição mediante variação do teor de sólidos dos rejeitos  
(Fonte: Robinsky, 1999)

Entretanto, se o teor de sólidos for muito abaixo do esperado, o fluxo de rejeitos no reservatório pode ocasionar problemas de erosão e carreamento de partículas ao longo de todo o depósito, conforme pode ser visto na FIG. 2.19.



FIGURA 2.19 – Erosão laminar em um depósito de rejeitos espessados (Fonte: Robinsky, 1999)

A FIG. 2.20 revela um perfil de um depósito de rejeitos espessados. É possível visualizar que, embora o rejeito seja homogêneo, a estrutura formada é laminar. As discontinuidades verticais são oriundas do ressecamento e contração do rejeito (Robinsky, 1999). Esta característica irá influenciar o comportamento geotécnico do depósito de rejeitos, no que diz respeito à resistência, permeabilidade e compressibilidade.

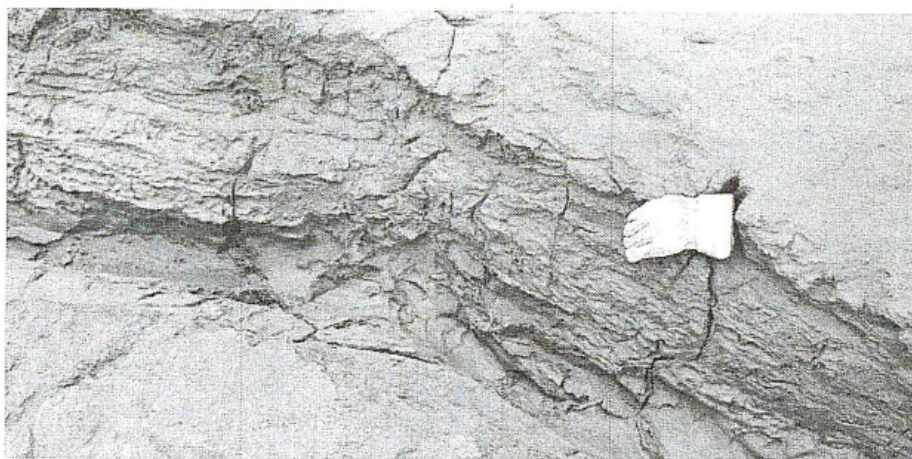


FIGURA 2.20 – Estrutura laminar formada pela disposição dos rejeitos espessados (Fonte: Robinsky, 1999)

Slottee, Johnson e Crozier (2005) realizaram ensaios em espessador de escala piloto para produção de pastas em rejeito de minério de ferro. Os autores obtiveram um teor de sólidos variando de 55 a 80%, dependendo da granulometria do rejeito e das condições de operação do espessador. No que diz respeito à disposição destes rejeitos, obtiveram ângulos que variaram de 2 a 8%.

Hernández et al (2009) analisaram as características de pastas de rejeito de minério de ferro, tais como consistência, fluidez e viscosidade. Os autores obtiveram um teor de sólidos entre 71 a 75% e um ângulo de disposição pelo método de calha de até 11%. Osorio, Araújo e Valadão (2008) também executaram *flume test* em pastas de minério de ferro, variando a inclinação da base da calha de 0 a 3% com relação a horizontal e a percentagem de sólidos em massa. A “amostra I”, composta por hematita, refere-se a uma amostra de lama e a “amostra II”, composta por hematita e quartzo, refere-se ao rejeito de flotação. Conforme FIG. 2.21, o aumento da inclinação da base da calha até 3% proporciona redução não muito significativa no ângulo de repouso da pasta.

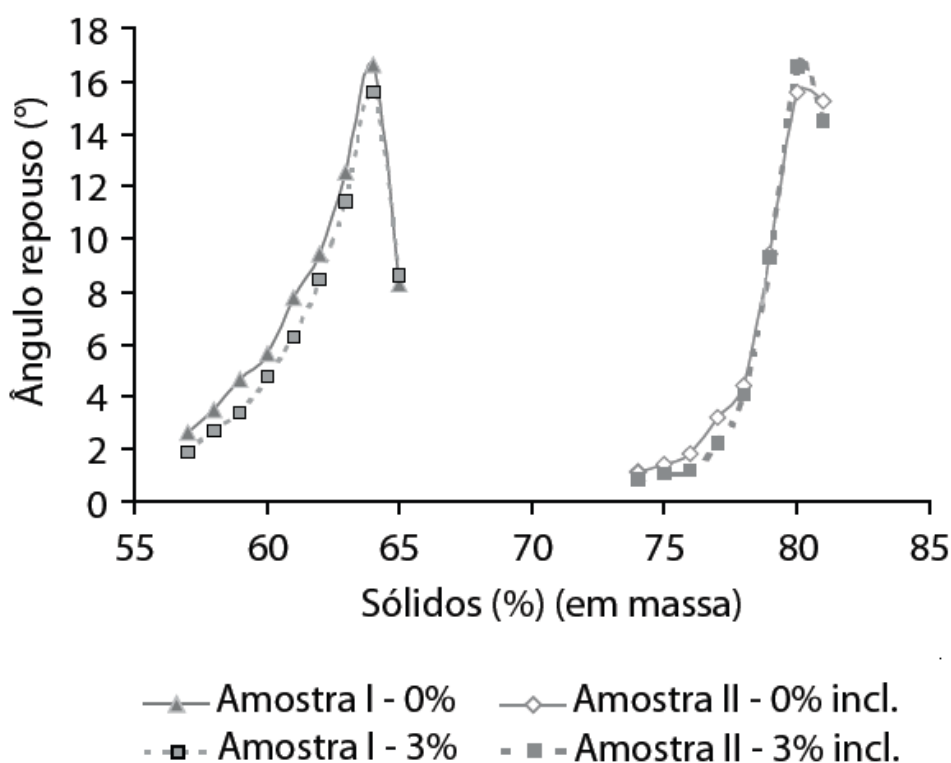


FIGURA 2.21 – Variação do ângulo de disposição com a adoção de diferentes inclinações (incl.) de calha e percentagens de sólidos (Fonte: Osorio, Araújo e Valadão, 2008)

Em escala real, o ângulo de disposição dos rejeitos espessados dependerá da forma como os mesmos são dispostos, ou seja, dependerá da energia potencial que será transformada em energia cinética, excetuando-se as perdas de energia que ocorrem durante o escoamento. É de se esperar, portanto, que o ângulo de disposição final em um reservatório de rejeitos espessados não alcançará o mesmo valor obtido em um *flume test* realizado em escala piloto. Jewell (2010) corrobora a afirmação anterior, enfatizando ainda que não existe um ensaio capaz de fornecer o ângulo de disposição com eficácia. O autor afirma que, na fase de projeto, é mais prudente considerar o ângulo de disposição situado entre 2 a 5%.

Fourie e Gawu (2010) alertam que testes de calha não podem ser utilizados para prever o ângulo de disposição de rejeitos desaguados sem incluírem o efeito de atrito da parede. Quando este efeito é ignorado os ângulos previstos em testes de calha são mais íngremes do que aqueles alcançados no campo, principalmente se a disposição é feita em camadas muito finas no ensaio.

Barreda (2008) cita que a utilização de aditivos, como exemplo a cal, pode mudar a condição de pH da pasta ou polpa espessada alterando as interações inter-particulares. Como resultado desta alteração tem-se o ganho de incremento no ângulo de disposição, como mostrado na FIG. 2.22. O



autor menciona ainda que, em alguns casos, a adição de aditivos pode reduzir a dosagem de floculante, tamanho e/ou número de espessadores.

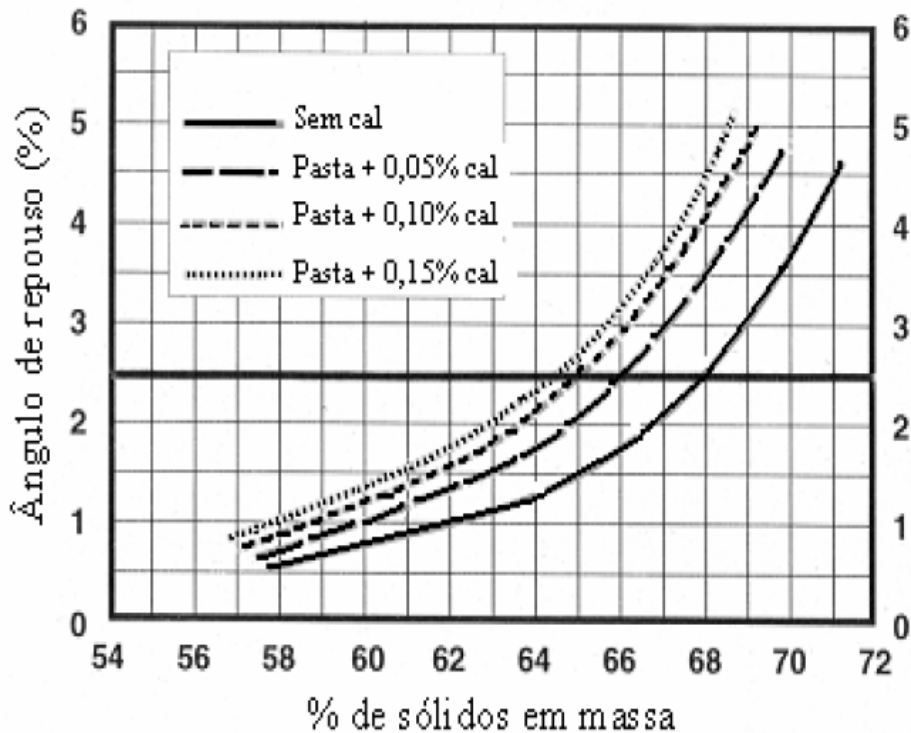


FIGURA 2.22 – Variação do ângulo de repouso para diferentes adições de cal (Fonte: Robinsky, 2002 apud Barreda, 2008)

Therriault, Frostiaik e Welch (2003) descreveram as vantagens do método de disposição de pasta através de múltiplas torres de disposição. Esta forma de disposição, realizada em ciclos, é utilizada para promover a consolidação, ganho de resistência e atenuação da erodibilidade da pasta, através de sua disposição em camadas finas. Segundo os autores, quando a pasta é depositada em espessuras maiores que 1m acaba por obter resistência com a profundidade de forma lenta e demanda muito tempo para obter resistência superficial apropriada. Além disso, as profundas fendas de tração formadas aumentam a infiltração da água. A FIG. 2.23 apresenta ilustrações deste método de disposição de pastas.



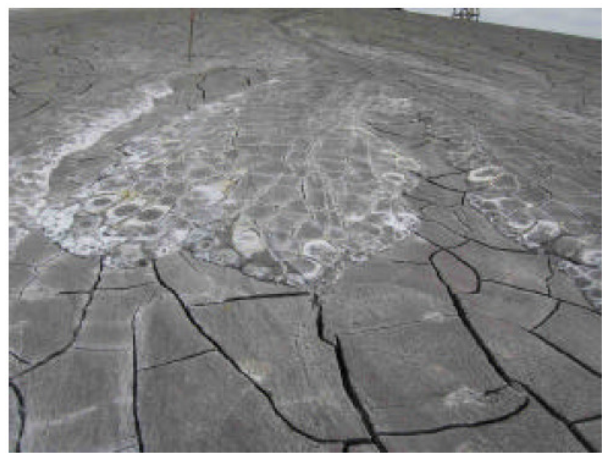
(a) Início da disposição por torres.



(b) Disposição progressiva formando um cone.



(c) Três camadas finas de pasta sobrepostas.



(d) Camada fina de rejeito sobreposta ao rejeito ressecado.

FIGURA 2.23 – Detalhes da disposição de pasta em torres, formando camadas finas (Fonte: Theriault, Frostiaik e Welch, 2003)

Diante dos conceitos aqui expostos, destacam-se as vantagens obtidas pela disposição de rejeitos espessados, comparados com a técnica convencional (polpa):

- Redução da água armazenada no depósito de disposição de rejeitos, reduzindo custos do sistema de disposição, causando menor impacto ambiental. Ainda em relação ao impacto ambiental deve-se levar em consideração a área impactada, tendo em vista a necessidade de barragens de contenção de água. Conforme citado por Robinsky (1999), a redução do volume total a ser armazenado aliado à redução do lago formado acima do depósito de rejeitos faz com que as barragens de contenção de rejeitos, quando necessárias, reduzam drasticamente de altura e, conseqüentemente, de volume.
- A recirculação de água da planta de espessamento de rejeitos para a planta de processos é possível. Além disso, Robinsky (1999) comenta que os rejeitos espessados submersos não se

misturam imediatamente com a água. Este comportamento, associado à inclinação elevada do talude, possibilita a formação de um depósito de água clarificada (assim como ocorre para a disposição de lamas), que também pode ser bombeada para em seguida ser tratada e reutilizada na planta de processo.

- Redução da área em planta necessária para a disposição de rejeitos, o que reduz o tempo de reabilitação futura desta área.
- Melhores condições de recuperação da área no descomissionamento. Devido à inclinação obtida em um depósito de rejeitos espessados, a superfície é sujeita ao rápido escoamento e secagem, propiciando a existência da vegetação. Além disso, as operações necessárias para a execução de uma camada de solo superficial e revegetação de toda a área tornam-se mais fáceis e podem ser realizadas através de técnicas convencionais, dada a boa capacidade de suporte para suportar o tráfego de veículos. A cobertura de solo superficial pode não ser necessária, exceto nos casos onde as características químicas do rejeito inibem o crescimento da vegetação. Adicionalmente, a eficácia dependerá das características do rejeito. A FIG. 2.24 ilustra o problema da vegetação em um depósito de rejeitos convencionais, onde se observa ausência de vegetação nas depressões formadas, onde há tendência de acumulação de água da chuva (Robinsky, 1999).



FIGURA 2.24 – Vista do tratamento de superfície para uma área de disposição convencional (polpa), onde há depressões e acúmulo de água (Fonte: Robinsky, 1999)

- Possibilidade de uso como material de fundação, assim como é feito para os empilhamentos drenados e barragens alteadas para montante.
- As melhores características de permeabilidade e estabilidade, associadas à menor área ocupada, ocasionam menores riscos, dependendo ainda da qualidade da construção e da

gestão dessas estruturas. Mesmo em caso de ruptura, o fluxo seria menor e mais facilmente controlado, tornando-se um problema local. Em contrapartida, se ocorre ruptura da barragem de contenção no caso da disposição na forma convencional, toda a polpa presente no reservatório se liquefaz e, neste estado, é capaz de fluir por quilômetros de distância à jusante. Adicionalmente, salienta-se que o rejeito espessado também pode sofrer liquefação, dependendo de suas características e do tipo de carregamento.

- Pode ocorrer redução do custo global do empreendimento quando se considera os custos do descomissionamento dessas estruturas. Apesar de, em geral, ocorrer o aumento dos custos, a tendência de redução dos custos dos espessadores e filtros contribuirão significativamente para a viabilidade dessas dos rejeitos espessados em regiões não desérticas.

Entretanto há que se considerar a existência de aspectos limitadores e as desvantagens da aplicação da tecnologia de espessamento de rejeitos. Dentre estes aspectos destacam-se:

- A taxa de produção deve ser pertinente com a tecnologia de espessamento de rejeitos adotada.
- A reologia do rejeito deve permitir a aplicação da técnica de espessamento de rejeitos.
- Existência de mão de obra especializada.
- Condições topográficas podem inviabilizar o uso da tecnologia de espessamento de rejeitos frente ao método de disposição convencional.
- Necessidade de um alto nível de tecnologia e infraestrutura locais.
- Aumento do consumo de energia.
- Necessidade da construção de uma barragem para reservar a água extraída dos rejeitos e para coleta da água da chuva e sedimentos, que deve estar localizada a jusante do depósito de rejeitos.
- Eventual necessidade de reservar a água de processo, mediante adoção de novas estruturas de contenção, tais como barragens.
- Custos elevados associados à infraestrutura.
- Melhor condições de disposição em topografias planas, principalmente em ambientes de intensa pluviometria.

No caso da formação de um lago no depósito de rejeitos espessados Robinsky (1999) relata que, abaixo do lago formado, o rejeito será capaz de alcançar taludes duas vezes mais íngremes se comparados aos rejeitos que estarão acima do lago. Isto ocorre devido à redução da densidade de  $1\text{g/cm}^3$  (condição submersa) e também devido à atenuação da quantidade de movimento da camada

que está fluindo quando esta encontra o depósito de água. Esse comportamento também é observado nos reservatórios de disposição de lamas.

Uma breve comparação entre alguns métodos de disposição de rejeitos abordados neste trabalho é apresentada por Lima (2006), conforme TAB. 2.3. De acordo com o autor, qualquer que seja o método de disposição a ser utilizado é importante que a escolha se fundamente numa argumentação mais racional e menos empírica, utilizando toda a tecnologia disponível para o desenvolvimento do projeto. Isto inclui o entendimento das características e das restrições de cada técnica de disposição de rejeitos, bem como a caracterização do próprio rejeito, aliadas à comparação das mesmas em uma determinada situação. Desta forma, é possível melhorar a qualidade dos sistemas de disposição, além de aumentar as garantias de segurança dos depósitos.

TABELA 2.3 – Comparação entre alguns métodos alternativos de disposição de rejeitos (Fonte: Lima, 2006)

	Subaérea	Espessado	Pasta
Densidade Final	Média a alta	Média a alta	Alta
Segregação	Alta a leve	Leve	Nenhuma
Água sobrenadante	Alta a alguma	Alguma a nenhuma	Nenhuma
Percolação	Alta a alguma	Alguma	Insignificante
Reabilitação	Após algum tempo	Quase imediata	Imediata
Permeabilidade	Média a baixa	Baixa	Muito baixa
Aplicação	Na superfície	Na superfície	Na superfície e subterrânea
Consumo de água	Alto a médio	Médio	Baixo
Custos	Médio a alto	Alto	Alto

## 2.6 Rejeitos filtrados

A filtração de rejeitos consiste na separação de sólidos e líquidos através da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido. Neste processo, elevadas percentagens de fração fina podem inviabilizar a técnica de filtração.

Os rejeitos filtrados podem ser filtrados a úmido, denominados de (“*wet cake*”) ou filtrados a seco (“*dry cake*”). O rejeito filtrado a úmido apresenta grau de saturação próxima de 100%. O rejeito filtrado a seco apresenta de 70 a 85% de grau de saturação (Davies, 2011).

Guimarães (2011) afirma que, para que ocorra a filtração, é necessária a ação de uma força incidente sobre as partículas, que pode ser obtida através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação. Nas usinas de minério de ferro o autor menciona que 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. Guimarães (2011) ainda destaca que uma das principais vantagens da filtração a pressão positiva é a produção de tortas com menor umidade, se comparada com outras técnicas de filtração.

Cadwell e Zyl (2011) detalhou a história da disposição de rejeitos, de mais de 30 anos, desde o método de aterro hidráulico até rejeitos espessados e rejeitos alterados por polímeros. De acordo com o autor, o primeiro artigo que apresenta o método de *dry stack* (pilha de rejeito filtrado e compactado) é de autoria de Robertson (1986), que sugeriu a ideia como método de disposição de rejeitos para a mina *Greens Creek*, no Alaska. O conceito de rejeito espessado foi introduzido em 1960 por Robinsky.

Davies (2011) menciona que a técnica de filtração de rejeitos está se tornando cada vez mais comum em muitas minas no mundo. De acordo com o autor, existem mais pilhas de rejeitos filtrados dispostos em superfície do que disposição de rejeitos em forma de pasta. A FIG. 2.25 apresenta o número de instalações de rejeitos espessados numa escala global.

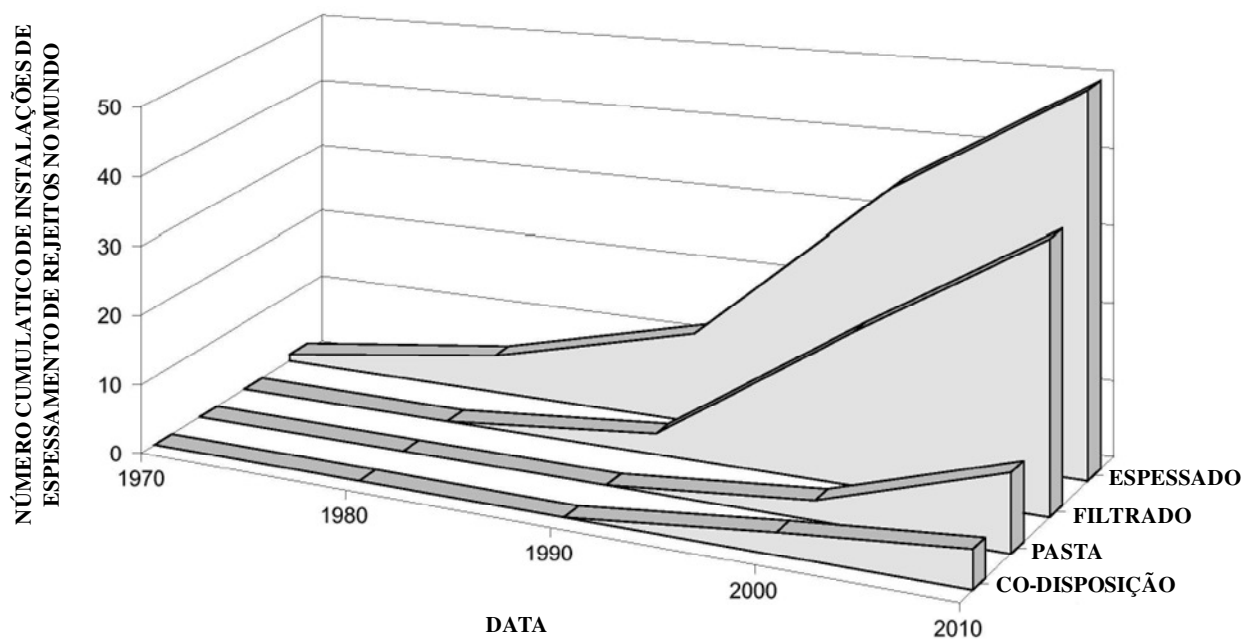


FIGURA 2.25 – Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração (Fonte: Davies, 2011)



Embora a técnica de filtragem seja mais adotada mundialmente, se comparada com a técnica de disposição de rejeitos em pasta, não existem muitos trabalhos publicados no meio técnico a respeito de rejeitos filtrados, o que não acontece com as pastas. Davies (2011) corrobora esta afirmação e relata que as razões para isso são desconhecidas. O autor afirma ainda que muitas vezes a ausência de estudos leva a tomadas de decisões equivocadas.

De acordo com Davies (2004), a instalação de La Coipa, no Chile, é uma das maiores instalações de rejeito filtrado no mundo, sendo apresentada na FIG. 2.26. O local está situado em região sísmica e tem confirmado sua integridade estrutural ao longo dos anos.



FIGURA 2.26 – Operação em *dry stack* de La Coipa (Fonte: Davies, 2004)

Lara e León (2011) apresentaram detalhes operacionais e de projeto das instalações de Cerro Lindo, Peru, onde 55% dos rejeitos são dispostos em forma de pasta nas minas subterrâneas e 45% são dispostos como rejeitos filtrados na superfície. A alternativa de disposição para rejeitos filtrados em *dry stack* foi selecionada, dentre outros motivos, por ocupar menor área de disposição, reduzindo o impacto ambiental e a resistência social. Além disso, os autores realizaram estudos de viabilidade, e concluíram que a disposição em *dry stack* apresentou elevado custo de operação, mas o menor custo total das alternativas avaliadas, basicamente devido à redução significativa das alturas das barragens de contenção. O sistema de disposição em *dry stack* consistiu de uma pilha de rejeito filtrado e um dique de contenção de sedimentos, apenas. O rejeito filtrado, após disposto, necessitava ainda passar por processo de secagem até atingir uma umidade tal que fosse possível atingir a densidade

seca máxima especificada para a compactação. Esta operação durava cerca de 3 a 5 dias e consistia de descarga, espalhamento, secagem e compactação.

Ainda em Cerro Lindo foi realizada a codisposição, onde o rejeito filtrado era devidamente misturado ao estéril e disposto à montante do *dry stack*. A FIG. 2.27 ilustra a disposição em *dry stack* de Cerro Lindo.



FIGURA 2.27 – Operação em *dry stack* de Cerro Lindo (Fonte: Lara e León, 2011)

Apesar da disposição de rejeito filtrado apresentar custo elevado associado à planta de desaguamento e ao transporte e disposição final, deve-se ter em mente a amortização destes custos na fase de desativação do empreendimento (Gomes, 2009b).

As vantagens que este método representa são todas aquelas já mencionadas neste trabalho, porém obtendo-se melhores resultados devido à maior eficiência de desaguamento. Atualmente, haja vista o aumento da geração de rejeitos de minério de ferro e o espaço físico limitado para a sua disposição, esta alternativa pode tornar-se bastante atrativa. Entretanto, deve-se levar em conta a percentagem de lama presente.



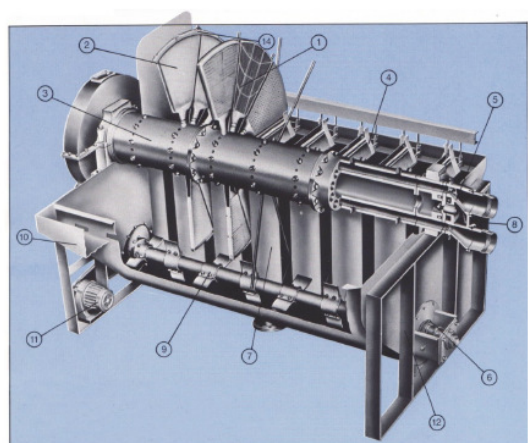
Davies (2011) relata que os dois principais motivos que levam à escolha da técnica de filtração de rejeitos são a recuperação de água do sistema, que balanceia o custo de capital e os custos de operação, e as condições topográficas.

A seguir estão apresentados os tipos de filtros citados neste trabalho, a engenharia de processos por trás da filtração de rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, além de aspectos construtivos e detalhes do descomissionamento e recuperação da disposição em *dry stack*.

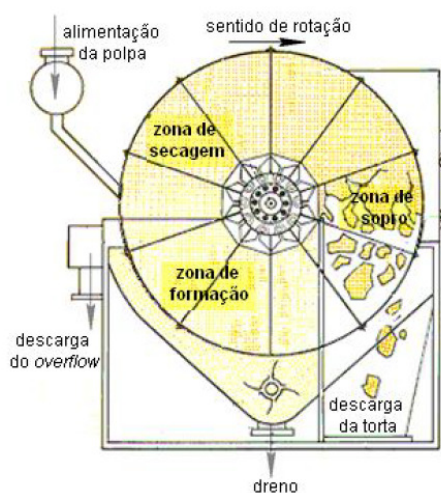
### 2.6.1 Tipos de Filtros

Neste subitem estão apresentados alguns tipos de filtros citados ao longo deste trabalho. As informações aqui apresentadas foram baseadas nos trabalhos de Amarante (2002) e Guimarães (2011).

Filtros de discos convencionais são formados por uma série de discos espaçados e ligados em um tubo que passa pelo eixo. O tubo, por sua vez, é ligado em uma válvula automática que é conectada às tubulações de vácuo e de ar comprimido. Cada setor do filtro fica sob a ação de vácuo, utilizado para a formação e secagem da torta ou ar comprimido, responsável pela descarga da torta. Em um ciclo de rotação os discos são submersos na bacia e posteriormente o material é seco à vácuo, sendo descarregado em uma unidade própria. A FIG. 2.28 apresenta detalhes do equipamento.



- |                        |                               |
|------------------------|-------------------------------|
| 1- setor               | 8- entrada do ar do sopro     |
| 2- elemento filtrante  | 9- sistema de agitação        |
| 3- barril central      | 10- coleta de overflow        |
| 4- defletor            | 11- motorização do agitador   |
| 5- válvula de vácuo    | 12- tanque: estrutura externa |
| 6- selagem da agitação | 13- alimentação: distribuidor |
| 7- chute de descarga   | 14- tirantes                  |



(a) Filtro tipo disco convencional (Amarante, 2002)

(b) Ciclo operacional (Guimarães, 2011)

FIGURA 2.28 – Filtro de disco convencional

Em filtros que utilizam placas cerâmicas, denominados filtros de discos cerâmicos, a capilaridade atua facilitando a filtração, substituindo, em parte, a ação da bomba de vácuo e reduzindo custos com energia.

Nos filtros hiperbáricos, mostrado na FIG. 2.29, é possível aplicar uma diferença de pressão extra, superior à do vácuo de secagem nos filtros convencionais. Também denominados filtros de discos encapsulados, o filtro é instalado dentro de uma cápsula preenchida com ar comprimido e opera hermeticamente fechado. A descarga da polpa, do lado externo do equipamento, é realizada através de um sistema de válvulas e portinholas especiais, não necessitando a abertura do mesmo.

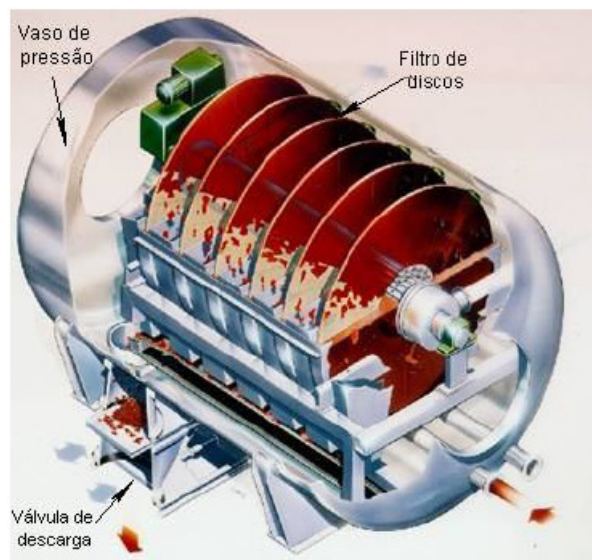


FIGURA 2.29 – Filtro de disco hiperbárico (Fonte: Guimarães, 2011)

Nos filtros horizontais de correia a filtração se dá pela aplicação do vácuo no mesmo sentido da força gravitacional. Estes tipos de filtros possuem ampla faixa de aplicação, desde materiais mais granulares (100 a 2000 $\mu$ m) até materiais finos (10 a 100 $\mu$ m), produzindo tortas com baixa umidade. Este tipo de equipamento também apresenta a possibilidade de lavagem do meio filtrante, que se encontra posicionado sobre a correia de suporte. Maiores detalhes dos componentes de um filtro horizontal de correia estão apresentados na FIG. 2.30.

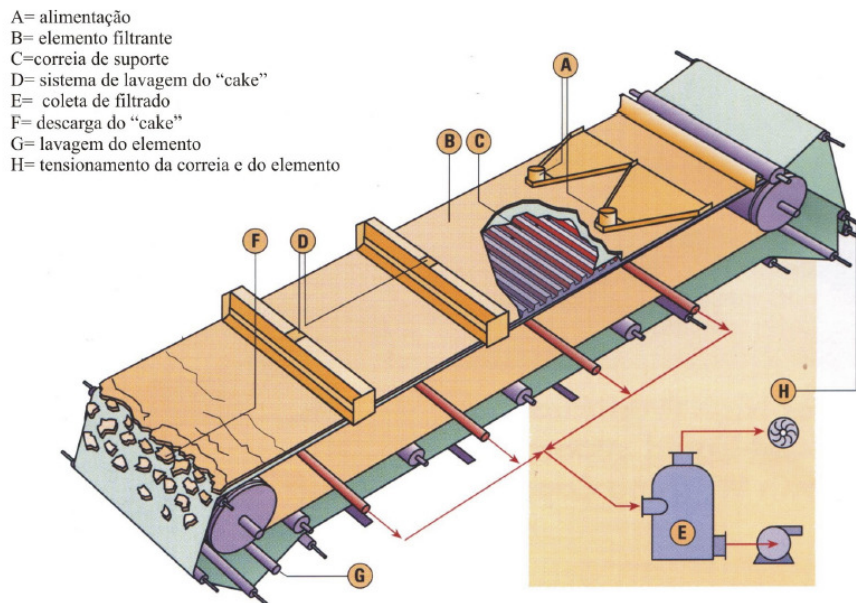


FIGURA 2.30 – Filtro horizontal de correia (Fonte: Amarante, 2002)

Os filtros tipo prensa são mais apropriados para materiais finos. O ciclo compreende as etapas de bombeamento de polpa, prensagem, secagem, abertura, descarga e fechamento. Os filtros podem ser do tipo horizontal ou vertical, conforme FIG. 2.31 e FIG. 2.32, respectivamente.

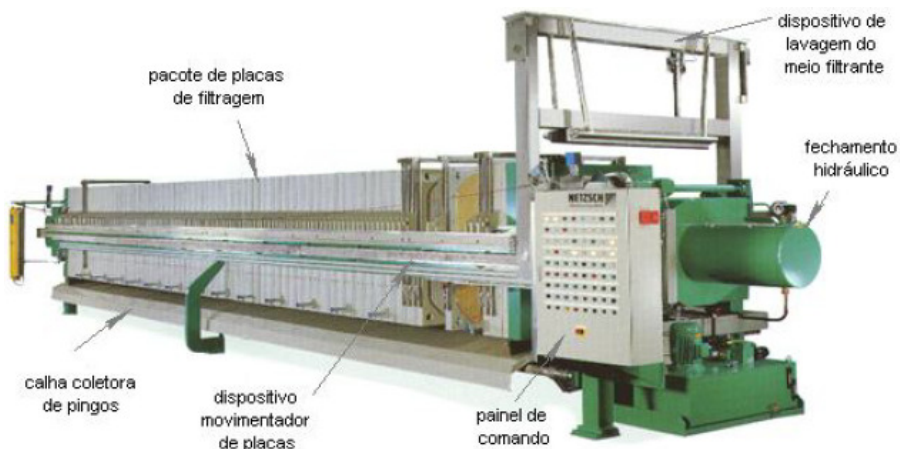


FIGURA 2.31 – Filtro prensa de placas verticais (Fonte: Guimarães, 2011)

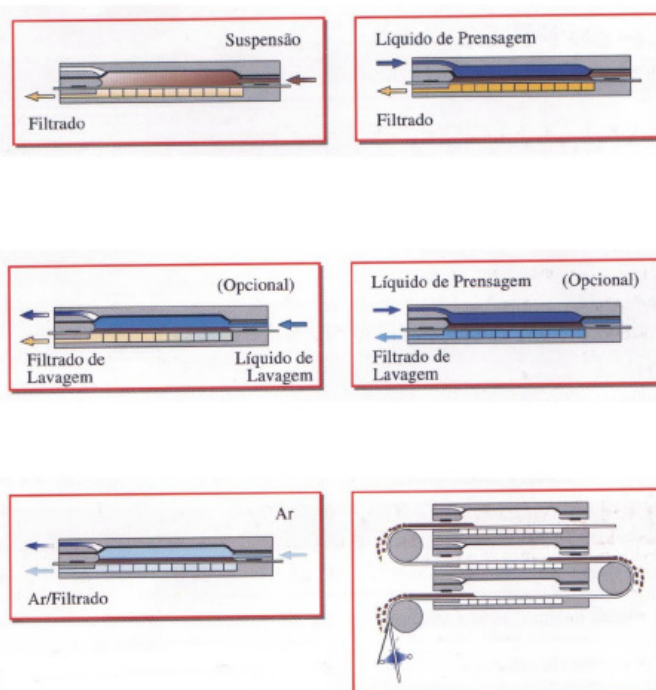
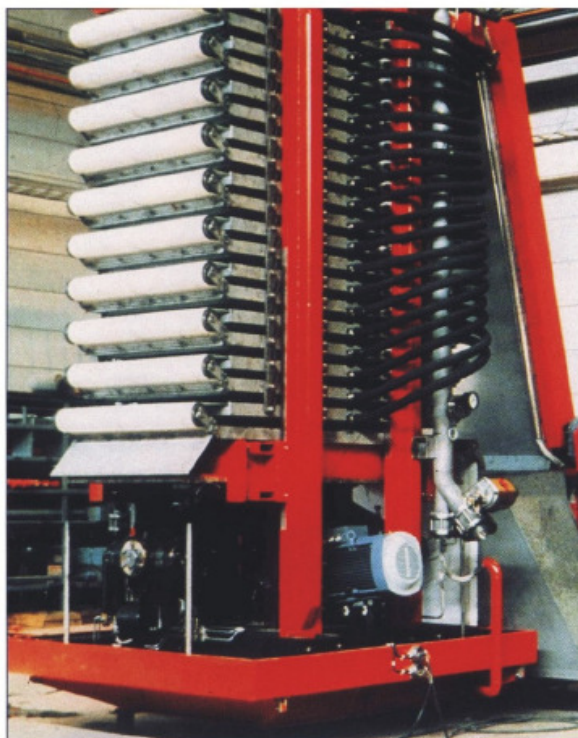


FIGURA 2.32 – Filtro prensa de placas horizontais (Fonte: Amarante, 2002)

### 2.6.2 Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero

Este subitem apresenta um estudo de filtragem de rejeitos gerados nas usinas de beneficiamento de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, visando sua disposição em forma de pilhas, conduzido por Guimarães (2011).

Em seu trabalho, o autor estudou amostras das principais usinas de minério de ferro da empresa VALE S.A., em Minas Gerais, relacionadas na TAB. 2.4. Para cada ponto do fluxograma de processo, onde há saída de rejeito, foram coletadas amostras destes rejeitos e submetidas à caracterização física, química, e a testes de filtragens em bancada. O objetivo do autor foi o de obter as melhores alternativas de desaguamento de rejeitos (pasta ou torta), em termos técnicos e de custo benefício.

TABELA 2.4 – Relação das usinas onde foram coletadas as amostras de rejeitos no trabalho de Guimarães (2011)

Usinas	Municípios (MG)
Alegria IB2/IB3	Mariana
Brucutu	São Gonçalo do Rio Abaixo
Cauê	Itabira
Conceição	Itabira
Fábrica Nova / Timbopeba	Mariana
Pico A/B	Itabirito
Vargem Grande	Nova Lima

As faixas granulométricas para os rejeitos predominantes da TAB. 2.4 (lama, flotação e concentração magnética) estão apresentadas na FIG. 2.33.

Com os resultados da caracterização física, química, e testes de filtragens em bancada obtidos, associados à experiência do autor, Guimarães (2011) definiu três alternativas de rota de processo para rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

Guimarães (2011) apresenta as alternativas em um estudo de caso, particularmente o Projeto ITMI VGR, previsto para entrar em operação em 2013 com geração de 1.025t/h de rejeito de flotação e 546t/h de lamas. De acordo com o autor, “trata-se do primeiro projeto da VALE S.A. para minério de ferro onde a geração de rejeitos será superior à de produtos”. As alternativas propostas por Guimarães (2011) estão apresentadas a seguir:



**Faixa granulométrica dos principais rejeitos das usinas de concentração de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**

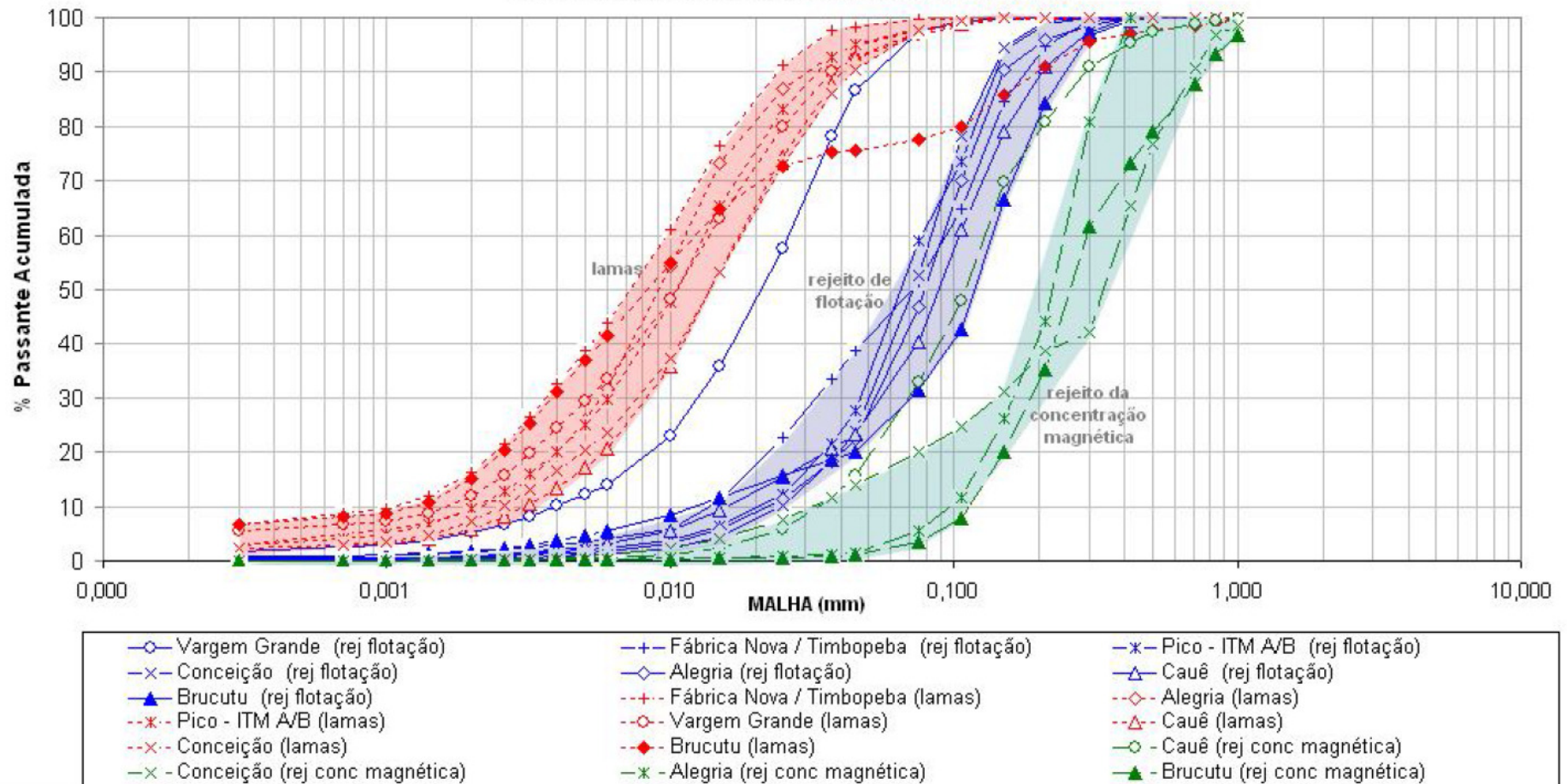


FIGURA 2.33 – Faixas granulométricas dos rejeitos estudados pelo autor (Fonte: Guimarães, 2011)

- Alternativa 1: consiste no espessamento em separado dos rejeitos de flotação e lama, bombeamento em separados dos produtos espessados e filtragem em separado dos rejeitos de flotação e lamas. O fluxograma de processo resumido está apresentado na FIG. 2.34. Nesta alternativa, o rejeito de flotação é espessado com High Density e bombeado para a unidade de filtragem. Ainda para os rejeitos de flotação, os tipos de filtros que tecnicamente podem ser utilizados são: horizontal de correia, disco convencional, disco cerâmico, prensa horizontal, prensa vertical e hiperbárico. As lamas também são espessadas com High Density e bombeadas para a unidade de filtragem. Os tipos de filtros que podem ser utilizados para as lamas são: hiperbárico, prensa vertical e prensa horizontal. As TABS. 2.5 e 2.6 apresentam as alternativas técnicas de filtragem, a quantidade de filtros necessários e a umidade final obtida para a torta.

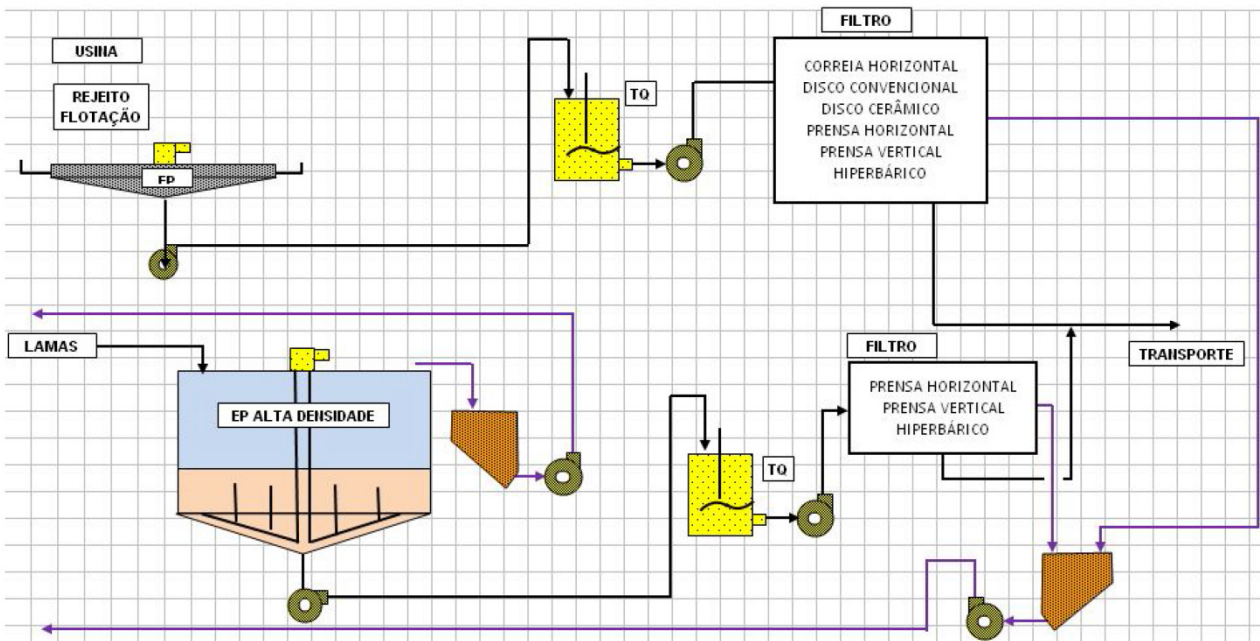


FIGURA 2.34 – Fluxograma simplificado da Alternativa 1 (Fonte: Guimarães, 2011)

TABELA 2.5 – Resultado do dimensionamento do número de filtros e teor de umidade final da torta, por alternativa técnica de filtro – Rejeito de Flotação (Fonte: Guimarães, 2011)

	Disco Convencional	Horizontal de Correia	Prensa Horizontal	Hiperbárico	Pressão vertical	Disco Cerâmico
Umidade da Torta (%)	12,0	10,7	8,0	10,0	10,0	8,6
Quantidade de Filtros	8	6	12	3	6	9

TABELA 2.6 – Resultado do dimensionamento do número de filtros e teor de umidade final da torta, por alternativa técnica de filtro – Lamas (Fonte: Guimarães, 2011)

	Prensa Horizontal	Hiperbárico	Pressão Vertical
Umidade da Torta (%)	20,9	12,3	18,2
Quantidade de Filtros	21	14	24

Através de uma análise financeira das alternativas técnicas propostas a alternativa 1, Guimarães (2011) concluiu que a melhor alternativa técnico-econômica para filtragem dos rejeitos de flotação é o emprego de filtro de disco convencional, com umidade de torta de 12,0%.

Para as lamas, a utilização de filtros de prensa horizontal é tecnicamente viável, apresentando uma umidade final da torta de 20,9%.

- Alternativa 2: consiste no espessamento em separado dos rejeitos de flotação e lama, bombeamento em separados dos produtos espessados e mistura dos dois rejeitos para filtragem. O fluxograma de processo resumido está apresentado na FIG. 2.35. Para esta alternativa, o rejeito de flotação é espessado com High Density e bombeado para a unidade de filtragem. As lamas também são espessadas com High Density e bombeadas para a unidade de filtragem. Na unidade de filtragem os rejeitos são misturados. As alternativas de filtragem estão apresentadas na TAB. 2.7, juntamente com a quantidade de filtros necessários e a umidade final da torta.

TABELA 2.7 – Resultado do dimensionamento do número de filtros e teor de umidade final da torta, por alternativa técnica de filtro – Mistura (Fonte: Guimarães, 2011)

	Prensa Horizontal	Hiperbárico	Pressão Vertical
Umidade da Torta (%)	13,9	9,6	13,4
Quantidade de Filtros	28	30	30



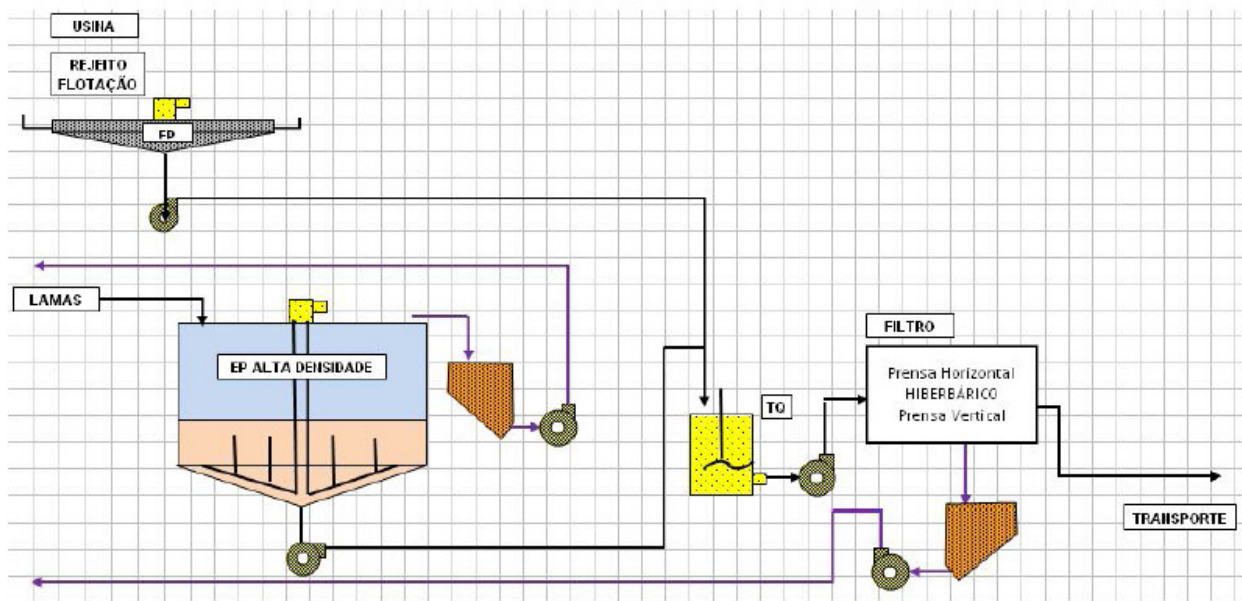


FIGURA 2.35 – Fluxograma simplificado da Alternativa 2 (Fonte: Guimarães, 2011)

Através de uma análise técnica-econômica Guimarães (2011) conclui que a melhor alternativa para filtragem da mistura dos rejeitos de flotação e lamas é o emprego de filtro prensa horizontal, com umidade da torta de aproximadamente 14%.

- Alternativa 3: consiste no espessamento em separado dos rejeitos de flotação e lama, bombeamento em separados dos produtos espessados, filtragem do rejeito de flotação e novo espessamento de lamas. O fluxograma de processo resumido está apresentado na FIG. 2.36.

O fluxograma para espessamento nesta alternativa consiste no espessamento do rejeito de flotação com High Density, bombeamento para a unidade de filtragem, procedendo a filtragem conforme Alternativa 1 (filtro de disco convencional, com umidade da torta de 12%). As lamas também foram inicialmente espessadas com High Density, bombeadas e espessadas novamente, obtendo-se uma umidade de 56%.

Guimarães (2011), através de uma análise técnico-econômica das 3 alternativas apresentadas na FIG. 2.37, constatou que a alternativa 3 era a mais atrativa àquela época. Entretanto, esta alternativa apresenta a necessidade de disposição de pasta. Salienta-se, ainda, que a análise técnico-econômica elaborada não levou em consideração os custos com o sistema de disposição dos rejeitos.

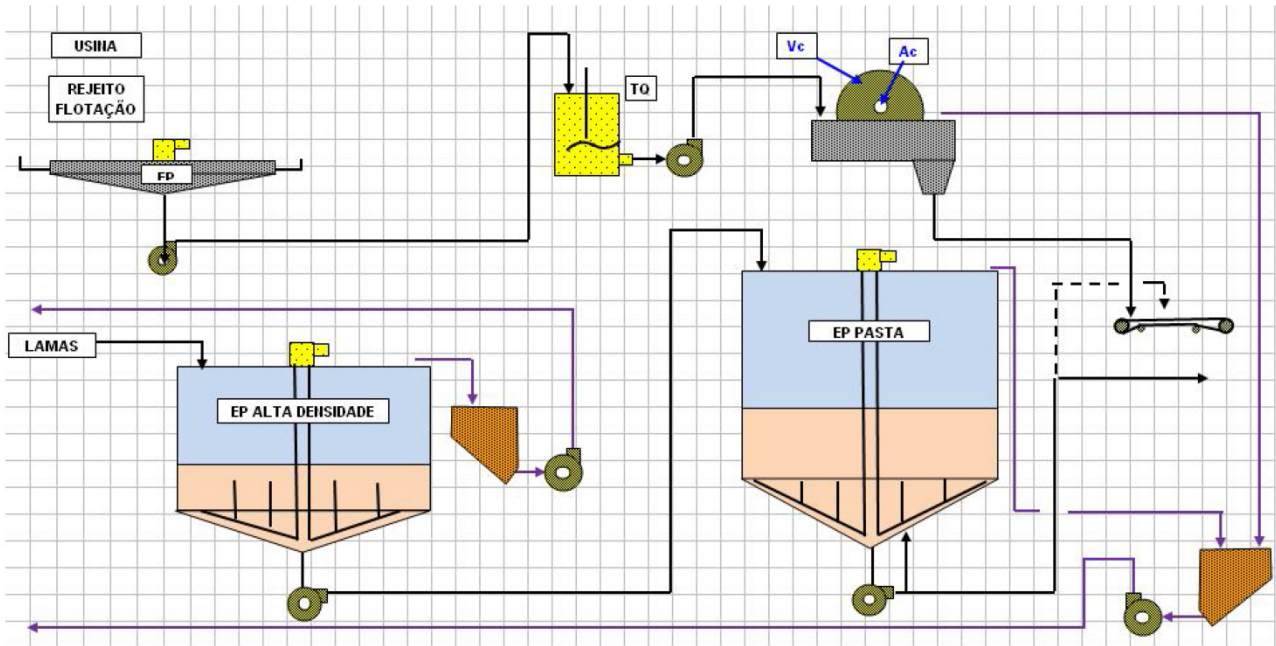


FIGURA 2.36 – Fluxograma simplificado da Alternativa 3 (Fonte: Guimarães, 2011)

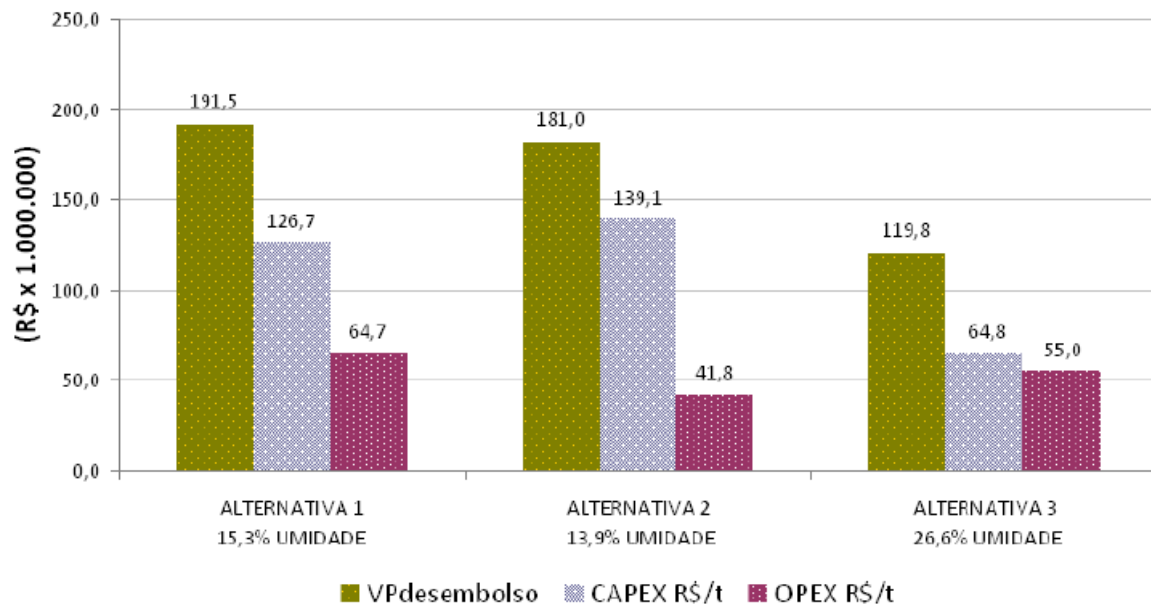


FIGURA 2.37 – Análise comparativa econômica das alternativas propostas para disposição de rejeitos (Fonte: Guimarães, 2011)

### 2.6.3 Aspectos Construtivos e Estado da Prática

As considerações construtivas para *dry stack* diferem da disposição convencional do rejeito em polpa. De acordo com Davies (2004), as principais considerações são descritas a seguir:

- Preparação do local: execução do sistema de coleta e redirecionamento das águas superficiais e subterrâneas, de forma a evitar o contato da água com o rejeito, minimizando processos erosivos e geração de drenagem ácida, quando for o caso. Esta água “limpa” pode ainda ser reutilizada na planta de processo ou bombeada para uma estação de tratamento.
- Transporte e disposição de rejeitos: realizado com a utilização de correias transportadoras ou caminhões. Devido a questões de suporte de carga de fundação, para fins de trafegabilidade, e tendo em vista que o teor de umidade do rejeito filtrado pode se encontrar um pouco acima da umidade ótima de compactação, pode ser necessária a adoção de um plano operacional para disposição do rejeito, como em Cerro Lindo, Peru.
- Reutilização e fornecimento de água: um dos principais motivos que leva a adoção da técnica de disposição de rejeitos filtrados é a possibilidade recuperação de água para a planta de processos, volume este superior às demais consistência de rejeitos espessados. Esta vantagem é de extrema importância em ambientes áridos, onde a água é um recurso valioso. Este aspecto faz com que o armazenamento temporário de água seja necessário, através de barragens.

Araujo (2006) descreve que os rejeitos filtrados podem ser depositados de forma estável, atendendo a certos requisitos, sendo eles:

- Espessamento de solos até uma concentração de 60%.
- Deslamagem com filtros até a umidade final.
- A torta formada, também denominada *cake*, é transportada por correias transportadoras ou caminhões, sendo distribuída por tratores.
- A compactação é feita com rolos pé de carneiro em camadas até atingir um grau de compactação de 85% do Proctor Normal.

A percolação num maciço de rejeito filtrado é governada, primordialmente, por características da curva de retenção (permeabilidade não saturada), o que dificulta a saturação deste tipo de estrutura. Davies (2011) aponta que, em geral, os rejeitos filtrados apresentam de 70 a 85% de grau de saturação, possibilitando a compactação ótima do material.

A disposição em *dry stack* consiste basicamente de uma operação de terraplenagem. Nessa operação não necessariamente todo o rejeito filtrado disposto deve ser compactado. Pode-se compactar apenas a região onde a superfície de ruptura é crítica, de forma a aumentar a resistência ao cisalhamento do material, conforme FIG. 2.38, reduzindo o custo de operação.

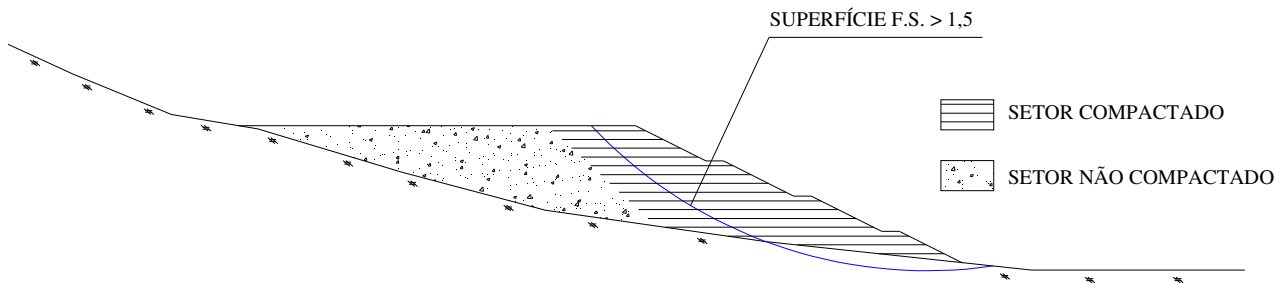


FIGURA 2.38 – Definição da faixa de compactação em *dry stack* (Fonte: Lupo e Hall, 2010)

Ulrich e Coffin (2013) e Lupo e Hall (2010) apresentam a seção típica de uma pilha de rejeito filtrado comumente utilizada, conforme FIG. 2.39.

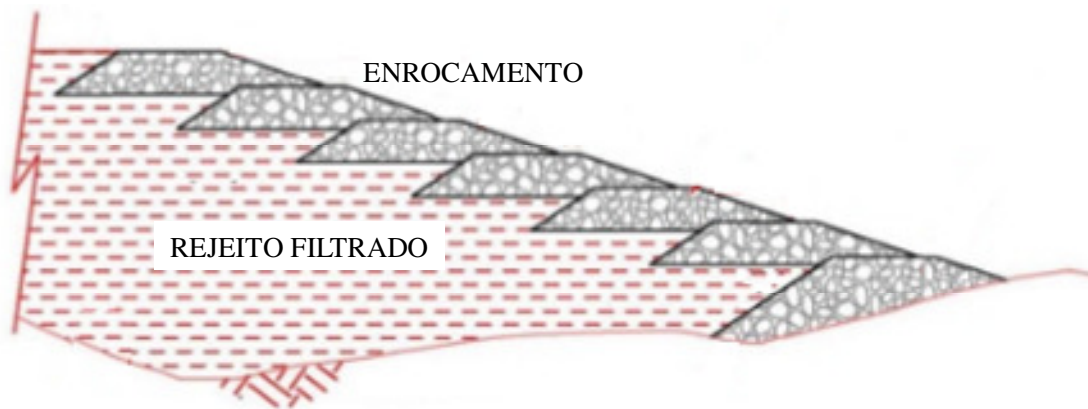


FIGURA 2.39 – Seção típica de um *dry stack* (Fonte: Lupo e Hall, 2010)

A presença da proteção em enrocamento nas faces dos taludes entre bermas serve para minimizar os efeitos da erosão nos rejeitos compactados. Os autores também apresentam dados de monitoramento piezométrico de uma estrutura real, mostrando que é possível que haja desenvolvimento de poropressão no interior dessa estrutura, mesmo no caso de um maciço não-saturado.

Lara et al (2013) publicaram recentemente o estado da arte em rejeitos filtrados. De acordo com os autores, a primeira estrutura de rejeito filtrado em escala industrial da América do Sul iniciou no ano de 2000, sendo o primeiro projeto de sucesso localizado no norte do Chile.

A TAB. 2.8 apresenta outras unidades de rejeito filtrados existentes, além das que já foram citadas nesse capítulo.

TABELA 2.8 – Principais operações de rejeito filtrado do mundo (Fonte: adaptado de Ulrich e Coffin, 2013)

Mina	Localização	Tipo de Minério	Produção (em toneladas por dia)
Alcoa	Austrália	Alumínio	35.500
Chingola	Zâmbia	Cobre	24.000
Mantos de Oro	Chile	Ouro e prata	15.000
Vaal Reef	América do Sul	Ouro e urânio	10.000
Randfontein Estates	América do Sul	Ouro e urânio	10.000
Lihir Island	Papua Nova Guiné	Ouro	7.500
El Sauzal	México	Prata e ouro	5.300
Gecamines	Zaire	Cobre	5.000
Nabalco	Australia	Alumínio	5.000
Mantos Blanco	Chile	Cobre	4.000
Alamo Dorado	México	Prata e ouro	3.500
Pogo	Estados Unidos	Ouro	2.500
Raglan	Canadá	Zinco	2.000
Greens Creek	Estados Unidos	Ouro, prata e zinco	1.500
Eskay Creek	Canadá	Cobre	300
Nixon Fork	Estados Unidos	Ouro	150

#### 2.6.4 Descomissionamento e Recuperação da Área

Uma das grandes vantagens da disposição de rejeitos filtrados é a facilidade da recuperação da área através da revegetação. Davies (2004) cita que é possível iniciá-la desde o começo da vida útil da estrutura, o que contribuirá também para o controle de poeira e da erosão.

De acordo com *Access Mining Consultants* (2003), com relação à recuperação e revegetação de rejeitos filtrados, estes não são considerados mais desafiadores do que os outros tipos de rejeitos dispostos. Projetos de cobertura adequados e estáveis são sempre um desafio (comportamento segundo as teorias da mecânica dos solos não saturados) e o sucesso da revegetação, no caso de rejeitos filtrados, não foi ainda caracterizado devido ao número limitado de operações e também devido à escassez de informação a esse respeito.

## 2.7 Comportamento geotécnico de rejeitos de minério de ferro

De acordo com Bisco (2009), cada rejeito apresentará um comportamento distinto, não sendo possível estabelecer uma padronização em termos de comportamento. Isto ocorre devido às variáveis que afetam as propriedades reológicas, a saber: forma da partícula, granulometria, temperatura, pressão, etc. Apesar disso, muitos trabalhos acadêmicos buscam conhecer como se dá o comportamento de algumas das propriedades geotécnicas desses rejeitos diante da variação de determinadas características do rejeito. Por exemplo, é sabido que rejeitos de minério de ferro apresentam variabilidade de suas propriedades geotécnicas em função do teor de ferro presente. Essa influência do teor de ferro em rejeitos é amplamente discutida na literatura técnica, no que diz respeito às suas características geotécnicas, podendo-se citar os seguintes autores: Espósito (1995), Espósito (2000), Lopes (2000), Presotti (2002), Russo (2007), dentre outros. A seguir encontra-se uma coletânea sobre alguns dados importantes de rejeitos de minério de ferro já publicados na literatura técnica, em ordem cronológica.

Espósito (1995) realizou ensaios com o objetivo de conhecer o material lançado via disposição hidráulica na pilha do Xingu, Mariana, MG, executada pelo método de aterro hidráulico para montante. A autora trabalhou apenas com os rejeitos granulares, realizando ensaios de permeabilidade e cisalhamento direto para amostras moldadas para determinada massa específica aparente seca. Os resultados estão apresentados nas FIGS. 2.40 a 2.42.

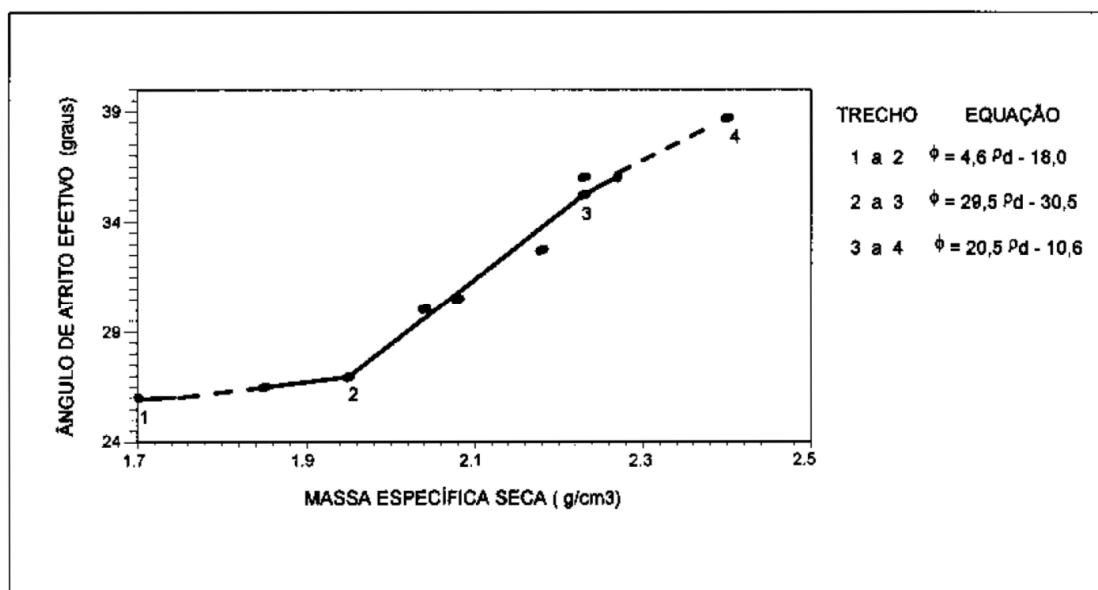


FIGURA 2.40 – Relação entre massa específica seca e ângulo de atrito efetivo para o ensaio de cisalhamento direto (Espósito, 1995)

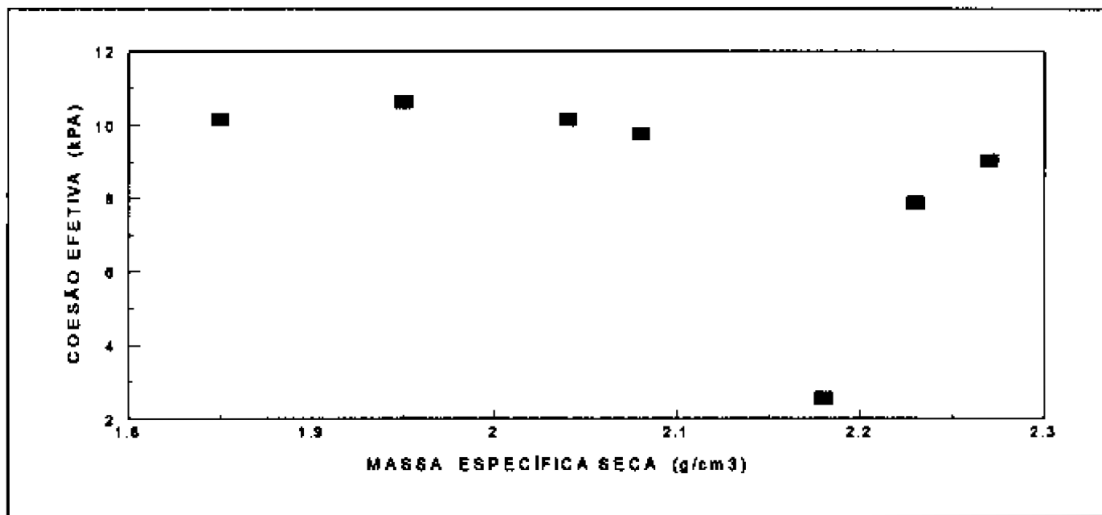


FIGURA 2.41 – Relação entre massa específica seca e coesão para o ensaio de cisalhamento direto (Espósito, 1995)

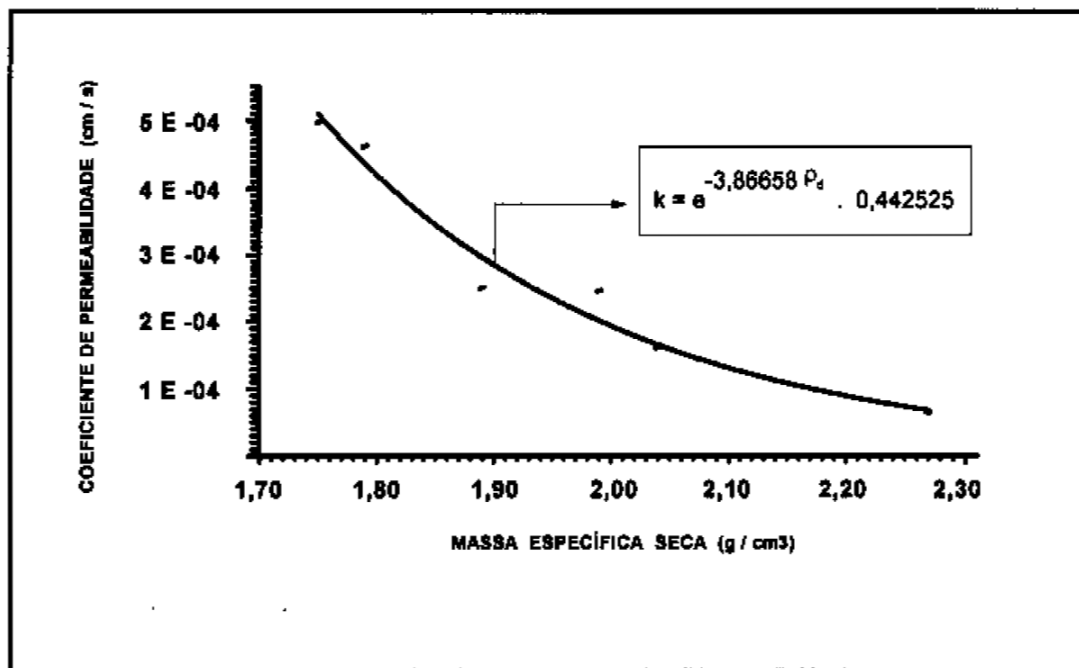


FIGURA 2.42 – Relação entre massa específica seca e o coeficiente de permeabilidade (Espósito, 1995)

Outros parâmetros de resistência foram obtidos por Espósito (2000) para as pilhas de Xingu e Monjolo, Mariana, MG, através da realização de ensaios triaxiais CD e CU, além de ensaios de cisalhamento direto. As amostras englobaram rejeitos grossos. Os resultados estão apresentados nas FIGS. 2.43 a 2.47.

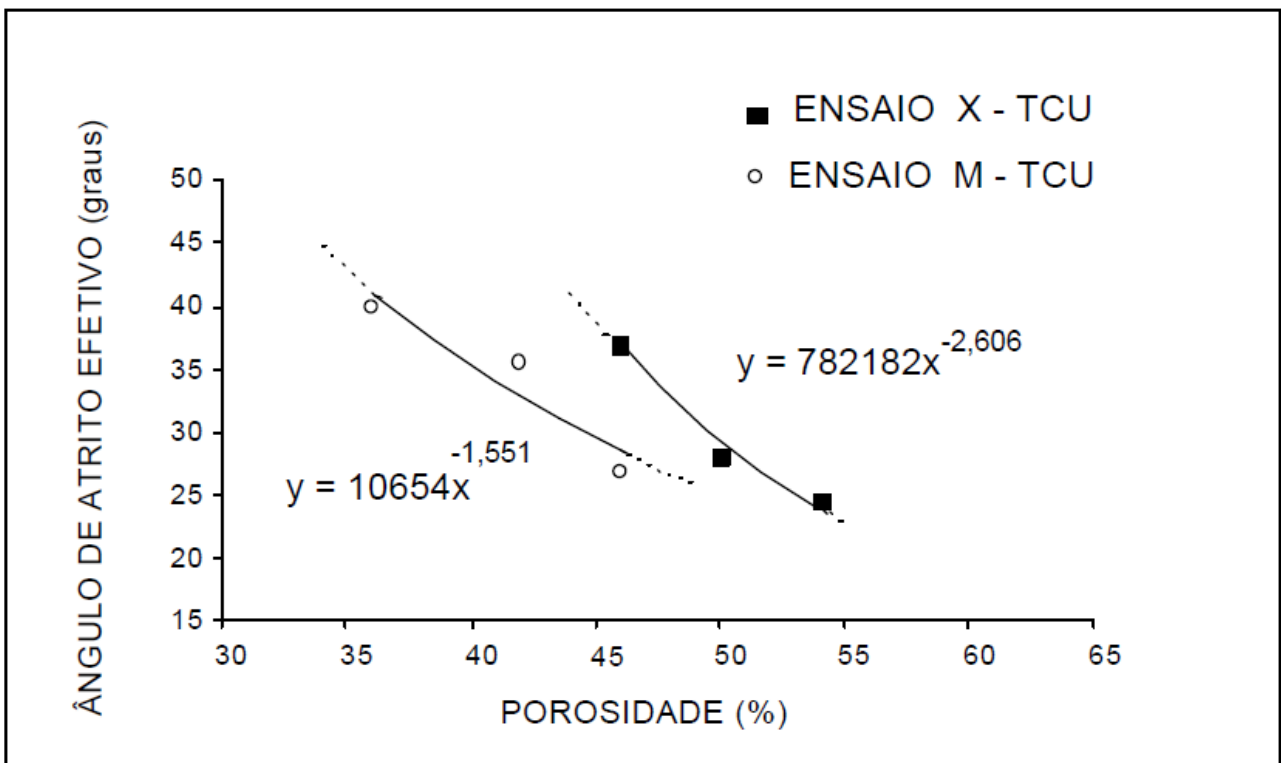


FIGURA 2.43 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade para o ensaio triaxial CU (Espósito, 2000)

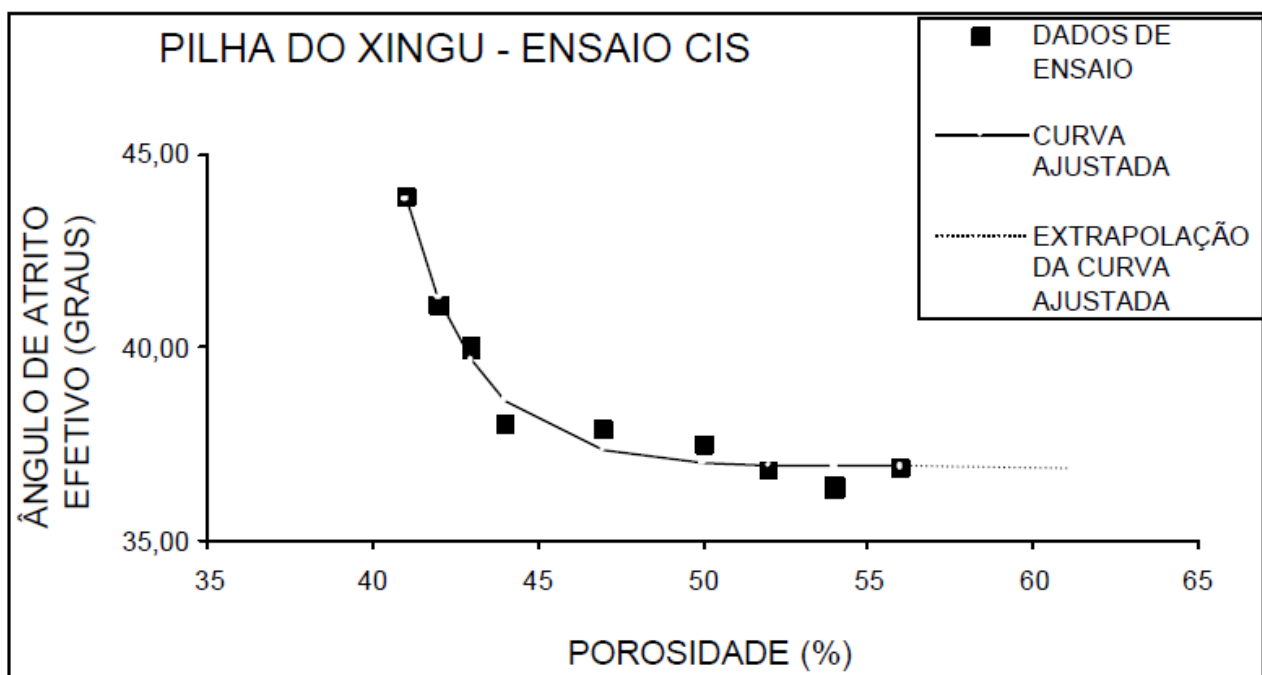


FIGURA 2.44 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio de cisalhamento direto para a pilha do Xingu (Espósito, 2000)



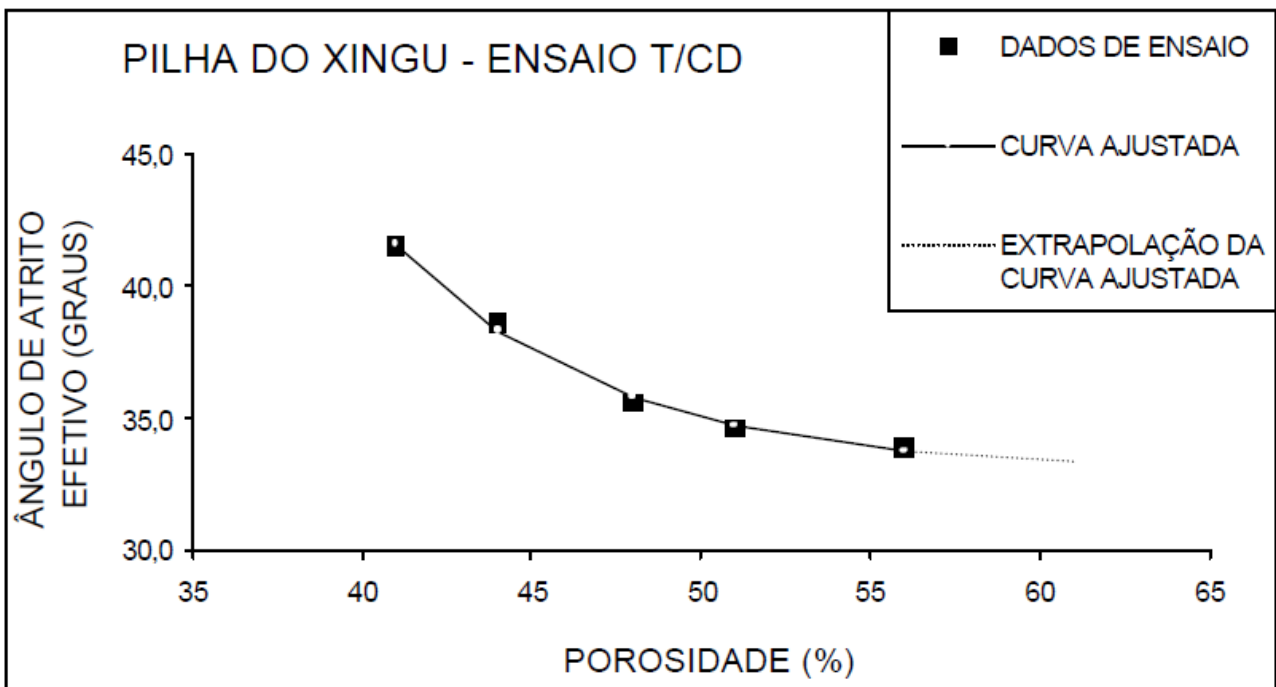


FIGURA 2.45 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio triaxial CD para a pilha do Xingu (Espósito, 2000)

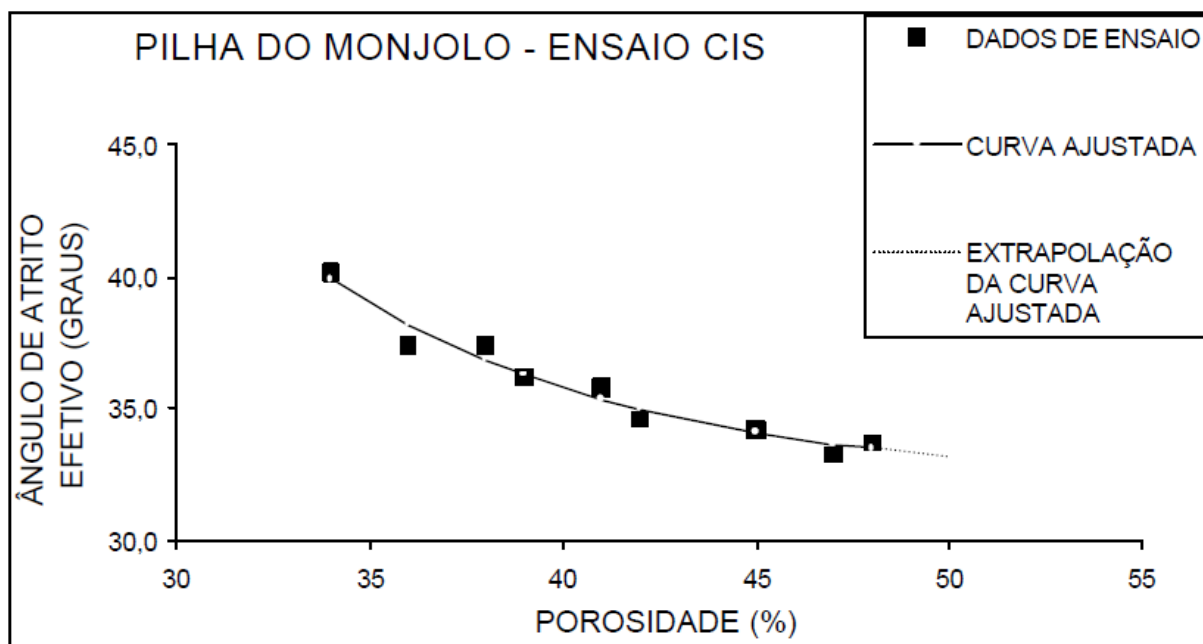


FIGURA 2.46 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio de cisalhamento direto para a pilha do Monjolo (Espósito, 2000)

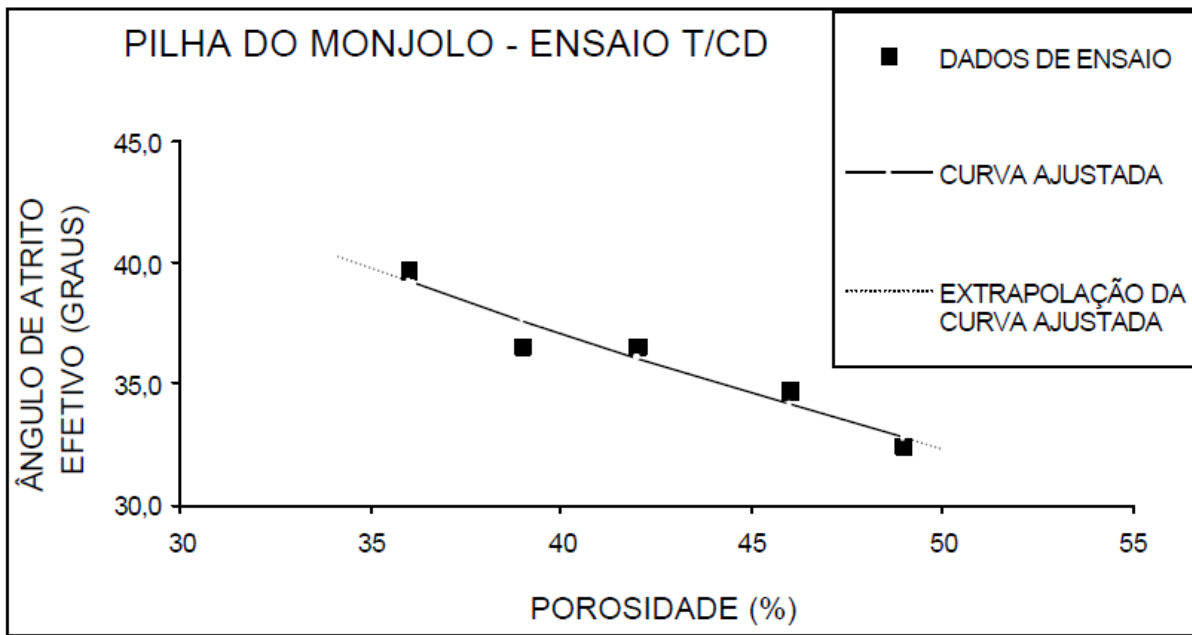


FIGURA 2.47 – Relação entre ângulo de atrito efetivo e a porosidade - ensaio triaxial CD para a pilha do Monjolo (Espósito, 2000)

Espósito (2000) também apresentou uma equação matemática que correlaciona o teor de ferro presente no rejeito com sua massa específica dos grãos, a saber:

$$\rho_s = 0,026 \text{ Fe} + 2,65 \quad (1)$$

Onde:

$\rho_s$ : massa específica dos grãos.

Fe: teor de ferro.

Lopes (2000) apresentou alguns dados de características geotécnicas de rejeitos de minério de ferro depositados na pilha do Xingu. Esses dados estão apresentados na TAB. 2.9, onde se observa a alteração dos parâmetros ao longo do tempo, condicionada à variação do produto obtido pelas mineradoras. Ressalta-se que esta variação estará presente em qualquer que seja a alternativa de disposição adotada, pois é função da necessidade de mercado.

TABELA 2.9 – Variação das características geotécnicas do rejeito com o tempo (Fonte: Lopes, 2000)

Característica	Ano de 1988	Ano de 1997
Granulometria	Areia fina e pouco siltosa	Areia fina a média
Densidade real dos grãos	-	4,11g/cm <sup>3</sup>
Densidade seca mínima <i>in situ</i>	1,4g/cm <sup>3</sup>	1,75g/cm <sup>3</sup>
Densidade seca máxima <i>in situ</i>	1,8g/cm <sup>3</sup>	2,56g/cm <sup>3</sup>
Índice de vazios	0,67	0,61 a 1,35
Coesão efetiva	0kPa	8,6kPa
Ângulo de atrito efetivo	30°	32,6°

Hernandez (2007) compilou os dados de Espósito (2000) e Lopes (2000) e concluiu que não é possível afirmar que o comportamento do rejeito é similar ao comportamento das areias, baseando exclusivamente no fato de esses serem classificados como areias. Isso porque, segundo o autor, os rejeitos de minério de ferro apresentam uma grande variabilidade das suas propriedades em função das mudanças do conteúdo de ferro neles presente, conforme Figura 2.48.

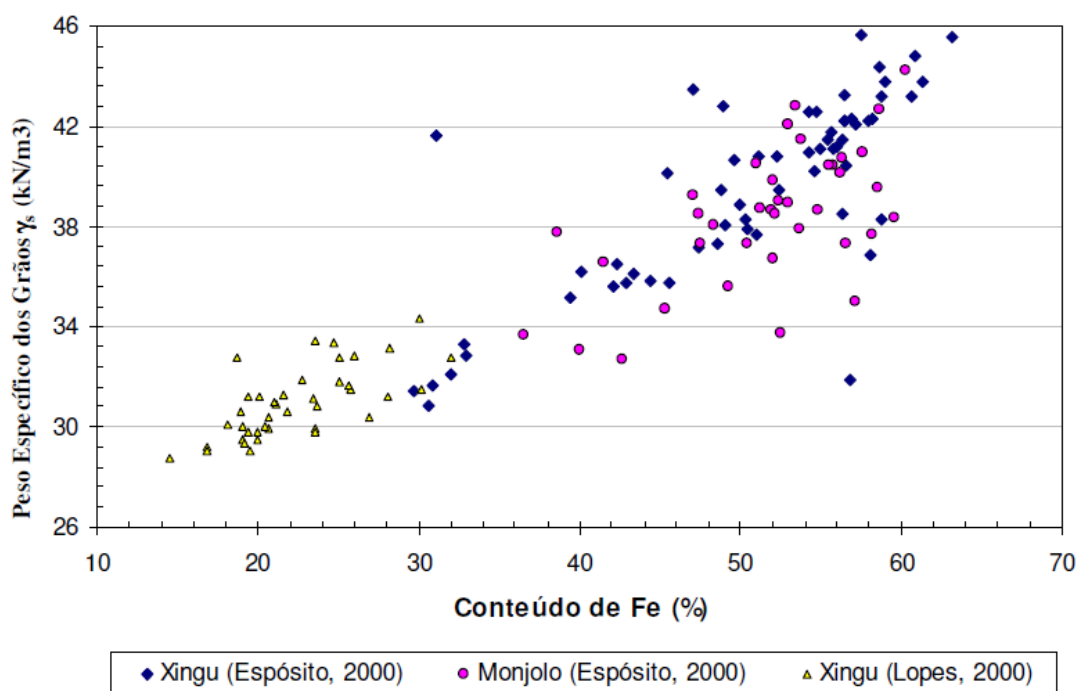


FIGURA 2.48 – Variação da massa específica dos grãos com o teor de ferro (Fonte: Hernandez, 2007)

Presotti (2002) estudou a variação do ângulo de atrito residual e de pico com o teor de ferro, através de ensaios triaxiais CD's para rejeitos de minério de ferro da pilha de Monjolo, conforme FIG. 2.49 e FIG. 2.50. O autor afirma que a resistência ao cisalhamento desses rejeitos foi controlada principalmente pelo atrito entre os grãos. Como a influência do teor de ferro foi mais significativa

com a diminuição da porosidade inicial das amostras, o ângulo de atrito está sujeito às características mineralógicas do rejeito, independentemente da granulometria e compactidade inicial.

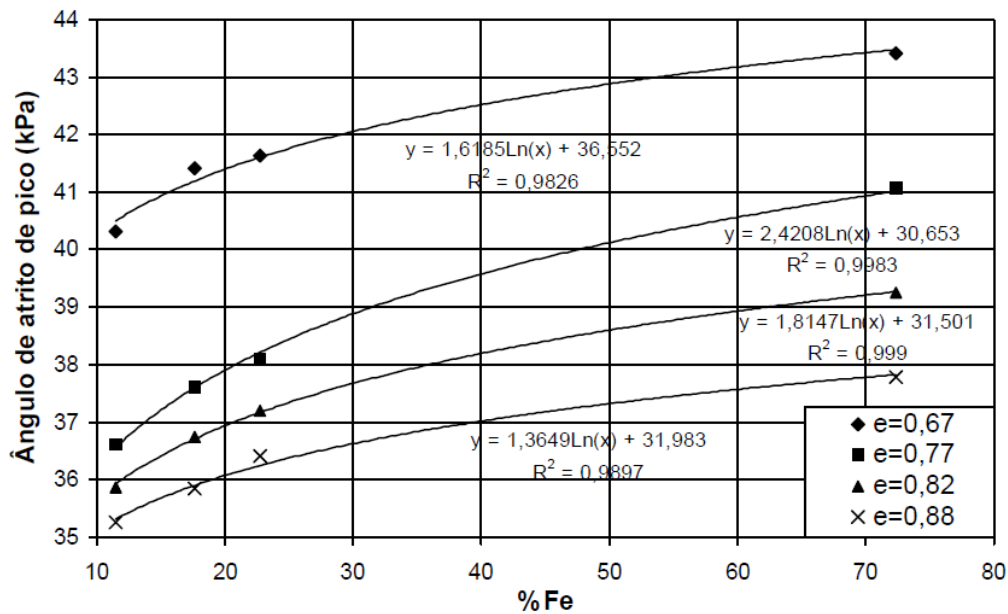


FIGURA 2.49 – Variação do ângulo de atrito efetivo de pico com o teor de ferro (Fonte: Presotti, 2002)

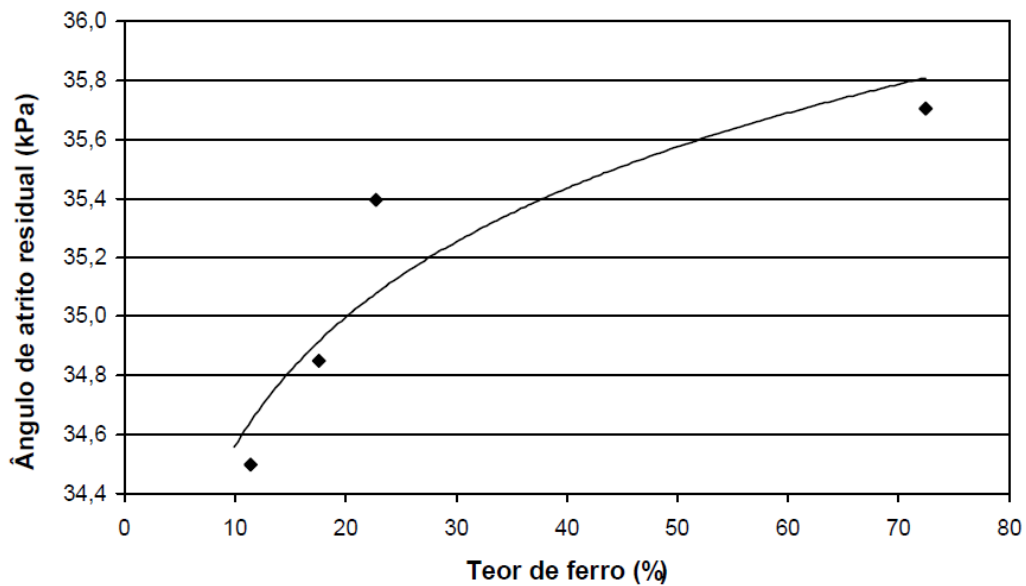


FIGURA 2.50 – Variação do ângulo de atrito efetivo residual com o teor de ferro (Fonte: Presotti, 2002)

Hernandez (2002) mostrou a relação de dependência do ângulo de atrito efetivo de pico com o índice de vazios e o teor de ferro para rejeito de minério de ferro, conforme FIG. 2.51. Nesta Figura é possível visualizar que o aumento do índice de vazios para um mesmo teor de ferro proporciona redução do ângulo de atrito de pico. Comparando estes resultados com os dados obtidos por Presotti

(2002), observa-se, de forma aproximada, um valor mínimo de 28° e máximo de 43° para o ângulo de atrito efetivo de pico.

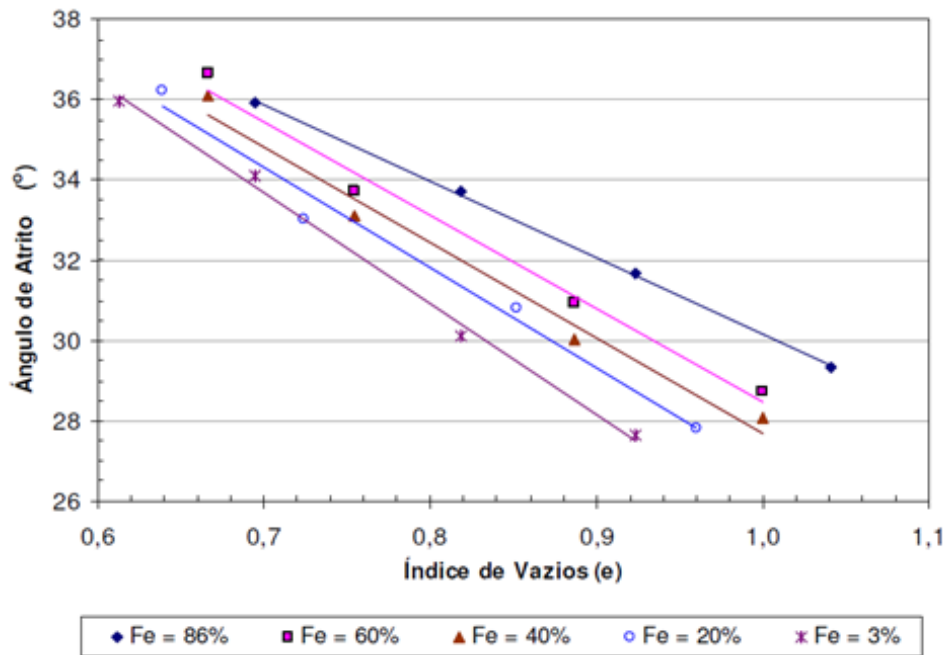


FIGURA 2.51 – Variação do ângulo de atrito efetivo de pico com o teor de ferro (Fonte: Hernandez, 2002)

De acordo com Santos (2004), os valores de condutividade hidráulica reduzem com o aumento do teor de ferro. Este comportamento, entretanto, é peculiar de alguns tipos de rejeitos, dependendo da dimensão das partículas. A FIG. 2.52 ilustra os valores obtidos pelo autor para amostras compactas e fofas.

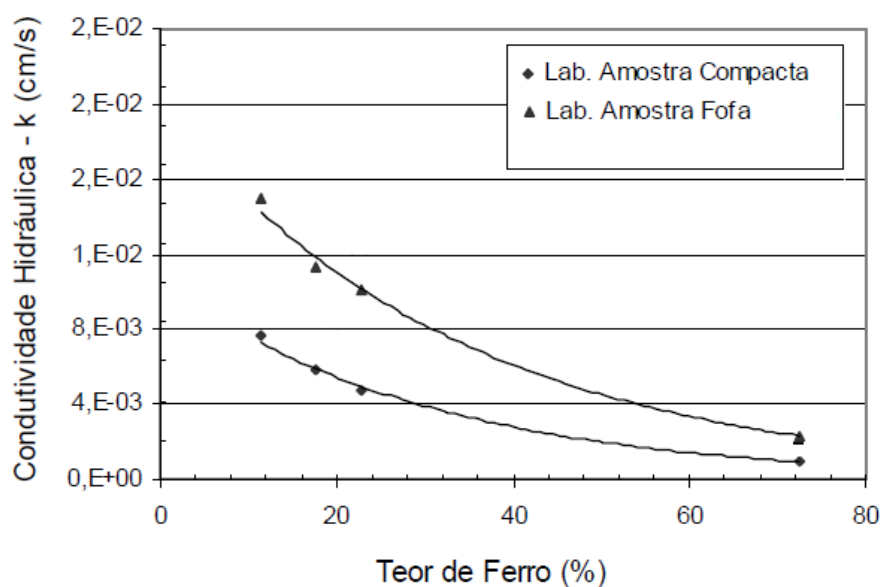


FIGURA 2.52 – Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro (Fonte: modificado de Santos, 2004)

Russo (2007) realizou ensaios triaxiais CU para amostras pertencentes às pilhas do Xingu e Monjolo, adotando diferentes índices de vazios, variando com base nos valores mínimo e máximo encontrados por ele. Para a realização dos ensaios o autor também variou o teor de ferro das amostras, obtendo-se, ao final, cinco porosidades distintas para 3 teores de ferro distintos. As amostras foram moldadas com teor de umidade inicial de 6%, apenas para facilitar a moldagem. Os principais resultados estão apresentados nas FIGS 2.53 a 2.56.

Importante ressaltar que os resultados obtidos por Russo (2007) apresentam uma defasagem nos valores de ângulo de atrito, conforme afirmado pelo autor, em função do equipamento utilizado para os ensaios. Entretanto, optou-se por incluir nessa dissertação os resultados encontrados por Russo (2007), para avaliação do comportamento do rejeito.

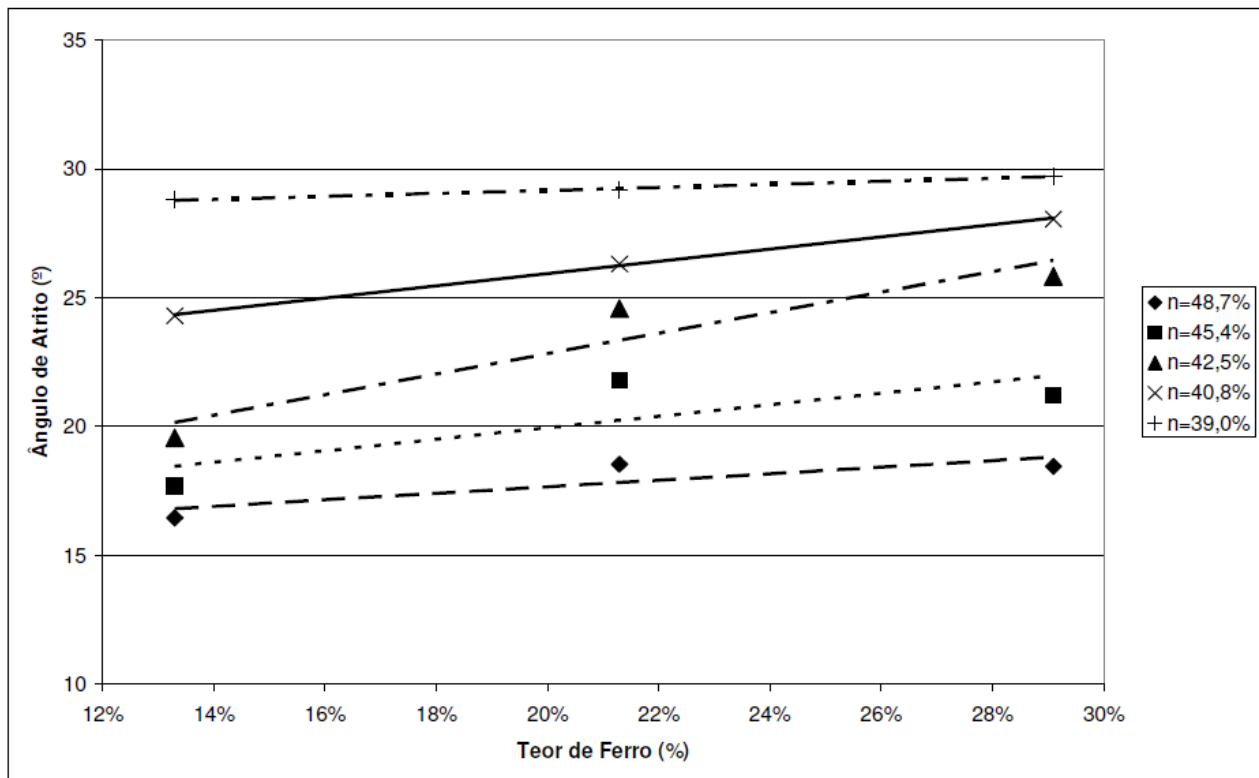


FIGURA 2.53 – Variação do ângulo de atrito de pico em função do teor de ferro para cada porosidade (Fonte: Russo, 2007)

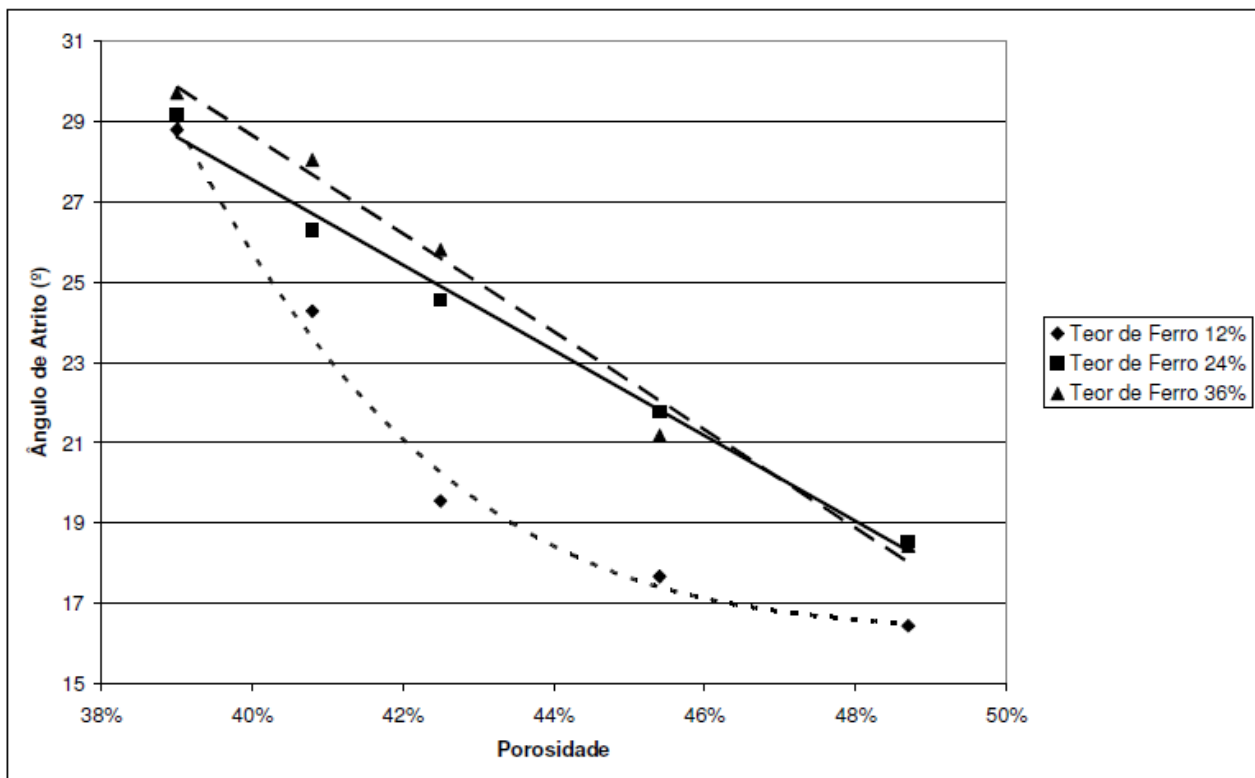


FIGURA 2.54 – Variação do ângulo de atrito de pico em função da porosidade para cada teor de ferro (Fonte: Russo, 2007)

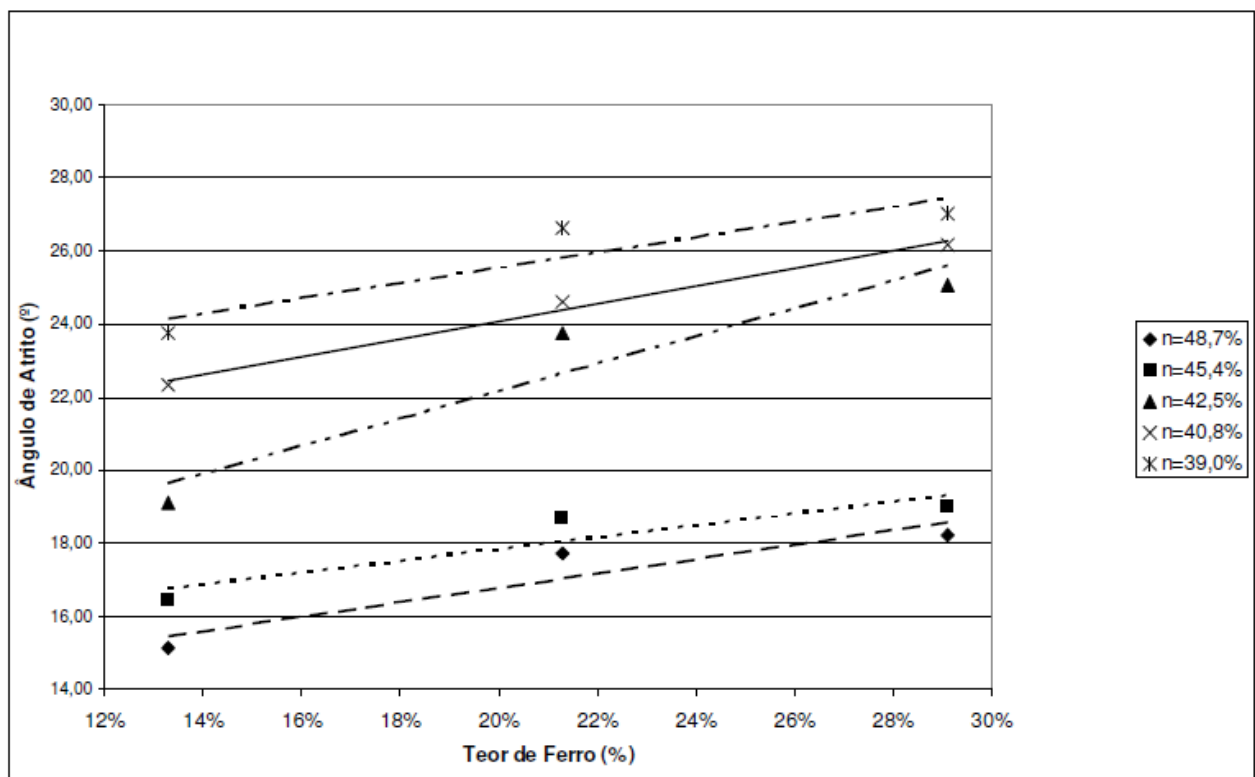


FIGURA 2.55 – Variação do ângulo de atrito residual em função do teor de ferro para cada porosidade (Fonte: Russo, 2007)

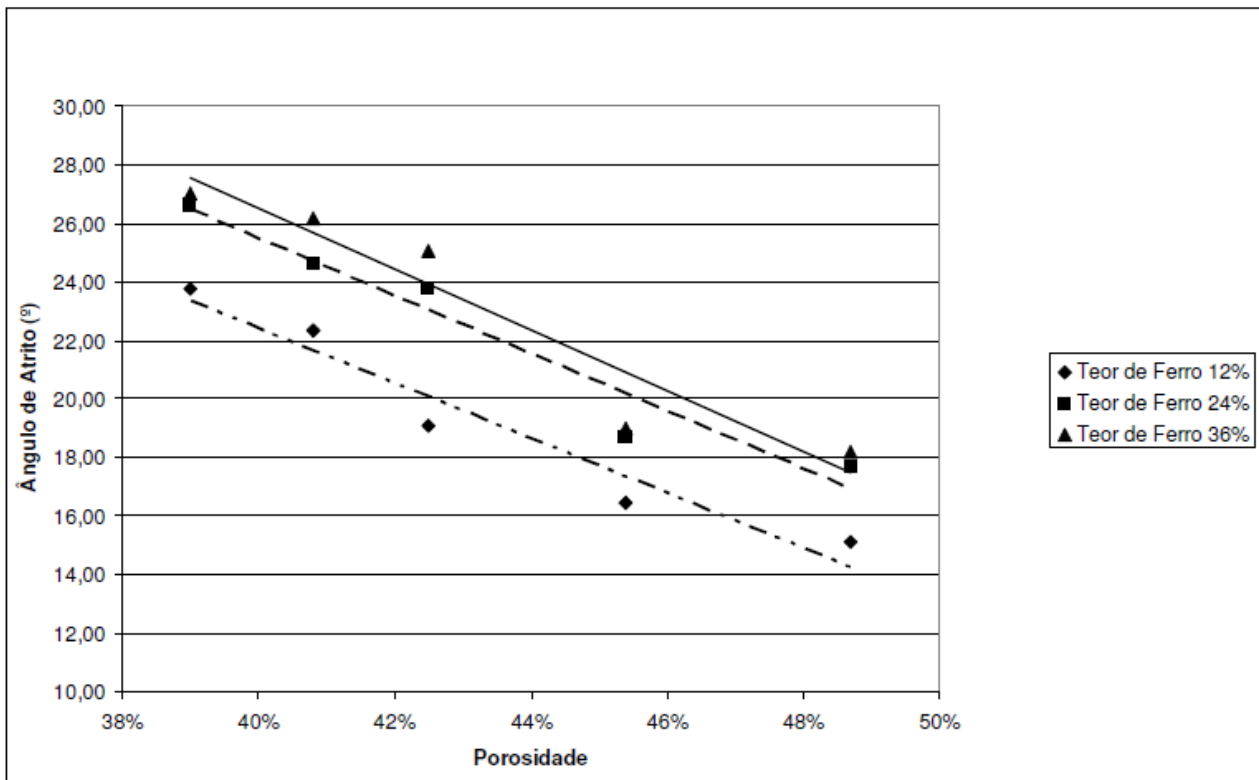


FIGURA 2.56 – Variação do ângulo de atrito residual em função da porosidade para cada teor de ferro (Fonte: Russo, 2007)

Verifica-se que o efeito do teor de ferro é mais significativo em rejeitos de compacidades menores, mas que há tendência de estabilização da condutividade hidráulica para teores de ferro elevados.

Motta (2008) realizou ensaios em rejeito fino de minério de ferro, com amostras compactadas na umidade ótima utilizando-se a energia Proctor Normal. A FIG. 2.57 ilustra os resultados obtidos para as densidades de campo em relação ao resultado do ensaio de compactação. Segundo a autora, a diferença encontrada pode ser justificada por efeitos de estruturas formadas durante o processo de disposição. Os resultados obtidos por Motta (2008) revelaram densidade específica aparente seca, máxima em ensaio de compactação, de  $2,16\text{g/cm}^3$  e umidade ótima de 12%. O coeficiente de permeabilidade obtido foi da ordem de  $8 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ , característico de materiais silteosos.

Quanto aos parâmetros de resistência, Motta (2008) realizou ensaios de cisalhamento direto, além de triaxiais CU e CD em corpos de prova compactados. O ensaio triaxial CD confirmou os parâmetros de resistência efetivos obtidos no ensaio CU. Para os ensaios triaxiais o ângulo de atrito efetivo foi de  $40^\circ$ , enquanto que para ensaios de cisalhamento direto o ângulo de atrito efetivo foi de  $32^\circ$ . Importante observar que, em geral, os ensaios de cisalhamento direto fornecem ângulos de atrito maiores que os ensaios triaxiais. A autora atribui a razão de elevada diferença entre os valores



obtidos aos diferentes arranjos das partículas nos métodos de moldagem adotados, além do nível de tensões impostas.

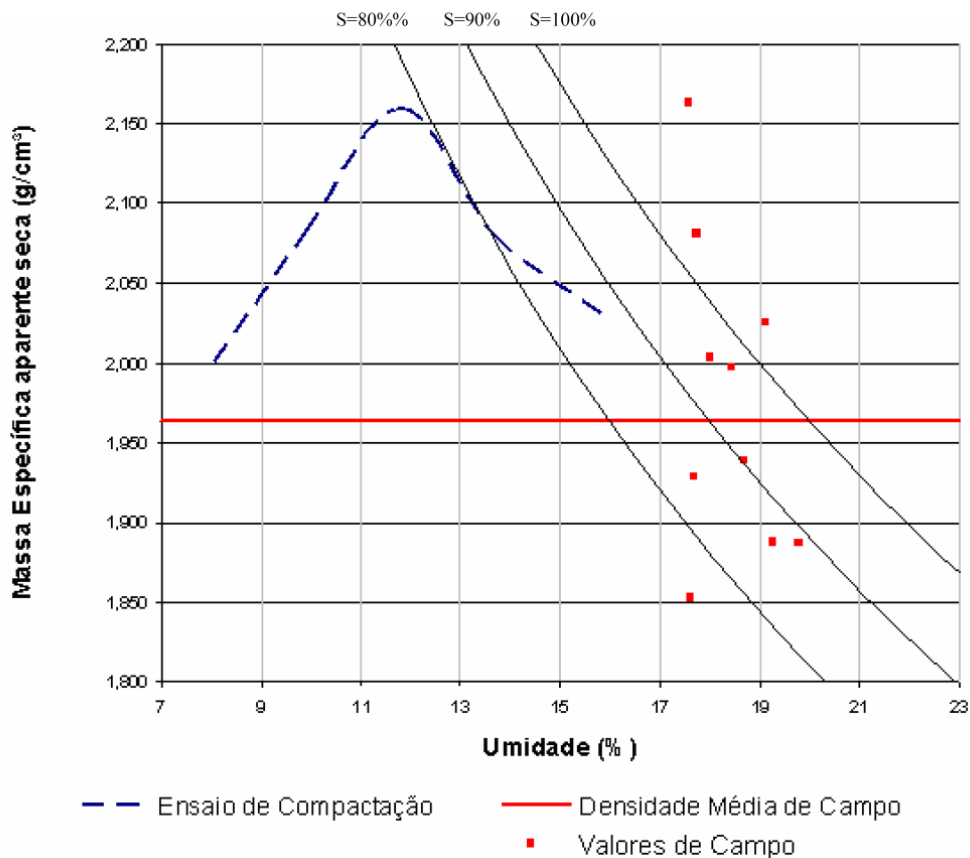


FIGURA 2.57 – Curva de compactação e densidades obtidas em campo (Fonte: Motta, 2008)

De forma geral, podem-se notar as seguintes conclusões:

- Existe uma tendência de estabilização no valor do ângulo de atrito à medida que o teor de ferro aumenta.
- Existe uma tendência de ganho de ângulo de atrito com o decréscimo da porosidade, ou índice de vazios.
- Para porosidades mais elevadas há maior variação do ângulo de atrito de pico com a variação do teor de ferro. Para materiais mais densos, há tendência de estabilização (Hernandes, 2002).
- O efeito do teor de ferro na resposta da resistência e da permeabilidade do material tende a diminuir à medida que o índice de vazios reduz.
- O comportamento do rejeito fofo para o denso é nitidamente distinto, principalmente para baixos valores de índice de vazio ou porosidade (Espósito, 2000; Presotti, 2002; Hernandez, 2002 e Russo, 2007).

- Não existe diferença significativa para o ângulo de atrito obtido via ensaio de cisalhamento direto ou triaxial CD. Eventuais divergências podem ser atribuídas às condições de moldagem do corpo de prova. (Espósito, 2000; Motta, 2008 e Russo, 2007).
- Para elevadas compacidades, o rejeito tenderá a ter um comportamento residual em termos de resistência (Espósito, 2000 e Russo, 2007).
- A compacidade exerce influência muito maior que o teor de ferro no comportamento do rejeito em termos de resistência (Presotti, 2002; Hernandez, 2002 e Russo, 2007).
- A condutividade hidráulica do rejeito tende a estabilizar para elevados teores de ferro, independente da compacidade inicial que a amostra se encontra (Espósito, 1995 e Santos, 2004).

De uma forma geral, no que diz respeito aos parâmetros obtidos do ensaio de compactação e aos parâmetros de resistência de rejeitos compactados de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, pode-se afirmar que não se tem muito dado disponível na literatura. Talvez o motivo esteja baseado na ausência de estruturas compactadas com controle. Os dados até então existentes têm o objetivo de avaliar a aplicabilidade desse material para a pavimentação e, geralmente, envolve a mistura com outros materiais como, por exemplo, o estéril. A seguir encontram-se alguns dados obtidos da literatura.

Silva et al (2010) realizaram ensaios de compactação na energia Proctor Normal com amostras de rejeito de minério de ferro, apresentados na FIG. 2.58. Foram compactadas 18 amostras para a determinação de três curvas de compactação. As amostras ensaiadas pertencem a uma mina de Itabirito, MG, onde os rejeitos são dispostos na forma de lama. O teor de umidade ótima médio encontrado foi de 11,7% e a densidade seca máxima média foi de 2,07g/cm<sup>3</sup>.

Fernandes et al (2004) realizaram ensaios de compactação na energia intermediária em rejeitos da Mina Gongo Soco, Minas Gerais. Os autores obtiveram uma densidade seca máxima de 2,84 g/cm<sup>3</sup> e teor de umidade de 11,7%, CBR de 57,12% e expansão de 0,32%. Fernandes (2005) encontrou um valor de umidade ótima de 11,8% e densidade seca máxima de 2,83g/cm<sup>3</sup>.

Abbate, Fonseca e Villar (2010) realizaram ensaios de compactação na energia Proctor Normal, sendo a amostra recolhida diretamente do ponto de lançamento do rejeito (disposição na forma de lama). Os autores determinaram a umidade ótima de 15,6% e a massa específica seca máxima de 2,06g/cm<sup>3</sup>.

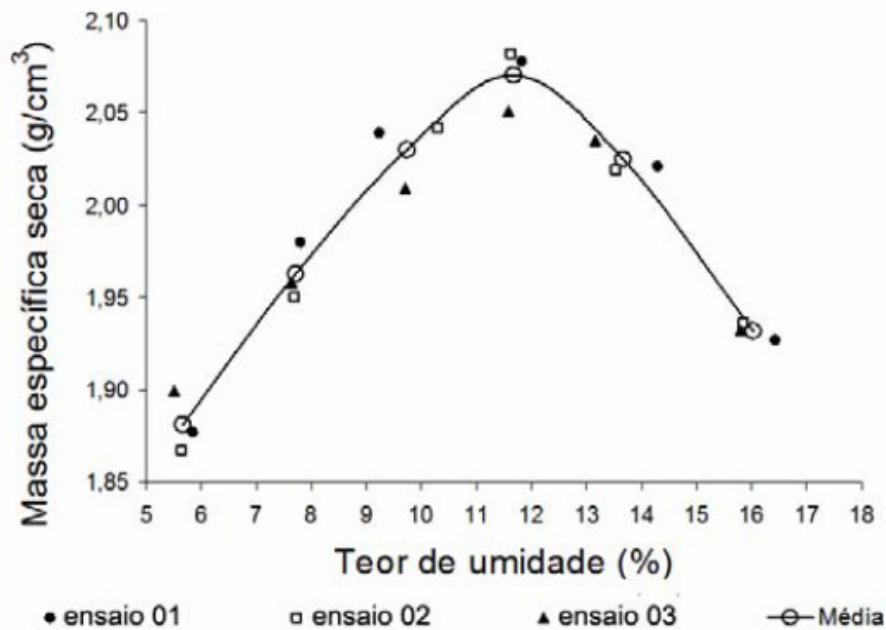


FIGURA 2.58 – Curva de compactação Proctor Normal para rejeito de minério de ferro (Fonte: Silva et al, 2010)

De forma geral, no que diz respeito à compactação do rejeito de minério de ferro, verifica-se os parâmetros citados a seguir. É importante observar que esses parâmetros englobam vários fatores intervenientes.

- Dos dados obtidos para as energias Proctor Normal e Intermediária, os teores de umidade ótima ficaram entre 11,7 e 15,6%.
- Com relação à densidade seca máxima, foram obtidos valores variando entre 2,07 e 2,84g/cm<sup>3</sup>.

Conforme já mencionado anteriormente, a adição de polímeros em rejeitos espessados influencia o comportamento geotécnico durante a disposição. Portanto, deve-se ter cuidado em comparar os resultados aqui apresentados com o real comportamento de um rejeito filtrado, haja vista o processo químico pelo qual este tipo de rejeito está suscetível quando do processo de filtragem. O mesmo ocorre para os demais rejeitos espessados.

## 2.8 Gerenciamento de risco na disposição de rejeitos

Numa visão global da engenharia de barragens, Baptista (2008) constata que, em diversos países, uma redução gradual dos investimentos estatais e o aumento de donos de obras privadas, verificando-se uma valorização crescente dos aspectos econômico-financeiros. Esses fatos fazem

com que os investimentos em todas as fases da vida útil de uma barragem sejam reduzidos, trazendo preocupações acerca da gestão de risco dessas estruturas. Ainda segundo a autora, além desse aspecto, a atualização e exigência crescente das normas e regulamentos conduzem a que um número significativo de barragens não satisfaça alguns dos critérios de dimensionamento.

De acordo com Barreda (2008), no Brasil, desde a década de 60, os rejeitos de flotação têm sido dispostos em barragens de rejeitos, gerando considerável impacto ambiental. O rompimento da barragem pode implicar em dano ambiental, perda de vidas humanas, contaminação do solo e cursos d'água e custo de produção da usina.

Alves (2009) disponibilizou uma listagem, extraída e modificada de Tailings.info (2009), com incidentes com barragens ocorridos no setor de mineração em nível mundial, no período de 1928 a 2008, conforme FIG. 2.59. O autor observa que a tendência mundial de ocorrência de incidentes passou a ser decrescente a partir de 1988. Entretanto, o Brasil seguia uma tendência crescente, com aumento expressivo do número de acidentes.

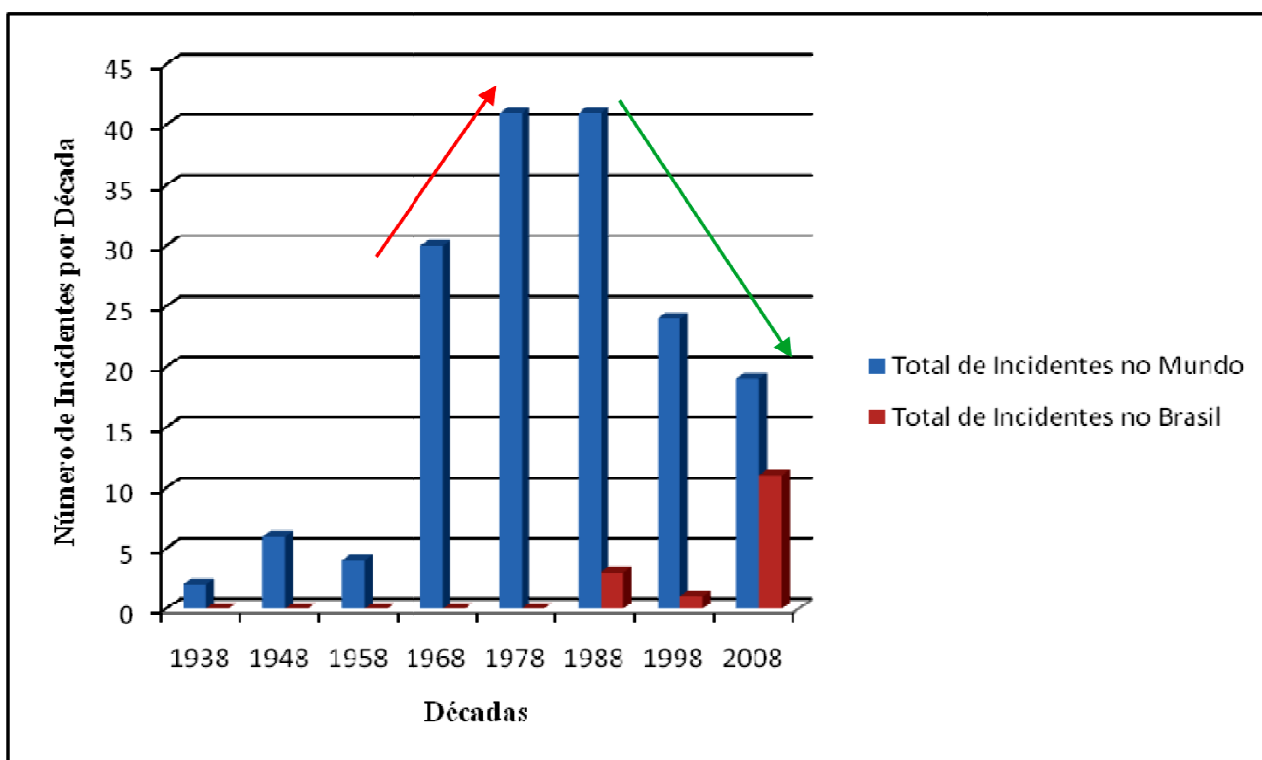


FIGURA 2.59 – Incidentes com barragens de rejeitos (Fonte: Alves, 2009)

Alves, Ribeiro e Espósito (2010) afirmam que, “historicamente, a disposição dos resíduos de minérios sempre foi feita pelo menor custo possível. Entretanto, atualmente, com as leis ambientais cada vez mais rígidas, essa etapa requer um controle mais adequado por parte das mineradoras”.

Vanden Berghe et al (2011) classificaram os riscos potenciais que influenciam a estabilidade de uma barragem de contenção de rejeitos, descritos a seguir, apresentado-os através de uma matriz de risco, de acordo com a FIG. 2.60. Ressalta-se que trata-se de uma análise genérica e não necessariamente fidedigna.

- As barragens de rejeitos são construídas lentamente. Isto faz com que essas estruturas experimentem carregamentos para as quais nunca foram testadas (mesmo de pequenas magnitudes), aumentando o risco de ruptura na medida em que a barragem está sendo alteada (levando em conta a não linearidade da envoltório de Mohr-Coulomb). O oposto acontece para as barragens de contenção de água, que são construídas em períodos curtos e testadas para carregamentos extremos no final da construção.
- Como a duração da construção de uma barragem de rejeitos é longa pode-se perder o conhecimento e as experiências dos profissionais envolvidos em sua construção. O projeto original e a história da barragem não são devidamente documentados.
- O projeto é muitas vezes modificado durante a vida útil da barragem, resultando em uma altura final acima do esperado.
- Durante a operação da barragem os riscos geotécnicos tendem a ser subestimados e não considerados como parte do processo industrial.
- Rejeitos não são solos naturais e podem apresentar comportamento não esperado, afetando a performance da barragem, principalmente quando ocorrem reações químicas não esperadas.
- Os níveis de água em uma barragem de rejeitos são geralmente altos e a eficiência da drenagem interna pode reduzir com o passar do tempo, por diversos motivos.
- Ineficiência no monitoramento destas estruturas.
- Quaisquer estruturas de disposição estão suscetíveis a eventos extremos da natureza, tais como terremotos, falhas geológicas e chuvas intensas (denominado pelo autor como “geologia externa”).

Em função dos fatos expostos acima, o grande desafio atual das empresas de mineração consiste em minimizar os impactos ao meio ambiente e reduzir os riscos de acidentes através da adoção de alternativas otimizadas.

Probabilidade	Consequências				
	Desprezível	Baixo	Moderado	Alto	Extremo
Esperado	<i>ausência de documentos da construção</i>				<i>nível de água elevado</i>
Alto		<i>altura final incompatível com projeto</i>	<i>reação química inesperada</i>	<i>heterogeneidade e anisotropia</i>	
Moderado				<i>campanha investigativa inadequada</i>	<i>monitoramento inadequado</i>
Baixo					<i>modelagem imprecisa</i>
Improvável					<i>geologia externa</i>

FIGURA 2.60 – Matriz de risco para barragens de rejeitos, de acordo com a experiência dos autores (Fonte: Vanden Berghe et al, 2011)

Em setembro de 2010 o governo Federal estabeleceu através da Lei Federal 12.334 (Brasil, 2010), a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água, rejeitos e resíduos industriais, além de criar o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens. A lei define as responsabilidades, as funções do empreendedor e determina que esse é o responsável legal pela segurança de barragens. As barragens passam a ser alvo de fiscalização, sendo obrigatório um plano de segurança e um plano de ação emergencial.

Anteriormente à Lei Federal 12.334 (Brasil, 2010), no Brasil, quando o assunto era disposição de rejeitos espessados, a preocupação principal das mineradoras residia na comparação financeira das alternativas de espessamento, comparadas à disposição de rejeitos em forma de polpa. Os principais fatores de impacto financeiro são as alturas das barragens para disposição de polpa comparada com o custo da planta de espessamento e seus custos operacionais. Quanto maior a altura da barragem, maior é a possibilidade de uma alternativa de espessamento de rejeito ser adotada, em função dos custos associados. Entretanto, em termos de risco, a FIG. 2.61 mostra que barragens de menores alturas possuem maior probabilidade de falha (entende-se aqui como falha a ocorrência da perda da função esperada) se comparada com as barragens de maior altura, mas não se conhece a quantidade e altura das barragens analisadas. Dessa forma, é mais sensato dizer que o risco está mais relacionado ao projeto, construção e gestão dessas estruturas do que apenas à altura da mesma.

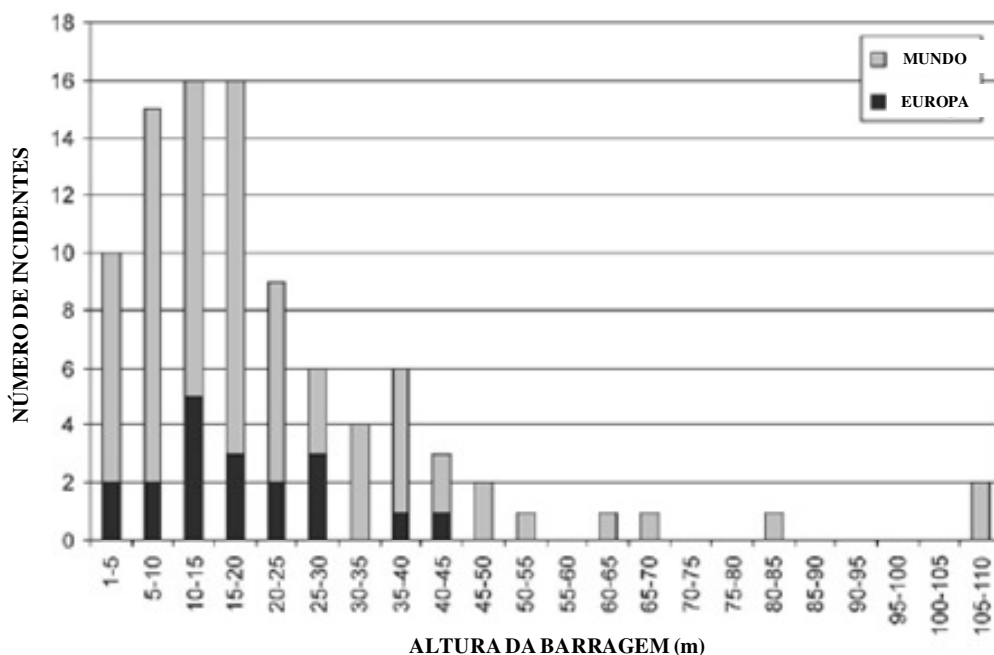


FIGURA 2.61 – Distribuição do número de incidentes relacionados com a altura da barragem (Fonte: Rico et al, 2008)

As análises financeiras não levam em conta os danos associados à ruptura de barragens para disposição de rejeitos em polpa. Além disso, é possível observar na FIG. 2.62 que as principais causas de incidentes de barragens estão relacionadas a problemas de percolação de água no maciço (estabilidade de taludes, galgamento, chuvas inesperadas e *piping*).

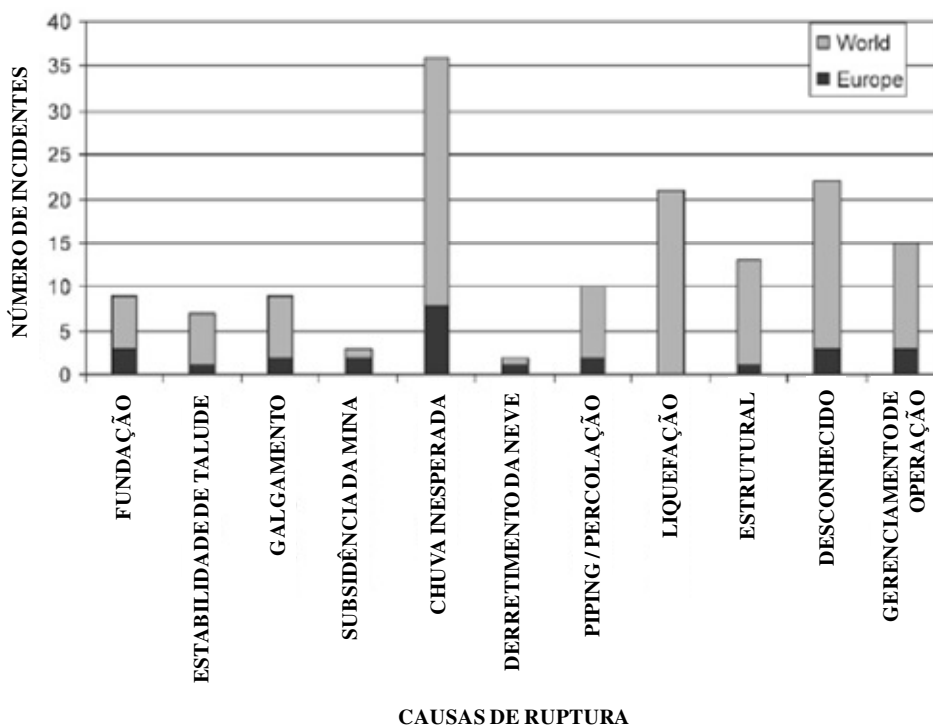


FIGURA 2.62 – Distribuição do número de incidentes relacionados com a causa (Fonte: Rico et al, 2008)

Em todas as fases da vida útil da uma barragem estará presente o risco da ocorrência de falhas, mesmo quando as devidas medidas mitigadoras são adotadas. Nesse contexto as atividades de gestão de risco compreenderão a utilização de resultados de análises de risco de forma a prover os recursos necessários à garantia da segurança da barragem, conforme estabelecido na Lei Federal 12.334 (Brasil, 2010).

Para Franco (2008), o estudo do risco atribuído e a análise das consequências resultantes de uma ruptura, em qualquer tipo de barragem, são pressupostos básicos na discussão sobre gerenciamento de risco.

Segundo Colle (2008), a gestão de risco é definida como o processo de decisão que utiliza resultados da análise de risco de forma a determinar as ações necessárias. De acordo com o autor, o processo de gerenciamento de risco envolve a implantação da avaliação de risco, do plano de gerenciamento de risco e do plano de contingência. O plano de gerenciamento de risco serviria para reduzir os riscos envolvidos desde a etapa de projeto e o plano de contingência se prestaria a facilitar as tomadas de decisões em cenários de ruptura.

O termo “risco” é adotado por vários autores relacionados à literatura técnica de obras geotécnicas como sendo o produto entre a probabilidade de ocorrência de falha pela grandeza de suas consequências (Baptista, 2008; Perini, 2009; Colle, 2008; Petronilho, 2010).

A gestão de riscos, por sua vez, pode ser definida “como o desenvolvimento integrado das atividades de análise de riscos, da avaliação de riscos, da decisão sobre a sua aceitabilidade, mitigação, prevenção, detecção, planejamento de emergência, revisão e comunicação” (Baptista, 2008). A gestão de risco é, portanto, um conjunto de atividades que deve associar as diversas disciplinas, incluindo aquelas relacionadas às áreas políticas, sociais, ambientais e financeiras. Essa multidisciplinaridade deve ser bem consolidada para os processos de tomada de decisão. A FIG. 2.63 mostra um exemplo de aplicação do gerenciamento de risco.



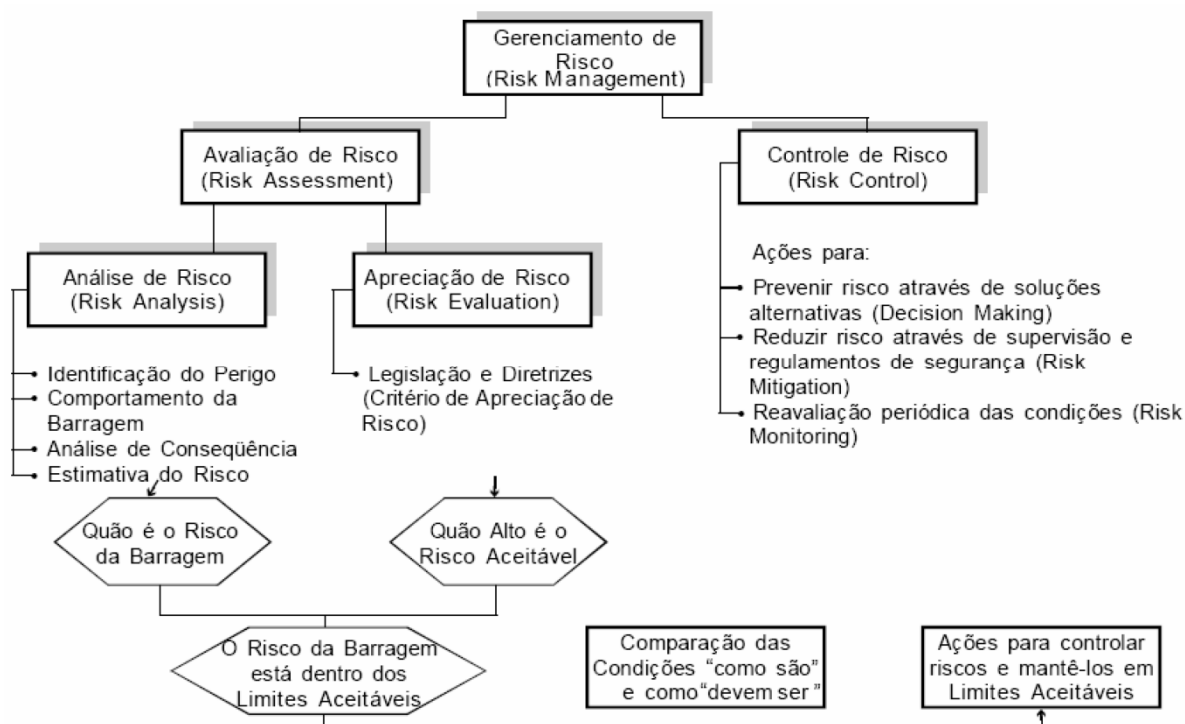


FIGURA 2.63 – Funcionamento do gerenciamento de risco (Fonte: Colle, 2008)

Para Duarte (2008), cada barragem apresenta particularidades em relação ao local em que se encontram, ao tipo de processo industrial e às características dos rejeitos, ao tipo de construção e operação e, por isso, não devem ser utilizados procedimentos padronizados, comuns para todas as barragens.

Atualmente existem ferramentas de análise de risco que podem oferecer grande subsídio à gestão de riscos dessas estruturas, sendo que algumas delas já possuem aplicação consolidada noutras áreas. As análises de risco podem ser classificadas em qualitativa e quantitativa, conforme mencionado por Perini (2009) e Colle (2008). No âmbito qualitativo, a análise de risco seria composta por uma avaliação do impacto e probabilidade de um evento de falha, priorizando os riscos de acordo com os efeitos esperados. Esse tipo de análise pode indicar a necessidade de uma ação de gerência de risco para a estrutura analisada, mas é incapaz de avaliar a importância relativa entre os vários riscos identificados. Já na análise quantitativa, busca-se quantificar a probabilidade de cada risco e a consequência da falha, conduzindo maior confiabilidade.

As análises qualitativas e quantitativas podem ainda serem tratadas de forma separada ou em conjunto, sendo essa última também denominada semi-quantitativa. Nas análises qualitativas e/ou semi-quantitativas os critérios mais usuais são as denominadas matrizes de risco. Uma matriz de

risco classifica a probabilidade de falha e as respectivas consequências através de escalas numéricas ou descritivas (Baptista, 2008).

Além disso, Baptista (2008) estudou os principais métodos de análise de risco qualitativa, semi-quantitativa e quantitativa passíveis de serem utilizados no domínio das barragens de aterro. A autora levou em consideração questões relacionadas com os seus objetivos, campos de aplicação, princípios e procedimentos de aplicação, vantagens e limitações, realizando aplicações práticas ilustrativas. Com uma das conclusões Baptista (2008) revela que o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* ou Análise do Modo e Efeito das Falhas) é “um dos métodos mais versáteis, podendo ter uma aplicação transversal a todas as fases da vida e a todos os subsistemas destas infraestruturas”.

Conforme se verá adiante, nesse trabalho optou-se pelo método FMEA para análise de risco dos cenários de disposição que serão abordados no próximo capítulo. O FMEA é uma ferramenta que permite a avaliação de riscos, por meio da identificação dos possíveis modos de falha e consequências associadas, com foco nos impactos e no julgamento da possibilidade de ocorrência dos mesmos.

De acordo com Petronilho (2010), uma das primeiras descrições do FMEA foi feita em 1949, sendo desenvolvido pelo exército norte-americano. Após passar por várias revisões, foi definida a forma básica para se analisar um sistema e seus modos de falhas, os impactos potenciais de cada falha e a severidade das suas consequências. Foi a partir de 2000 que essas técnicas começaram a ser aplicadas em grande escala no âmbito da indústria automotiva, sendo rapidamente adaptadas a outras áreas do conhecimento. De acordo com Oliveira (2010), a avaliação de risco que considera o modo de falha e seu efeito decorrente, FMEA, é possivelmente a mais utilizada no meio técnico.

Outros métodos que permitem a avaliação do risco encontram-se descritos na TAB. 2.10. Maiores detalhes dos métodos de análise de risco podem ser encontrados na literatura técnica (Baptista, 2008; Perini, 2009; Colle, 2008; Petronilho, 2010; dentre outros).

Não é objetivo dessa dissertação o aprofundamento do tema “ferramentas de análise de risco”, mas apenas a utilização de uma delas para fins comparativos entre as alternativas de disposição de polpa e rejeito filtrado. Nesse contexto, foi escolhida a ferramenta FMEA. A escolha do método justifica-se pela sua já aplicabilidade, no meio técnico, em barragens de rejeito de mineração.

TABELA 2.10 – Outros métodos de análise de risco (Fonte: adaptado de Espósito e Caldeira, 2010)

Método	Descrição Sucinta
Listas de verificação (check-lists)	Avaliação de uma lista de itens que permitem estimar o comportamento da barragem de um modo sistemático. Indicado para os casos em que não se podem utilizar métodos mais elaborados.
Análises preliminares de risco	Utiliza listas orientadoras para identificação de riscos, separadamente, a fim de identificar e descrever suas consequências.
Análises de perigos e operacionalidade	Permite identificar perigos a fim de avaliar a influência de potenciais desvios em variáveis que podem contribuir para situações que envolvem problemas operacionais ou situações perigosas.
Índices de risco	Permite a determinação do risco a partir da determinação de um índice global de risco. Recomendado para os casos em que é necessário estabelecer uma hierarquia nos riscos envolvidos.
Diagramas de localização	Identifica e avalia as consequências de uma onda de inundação decorrente de uma ruptura da barragem.
Árvores de eventos	Permite conectar ocorrências iniciadoras de eventos e suas respectivas consequências. Permite a obtenção do entendimento de diversos eventos de modo lógico.
Análises dos modos de ruptura, seus efeitos e sua criticalidade (FMECA)	Semelhante ao FMEA acrescenta procedimentos relativos à hierarquização dos modos de ruptura, conforme a influência combinada da sua probabilidade de ocorrência e da severidade de suas consequências, o que se denota por criticalidade.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia e as premissas utilizadas para o estudo comparativo da disposição de rejeitos do Quadrilátero Ferrífero na forma de torta, comparando-a com a disposição em forma de polpa diluída.

A metodologia desenvolvida consistiu basicamente de quatro etapas, citadas a seguir. Nos subitens que se seguem essas etapas encontram-se detalhadas.

- Revisão bibliográfica.
- Elaboração dos cenários de disposição de rejeitos no contexto da região do Quadrilátero Ferrífero.
- Análises de estabilidade física, determinísticas e probabilísticas.
- Análise de risco.

#### 3.1 Revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica consiste em apresentar as publicações correntes correlacionadas ao tema, dentro de uma visão crítica. Portanto, a revisão bibliográfica aborda a importância da exploração do minério de ferro para a economia brasileira, a tendência da redução de teores de ferro nas jazidas, o consequente aumento da produção de rejeitos e os métodos de disposição desses materiais.

Dentre as metodologias abordadas para disposição de rejeito procurou-se aprofundar na técnica de disposição de rejeitos filtrados, método utilizado atualmente em regiões desérticas, devido à escassez de água e à possibilidade de sua recirculação para a planta de processo. A revisão bibliográfica indicou que esse método apresenta vantagens e desvantagens, mas pode se tornar uma boa opção na realidade minerária brasileira, uma vez que existe uma tendência crescente de produção de rejeitos e escassez de área de disposição. Além disso, uma das grandes vantagens é a possibilidade de redução de riscos e consequentemente redução de impactos à sociedade e ao meio ambiente.

O comportamento geotécnico do rejeito de minério de ferro foi explorado, tanto para os rejeitos granulares quanto para rejeitos finos. O objetivo foi o de prognosticar os parâmetros geotécnicos

desses rejeitos, tanto para a disposição convencional em forma de polpa quanto para a disposição de rejeitos filtrados e compactados em campo. Esses dados são importantes para alimentação das análises de estabilidade determinística e probabilística, podendo servir inclusive como parâmetros em anteprojetos.

A problemática do gerenciamento de risco para estruturas de contenção de rejeitos também é abordada ao final da revisão bibliográfica, onde foram mencionados os métodos de análise de risco que podem ser utilizados objetivando a avaliação do risco, quantitativa ou qualitativamente. Nessa ocasião foi optado e justificado o uso da ferramenta FMEA nessa dissertação.

### 3.2 Elaboração dos cenários de disposição dos rejeitos filtrados, em forma de polpa e ciclados

Para fins de análise comparativa, um estudo de caso conceitual e hipotético foi elaborado com o auxílio do software “AutoCad”, para o modelamento geométrico das alternativas de disposição de rejeitos, permitindo a avaliação dos cenários de disposição de polpas e tortas e seus impactos sobre os reservatórios.

As condições de contorno estabelecidas em cada cenário foram tais que propiciassem um panorama similar ao que comumente se encontra na região do Quadrilátero Ferrífero. São elas:

- Topografia acidentada (fictícia).
- Rejeitos inertes.
- Ocupação humana a jusante existente.
- Interesse ambiental a jusante elevado.

Os dados de produção de rejeito e os parâmetros de projeto que concernem à engenharia de processos foram obtidos de Guimarães (2011), conforme já apresentado no item 2.6.2 (Capítulo 2). O autor analisou técnica e economicamente as diversas tecnologias de filtragem disponíveis no mercado, visando sua aplicação em rejeitos de minério de ferro gerados em algumas usinas de beneficiamento do Quadrilátero Ferrífero. Guimarães (2011) trabalhou com 3 alternativas de rota de processo, também já descritas no item 2.6.2 (Capítulo 2) dessa dissertação. Para a elaboração dos arranjos foram utilizadas apenas as alternativas 1 e 2 de Guimarães (2011), por envolverem filtragem dos rejeitos de flotação e lama. A alternativa 3 não foi adotada por gerar rejeitos em forma de pasta como produto do espessamento das lamas, não sendo objeto de estudo dessa dissertação.

Os dados obtidos por Guimarães (2011) foram importantes neste trabalho, pois possibilitaram conceber arranjos de disposição dos rejeitos em consistência de torta. Para fins comparativos, foi desenvolvida a alternativa denominada “caso base”, com rota de processo convencional (sem desaguamento) referente aos rejeitos totais em forma de polpa. De forma resumida, as alternativas de rota de processo consideradas estão apresentadas na TAB. 3.1.

TABELA 3.1 – Alternativas de rota de processo estudadas para rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

	Alternativa 1	Alternativa 2*	Caso Base**
Rejeito de Flotação	Filtragem via filtro de disco convencional. Umidade final de 12%.	Filtragem via filtros prensa horizontal. Umidade final de 14%.	Obtenção apenas da polpa, não sucedido por desaguamento de rejeitos. Umidade final de 100%.
Lamas	Filtragem via filtros prensa horizontal. Umidade final de 20%.		

\*filtragem da mistura de rejeitos de flotação e lama.

\*\*umidade final calculada para 50% de sólidos em massa.

Para elaboração dos cenários de disposição foi adotada uma topografia fictícia e uma vida útil máxima de 20 anos. Com base nos dados gerados por Guimarães (2011) foram calculados os volumes de rejeitos a serem dispostos para cada alternativa. Para tanto, foi necessário adotar o índice de vazios para os rejeitos depositados e a massa específica dos grãos, sendo esse valor respaldado pela literatura técnica no caso da disposição em forma de polpa. O teor de sólidos para os rejeitos filtrados foram obtidos de Guimarães (2011). A seguir encontra-se o embasamento teórico para a adoção de valores coerentes para essas variáveis.

Diante da incerteza do índice de vazios para rejeitos depositados em forma de polpa, comumente adota-se um valor compreendido entre 0,7 a 1,1, conforme prática corrente no dimensionamento de barragens de rejeitos de polpa (Welch, 2000 apud Mafra et al, 2011). De acordo com esses autores, o valor unitário pode ser utilizado para estudos de dimensionamento de barragens de rejeito em nível básico. Nesse trabalho, para o método de disposição em forma de polpa, o índice de vazios foi adotado como sendo igual à unidade. Para o rejeito filtrado foram utilizados índices de vazios menores que a unidade, sendo os valores também admitidos.

Para a massa específica dos grãos foi adotada a equação teórica de Espósito (2000), conforme apresentado no Capítulo 2 (Eq. 2.1). De acordo com Guimarães (2011), o teor de ferro presente nas

amostras de lamas geradas em planta piloto com o minério de alimentação da futura ITMI VGR é de 37,3%. Dessa forma, foi possível obter uma massa específica dos grãos de 3,62g/cm<sup>3</sup>.

O teor de sólido para o caso base também foi arbitrado. Mafra et al (2011) afirmam que o rejeito de mineração é em geral transportado em forma de polpa, com teores de sólido variando entre 30 e 50%. Neste trabalho adotou-se um teor de sólidos de 50%.

Diante das características e premissas apresentadas foram elaborados os cenários de disposição apresentados na TAB. 3.2.

TABELA 3.2 – Alternativas de rota de processo estudadas para rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

Alternativas	Rota de Processo	Cenários de Disposição
1	Filtragem em separado de rejeitos de flotação e lama	Disposição em pilhas de rejeito filtrado compactado
2	Filtragem da mistura de rejeitos de flotação e lama	
Caso Base	Obtenção da polpa	Disposição em barragens de solo compactado
		Disposição em barragens de rejeito ciclonado

### 3.3 Análises de estabilidade física determinísticas e probabilísticas

A estabilidade física de uma estrutura geotécnica é comumente obtida pela relação entre os esforços resistentes e os esforços solicitantes ao longo de uma superfície crítica de ruptura. Portanto, a fim de validar a geometria proposta nos arranjos elaborados para cada cenário, foram realizadas primeiramente análises de estabilidade física determinísticas. Essas análises foram alimentadas por parâmetros médios encontrados na literatura técnica, conforme abordado no Capítulo 2 dessa dissertação, e também considerando a prática comum no meio técnico.

Sabe-se que o fator de segurança admitido para a estrutura geotécnica, quando obtido via análise probabilística, traz consigo uma determinada probabilidade de falha. O risco, no que diz respeito à estabilidade de taludes, é associado à probabilidade de insucesso com relação à variabilidade dos parâmetros de resistência. Portanto, quando os parâmetros de resistência da estrutura são muito

variáveis, o que comumente acontece, é pertinente admitir uma função de densidade de probabilidade que representará a variabilidade dos parâmetros.

Espósito (1995) apontou a importância das análises probabilísticas para um maior controle do projeto e construção de barragens de rejeito. Segundo a autora, as análises de estabilidade devem levar em conta a variabilidade dos parâmetros geotécnicos, haja vista que a utilização de apenas um parâmetro geotécnico médio para o rejeito numa análise determinística não reflete o comportamento variável desses materiais. Essa deveria ser uma prática corrente no dimensionamento de projetos que envolvam a disposição desses materiais, com o objetivo de propiciar maior segurança, economia e menores danos e perdas em caso de falhas. Entretanto, o método de análise probabilístico requer ainda o conhecimento da variabilidade dos parâmetros geotécnicos, sendo um item de discussão no meio técnico.

No presente trabalho optou-se também pela análise probabilística por dois motivos. O primeiro deles diz respeito à grande variabilidade das propriedades geotécnicas dos rejeitos, conforme já abordado na literatura técnica, principalmente no caso de barragens ciclonadas. O segundo motivo remete à busca da probabilidade de ruptura para geometrias comumente utilizadas e a determinação do fator de segurança mínimo para as estruturas analisadas.

O programa utilizado para as análises de estabilidade foi o Slide, da Rocscience Inc., Toronto, Ontario, Canadá. Esse software permite a pesquisa da superfície de ruptura com menor fator de segurança, através de métodos determinísticos e probabilísticos, quer sejam circulares ou não-circulares. Os métodos aplicados nesse trabalho foram o de Bishop Simplificado para análises determinísticas e Monte Carlo para análises probabilísticas.

O enfoque probabilístico via programas computacionais são comumente executadas utilizando-se o mesmo princípio da análise determinística, onde o fator de segurança é obtido através da análise de várias superfícies de ruptura divididas em lamelas. Entretanto, a análise probabilística leva em conta a variação dos parâmetros de projeto, auxiliando a confiabilidade e sensibilidade das alternativas de projeto mediante as incertezas implícitas.

Conforme mencionado, para o estudo da análise probabilística optou-se pelo método de Monte Carlo, onde foi utilizada função densidade de probabilidade do tipo triangular. Nesse método são atribuídas funções de probabilidades para cada variável e, a partir daí, são gerados conjuntos de



valores aleatórios para análise de estabilidade, sendo os fatores de segurança obtidos através de uma função de distribuição de probabilidade.

Com relação aos parâmetros geotécnicos, os seus valores foram limitados de acordo com a literatura. No caso das análises probabilísticas, foram consideradas distribuições de probabilidade triangular para a variabilidade dos parâmetros de resistência.

Alves (2009) também analisou a estabilidade dos taludes e sua probabilidade de falha associados à disposição compartilhada de estéril e rejeito depositados num mesmo local, aplicando o método de Monte Carlo. Em seu trabalho, no que diz respeito ao número de iterações durante a realização de análises probabilísticas, o autor propôs uma rotina onde são realizadas simulações a fim de estabelecer o número de iterações que serão realizadas pelo método de Monte Carlo. O autor estabeleceu pelo menos três hipóteses (1.000, 10.000 e 100.000) e verificou que a hipótese 100.000 apresentou a menor variação dos resultados de saída, observando-se a convergência dos valores de FS (Fator de Segurança), média e desvio padrão. Alves (2009) afirma que o número de iterações está diretamente ligada à probabilidade de ruptura, sugerindo no mínimo 100.000 iterações para uma probabilidade de ruptura de 1/10.000. Caso o tempo de processamento seja considerável, o autor sugere a redução do número de iterações, desde que a média e o desvio padrão apresentem pequena variação.

A TAB. 3.3 apresenta os valores aceitáveis para probabilidade de ruptura de barragens, dentre outros tipos de estruturas.

TABELA 3.3 – Valores típicos de probabilidade de ruptura (Dell'Avanzi e Sayão, 1998)

Tipo de Obra	Probabilidade de Ruptura
Fundações	$10^{-2}$ a $10^{-3}$
Taludes de Mineração	$10^{-1}$ a $10^{-2}$
Barragens	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Estruturas de Contenção	$10^{-2}$ a $10^{-3}$

Devido ao tempo necessário para a completa realização das análises de estabilidade probabilística com 100.000 iterações, além da memória requerida do computador, nesse trabalho optou-se pela realização de análises com esse nível de precisão, porém limitadas apenas para a potencial superfície de ruptura com fator de segurança mínimo, obtida na análise determinística. Assume-se, portanto, que a probabilidade de falha calculada para a superfície crítica obtida na análise

determinística representa a probabilidade de falha para todo o maciço. Em muitos casos essa simplificação pode ser bem aceita, mas nem sempre isso ocorre, principalmente em casos onde há presença de materiais com heterogeneidade e anisotropia.

Na elaboração do modelo geotécnico foram levados em conta apenas os maciços (rejeito/solo) obtidos em cada cenário de disposição, sendo a fundação considerada competente. Assim sendo, a fundação, considerada extremamente competente nesse caso, não deverá influenciar a probabilidade de falha das estruturas analisadas. Nesse caso está sendo analisada a geometria do maciço, apenas.

Para fins de análise de estabilidade das barragens foi considerada a condição normal de operação de cada estrutura (aquela em que a drenagem interna opera de forma eficiente). Ainda, para avaliar a influência da existência de poropressão no interior do maciço (condição não drenada), foram realizadas análises paramétricas com o parâmetro  $r_u$ . O parâmetro  $r_u$  é definido como a relação entre a poropressão e a tensão geostática normal efetiva em um determinado ponto.

### 3.4 Análises de risco

As análises de risco utilizando-se o FMEA foram realizadas para avaliação do risco de cada alternativa de disposição. Esse método foi escolhido para avaliar o risco e auxiliar o conhecimento acerca do funcionamento e do desempenho dos sistemas de disposição de rejeito em forma de polpa e torta, incidindo sobre a fase final de operação das estruturas.

As análises de risco servirão, portanto, como ferramentas para identificar os modos de falha e suas consequências, para que seja possível conhecer o risco de cada cenário.

A análise FMEA isola os possíveis modos de falha e suas consequências. Segundo Espósito e Caldeira (2010), como resultado da aplicação do FMEA têm-se os modos potenciais de falha, suas causas e efeitos, sendo a interpretação condicionada devido ao fato da análise ser qualitativa. Ainda segundo esses autores e Petronilho (2010), a análise FMEA para sistemas geotécnicos pode ser realizada seguindo os seguintes passos:

- Definição e descrição do sistema a ser analisado, dividido em componentes básicas.
- Identificação dos modos de falha potenciais de cada componente e de cada função em análise.
- Determinação das consequências locais ou globais para cada modo de falha.

- Identificação dos métodos de detecção dos modos de falha.
- Identificação das medidas mitigadoras necessárias para prevenir a ocorrência da falha ou limitar os seus efeitos.
- Ordenação das falhas potenciais de acordo com vários aspectos (segurança, custos e operacionalidade).
- Elaboração da matriz de risco.

A análise de risco foi composta nessa dissertação por três categorias, a saber:

- Categoria de ocorrências.
- Categoria de detecção.
- Categoria de severidades.

Foram elaboradas as tabelas apresentadas a seguir, para que fosse possível atribuir índices para cada categoria.

A categoria das ocorrências considera quão frequente as falhas podem ocorrer. O índice de ocorrência (O) varia numa escala de 1 a 10. Quanto maior O, maior a probabilidade de ocorrência de uma falha, conforme TAB. 3.4.

TABELA 3.4 – Índice de Ocorrência

Ocorrência (O)	Probabilidade de Ocorrência (eventos por ano)
1	Improvável (até 0,01%)
2,3*	Remota (0,01 a 0,1%)
4,5*	Ocasional (0,1 a 1%)
6,7*	Alto (1 a 10%)
8,9*	Esperado (10 a 20%)
10	Provável (> 20%)

\*limite inferior, limite superior.

O índice de detecção (D) considera a probabilidade de serem detectadas as causas das falhas antes que elas ocorram e varia numa escala de 1 a 10. Quanto maior D, menor a probabilidade de detecção, conforme TAB. 3.5. A inclusão de D é de fundamental importância, haja vista que alguns mecanismos deflagradores de acidentes não demonstram sinais claros. Assim sendo, mesmo adotando-se uma inspeção rigorosa da estrutura, um mecanismo de alto risco em curso pode não ser notado.

TABELA 3.5 – Índice de Detecção

Detecção (D)	Probabilidade
1	Quase certo
2	Elevado
3	Alto
4	Moderadamente alto
5	Moderado
6	Baixo
7	Muito baixo
8	Remoto
9	Muito remoto
10	Quase impossível

Por último, a categoria das severidades considera a gravidade das consequências de um determinado modo de falha nos âmbitos ambientais, sociais, político e econômico. O índice de severidade (S) varia numa escala de 1 a 10. Quanto maior S, pior são os efeitos de sua consequência, conforme TAB. 3.6.

Para avaliação do risco pode-se utilizar os índices de detecção, ocorrência e severidade. Essas três categorias da análise de risco compõem o NPR, ou “Número Potencial de Risco”, por meio da multiplicação desses três índices (O, D e S). Outra forma de se avaliar o risco é através da matriz de avaliação de risco. Essa matriz bidimensional levará em conta apenas as categorias de severidade e ocorrência, sendo composta, portanto, por duas dimensões numa avaliação qualitativa. A matriz é elaborada em escala de cores, que significam níveis de riscos distintos, conforme descrito a seguir.

- Riscos insignificantes em azul claro.
- Riscos baixos em azul escuro.
- Riscos moderados em amarelo, bege e laranja.
- Riscos altos em vermelho.
- Riscos extremos em bonina.

TABELA 3.6 – Composição para definição da Severidade

Severidade (S)	Impactos Financeiros	Impactos Ambientais	Impactos Legais	Imagem da empresa	Saúde e Segurança
1	Até US\$ 20 mil	Não são esperados impactos	Não são esperados impactos	Não são esperados impactos	Não são esperados impactos
2		Prejuízos de baixa relevância ambiental		Insatisfações restritas/locais por parte da sociedade	Quase acidente
3	De US\$ 20 a 200 mil	Prejuízos individuais, reversíveis a curto prazo	Falha legal leve, não conformidades	Insatisfações locais da sociedade, com reivindicações pontuais	Lesões sem atendimento médico
4		Prejuízos homogêneos, reversíveis a curto prazo		Insatisfações da sociedade, com divulgação da mídia	Lesões com atendimento médico, sem afastamento
5	De US\$ 200 mil a 2 milhões	Prejuízos homogêneos reversíveis a longo prazo	Falha legal moderada, com possibilidade de multa	Insatisfações em âmbito nacional, com cobertura da mídia	Lesões com atendimento médico, com afastamento
6		Prejuízos coletivos reversíveis a curto prazo			
7	De US\$ 2 a 20 milhões	Prejuízos coletivos, reversíveis a longo prazo	Falha legal severa, com multa elevada e perda de confiança da agência reguladora	Insatisfações com proporções sociais de grande escala e abrangência nacional da mídia	Lesões que culminem em incapacidade parcial
8		Prejuízos coletivos, reversíveis a longo prazo, de extensão patrimonial e moral			Lesões que culminem em incapacidade permanente
9	Acima de US\$ 20 milhões	Prejuízos coletivos de grandes proporções, de difícil reparação	Incapaz de cumprir obrigações regulamentares, podendo haver severa restrição de operação	Insatisfações com proporções sociais de grande escala e abrangência internacional da mídia	Uma fatalidade esperada
10		Prejuízos irreparáveis ao meio ambiente.			Múltiplas fatalidades esperadas

A matriz de risco adotada por ser visualizada na FIG. 3.1. Para a sua elaboração foi adotada a mesma classificação para o índice de ocorrência. Da mesma forma, para a severidade foram adotados os mesmos intervalos dos índices de severidade, sendo apenas distinguidos os índices 9, classificado como crítico, e 10, classificado como trágico. Dessa forma a matriz de risco apresenta 6 linhas e 6 colunas.

		OCORRÊNCIA					
		IMPROVÁVEL (1)	REMOTO (2,3)	OCASIONAL (4,5)	ALTO (6,7)	ESPERADO (8,9)	PROVÁVEL (10)
S E V E R I D A D E	TRÁGICO (10)						
	CRÍTICO (9)						
	MUITO SEVERO (7,8)						
	SEVERO (5,6)						
	MÉDIO (3,4)						
	BAIXO (1,2)						

FIGURA 3.1 – Matriz de risco adotada na análise FMEA

A vantagem desse tipo de representação é a visualização dos modos de falha e os riscos inerentes, não passíveis de distinção apenas através da definição do NPR.

A abordagem do risco, através do FMEA, foi apresentada nesse trabalho através das duas formas: uso do NPR e da matriz de risco, conforme metodologia aqui apresentada. Para as análises de risco aplicadas nesse trabalho foram levadas em consideração as premissas a seguir. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos desse estudo comparativo.

- A análise incide na fase final de operação das estruturas.
- Projetos desenvolvidos com campanha de investigação geológico-geotécnica representativa.
- Aplicação da boa técnica e controle durante construção.
- Projeto de instrumentação capaz de identificar anomalias no maciço da estrutura e sua fundação.
- Planejamento efetivo da mina.

## 4 ANÁLISES E RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os arranjos para a disposição dos rejeitos filtrados, ciclizados e em forma de polpa, os resultados das análises de estabilidade (fatores de segurança determinísticos e probabilísticos) e as matrizes de risco obtidas através da aplicação do FMEA. Ainda, ao longo do capítulo são feitas análises a cerca dos resultados obtidos.

### 4.1 Cenários de disposição dos rejeitos filtrados e em forma de polpa

De acordo com as premissas apresentadas no Capítulo 3 dessa dissertação, a TAB. 4.1 apresenta dados de produção, características geotécnicas e o volume total, considerando base seca. Os dados obtidos para cada tipo de rejeito e respectivas alternativas atendem a uma vida útil de 20 anos. Esses dados foram necessários para a elaboração dos cenários de disposição dos rejeitos.

Dos dados obtidos na TAB. 4.1 é possível verificar que o valor de umidade adotada para o rejeito filtrado compactado refere-se à média obtida na literatura técnica (13,7%). Ainda para esse cenário observa-se que, apesar de terem sido arbitrados os valores dos índices de vazios dos rejeitos depositados, os valores obtidos para a densidade seca máxima é coerente com os dados obtidos da literatura (entre 2,07 e 2,84g/cm<sup>3</sup>). Os volumes negativos de água que forma a lagoa de rejeitos significa o déficit de volume de água para saturação do rejeito, ou em outras palavras, não há formação de lago.

A seguir, a FIG. 4.1 apresenta um resumo dos volumes de rejeito de flotação, lama e água a serem disposto, por alternativa de processo. Observa-se o contraste da formação de lago ao se comparar as alternativas de rejeitos filtrados (alternativas I e II) e o caso base.

TABELA 4.1 – Cálculo de volume de rejeitos a ser disposto para cada alternativa estudada

Parâmetro	Unidade	Alternativa I		Alternativa II	Caso Base
		Flotação	Lamas	Mistura	Mistura
w (teor de umidade) do rejeito na saída da planta de desaguamento	%	12,0	20,0	14,0	100,0*
w do rejeito depositado	%	13,7	13,7	13,7	100,0*
Produção nominal de rejeitos	t/h	1025	546	1571	1571
Produção total de rejeitos (projeto)	t	179.580.000	95.659.200	275.239.200	275.239.200
$\rho_s$ (massa específica dos grãos)	g/cm <sup>3</sup>	3,62	3,62	3,62	3,62
e (índice de vazios) do rejeito depositado		0,6	0,75	0,7	1
$\rho_d$ (massa específica seca) do rejeito depositado	t/m <sup>3</sup>	2,26	2,07	2,13	1,81
Volume de rejeito a ser depositado	m <sup>3</sup>	79.372.376	46.244.088	129.255.978	152.065.856
S (grau de saturação) do rejeito depositado	%	82,4	65,9	70,6	362,0
w para 100% de grau de saturação - rejeito depositado	%	16,6	20,7	19,3	27,6
Volume de água nos rejeitos depositados	m <sup>3</sup>	24.512.670	13.057.481	37.570.151	275.239.200
Volume de água retida nos rejeitos (para 100% de saturação)	m <sup>3</sup>	29.764.641	19.818.895	53.223.050	76.032.928
Volume de água que forma a lagoa de rejeitos	m <sup>3</sup>	-5.251.971	-6.761.414	-15.652.899	199.206.272

\*para 50% de sólidos em massa.

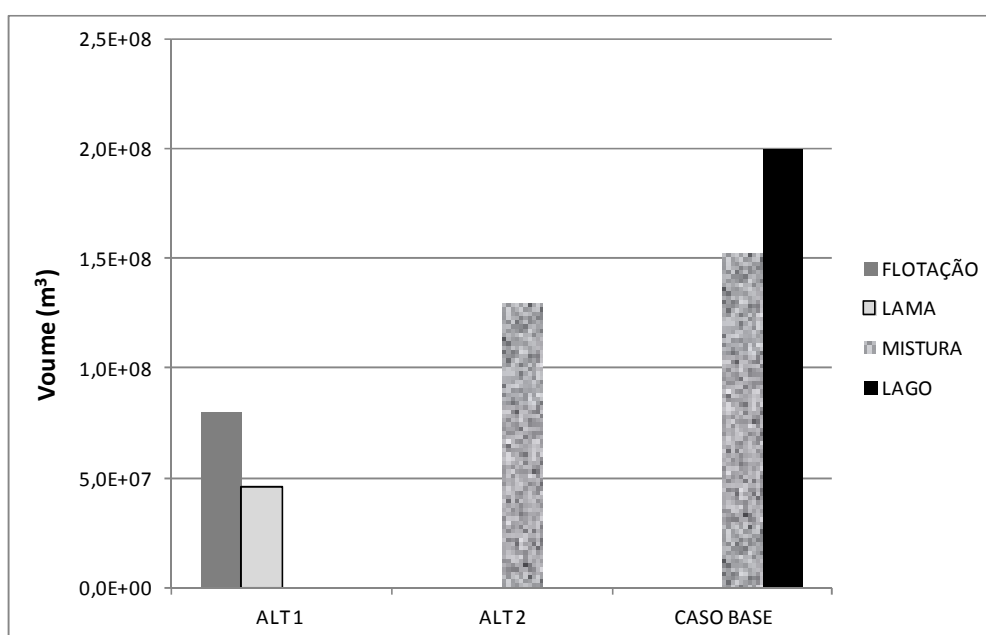


FIGURA 4.1 – Alternativas e volumes (Fonte: Rico et al, 2008)



Estabelecidos os volumes e as condicionantes de processo, foram elaborados os arranjos dos cenários de disposição de rejeitos. Para os rejeitos filtrados (Alternativas I e II) a disposição dar-se-á pela pilha de rejeito filtrado, conhecida na literatura internacional como *dry stack*. Para essas alternativas, como os volumes a serem dispostos encontram-se próximos, foi proposto um único cenário de disposição. Já para a alternativa do caso base foram propostos dois cenários distintos, utilizando-se de barragens como estruturas de contenção de rejeitos. A diferença entre os cenários das barragens remete-se apenas ao método construtivo, sendo um cenário para barragem em solo compactado e outro cenário utilizando-se do rejeito de flotação como material de construção da barragem (barragens ciclônicas). A TAB. 4.2 apresenta um resumo do volume e cenário de disposição, por alternativa de rota de processo.

TABELA 4.2 – Cálculo de volume de rejeitos (base seca) a ser disposto para cada alternativa

Cenário	Alternativa 1 Mm <sup>3</sup>	Alternativa 2 Mm <sup>3</sup>	Caso Base Mm <sup>3</sup>
1 - Pilha de rejeito filtrado	125,6	129,3	-
2 - Barragem em solo compactado	-	-	152,1
3 - Barragem ciclônica	-	-	152,1

Os arranjos obtidos estão apresentados no Apêndice dessa dissertação. A TAB. 4.3 resume os principais dados geométricos das estruturas obtidas.

TABELA 4.3 – Características geométricas obtidas para cada cenário

Cenário	Área Ocupada em Planta ha	Volume Geométrico Mm <sup>3</sup>	Altura Máxima m
1 - Pilha de rejeito filtrado	168,6	130,0	276
2 - Barragem em solo compactado	288,7	152,2	216
3 - Barragem ciclônica	237,2	110,1	211

#### 4.2 Análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas

Esse subitem apresenta as análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas desenvolvidas com o objetivo de avaliar o fator de segurança da superfície crítica e sua probabilidade de falha. Foram analisadas as geometrias propostas para cada cenário. No caso das análises determinísticas

foram considerados os parâmetros efetivos médios apresentados na TAB. 4.4. Não foram realizadas análises com parâmetros totais para que fosse possível simular o efeito da poropressão desejada nas análises.

TABELA 4.4 – Parâmetros médios efetivos adotados nas análises de estabilidade

Material	Identificação	Peso Específico Saturado (kPa)	Coesão (kPa)	Ângulo de Atrito (°)
Fundação	Fundação	<i>competente</i>		
Solo compactado	Aterro	20	25	35
Rejeito total	Rejeito	<i>não interfere nas análises</i>		
Underflow	UF	18	0	30
Overflow	OF	<i>não interfere nas análises</i>		
Rejeito filtrado compactado	Filtrado	20	10	35

Conforme já mencionado o nível de água permanente foi estabelecido para a condição normal de operação, onde a drenagem interna cumpre perfeitamente a sua função, sendo o NA (nível de água) estabelecido no interior dos drenos (filtro septo vertical e/ou tapete drenante). No caso da barragem ciclona, o NA se estabelece no contato entre o underflow e o maciço inicial, devido às condições de permeabilidade desses materiais. Para avaliar a influência da existência de poropressão no interior do maciço, foram realizadas análises com o parâmetro  $r_u$  equivalente a 0,15, valor comumente adotado na prática. Ao final, é apresentada uma análise de sensibilidade para esse parâmetro.

As FIGS. 4.2 a 4.7 apresentam os resultados das análises determinísticas, com e sem o desenvolvimento de poropressão no maciço, ou seja, na condição drenada e não drenada. A TAB. 4.5 apresenta um resumo dos resultados obtidos.

Para as análises probabilísticas foram considerados os parâmetros efetivos apresentados na FIG. 4.8. Foi adotada distribuição triangular para os materiais analisados, conforme já mencionado. Para a pilha de rejeito filtrado o ângulo de atrito variou de 30 a 45°, sendo mais frequente a ocorrência de valores próximos de 30°. A coesão variou 5 a 15kPa, sendo mais frequente valores próximos à média. No caso da barragem em solo compactado, o ângulo de atrito variou de 25 a 40° e a coesão de 15 a 30kPa, sendo para ambos os parâmetros admitidas melhores condições geotécnicas (pico do triângulo no valor máximo). A barragem ciclona, por sua vez, teve apenas o ângulo de atrito

como parâmetro variável. Esse variou de 20 a 40°, sendo mais frequente valores próximos à média. Optou-se por considerar a coesão nula por se tratar de underflow (comportamento arenoso). Os histogramas das análises probabilísticas estão apresentados nas FIGS. 4.9 a 4.14.

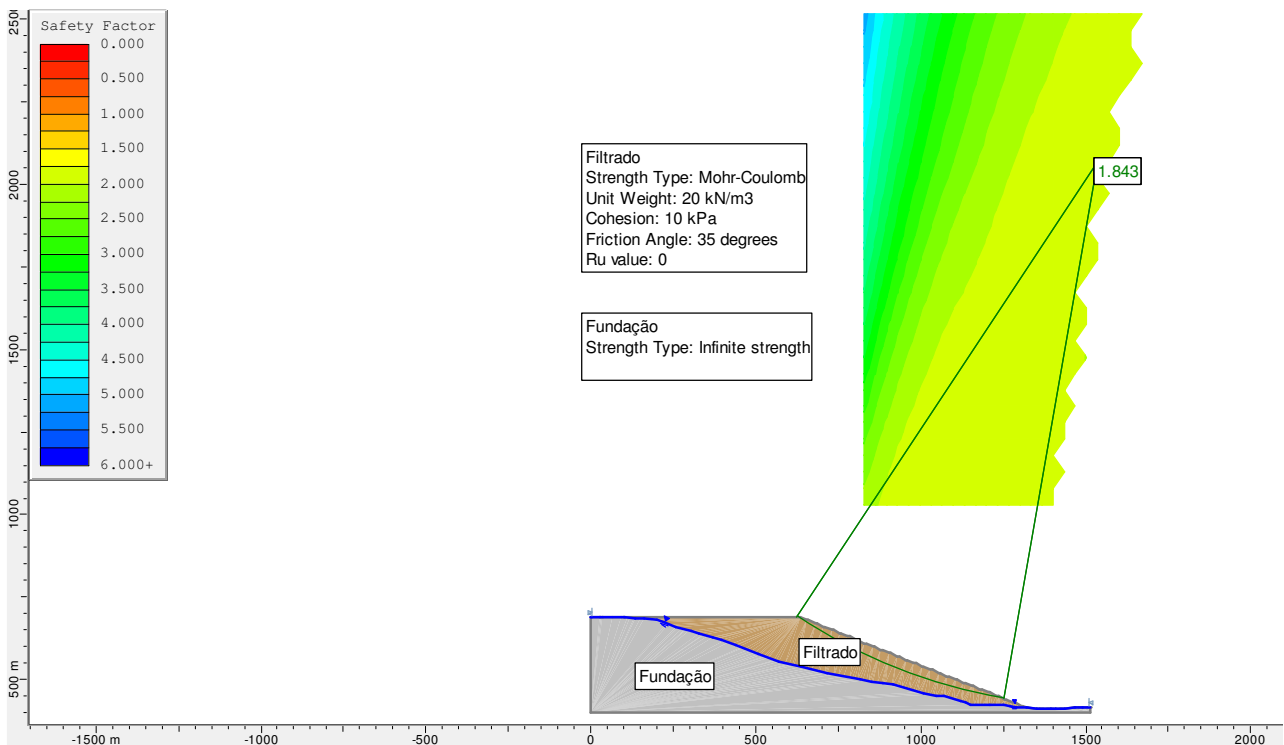


FIGURA 4.2 – Análise determinística – pilha de rejeito filtrado – Fator de segurança de 1,843

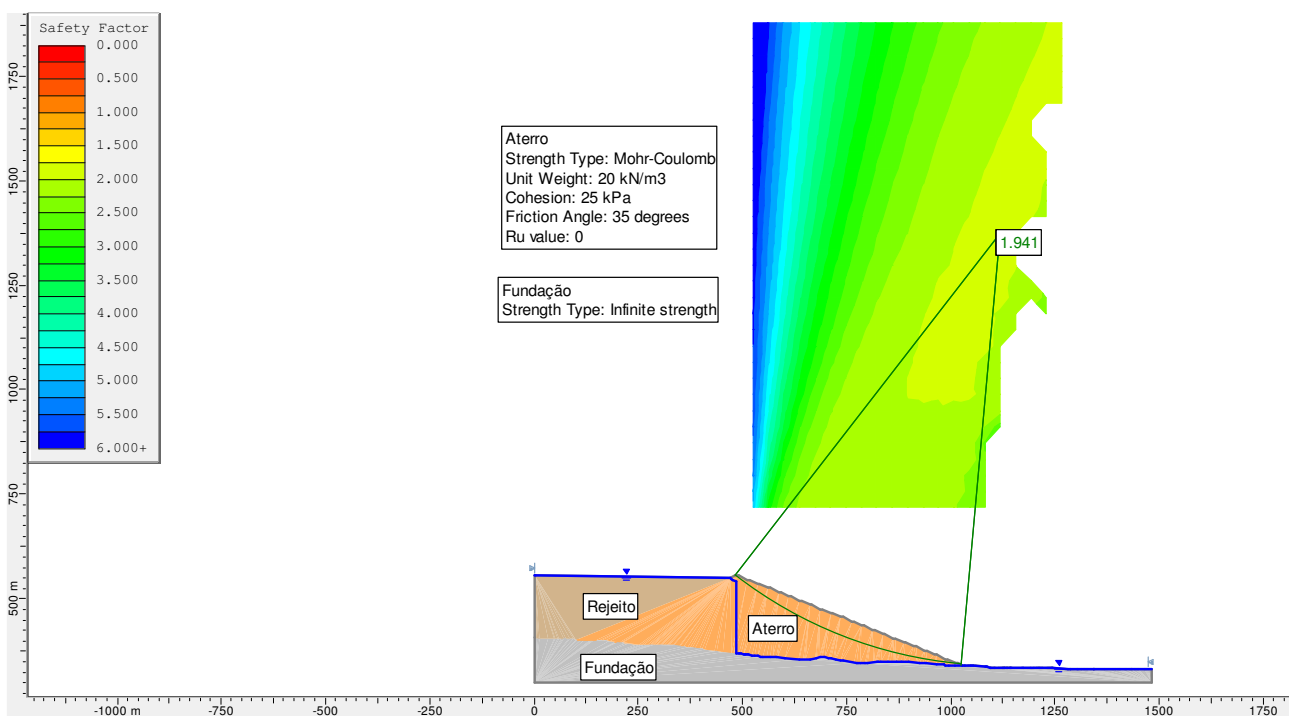


FIGURA 4.3 – Análise determinística – barragem em solo compactado – Fator de segurança de 1,941

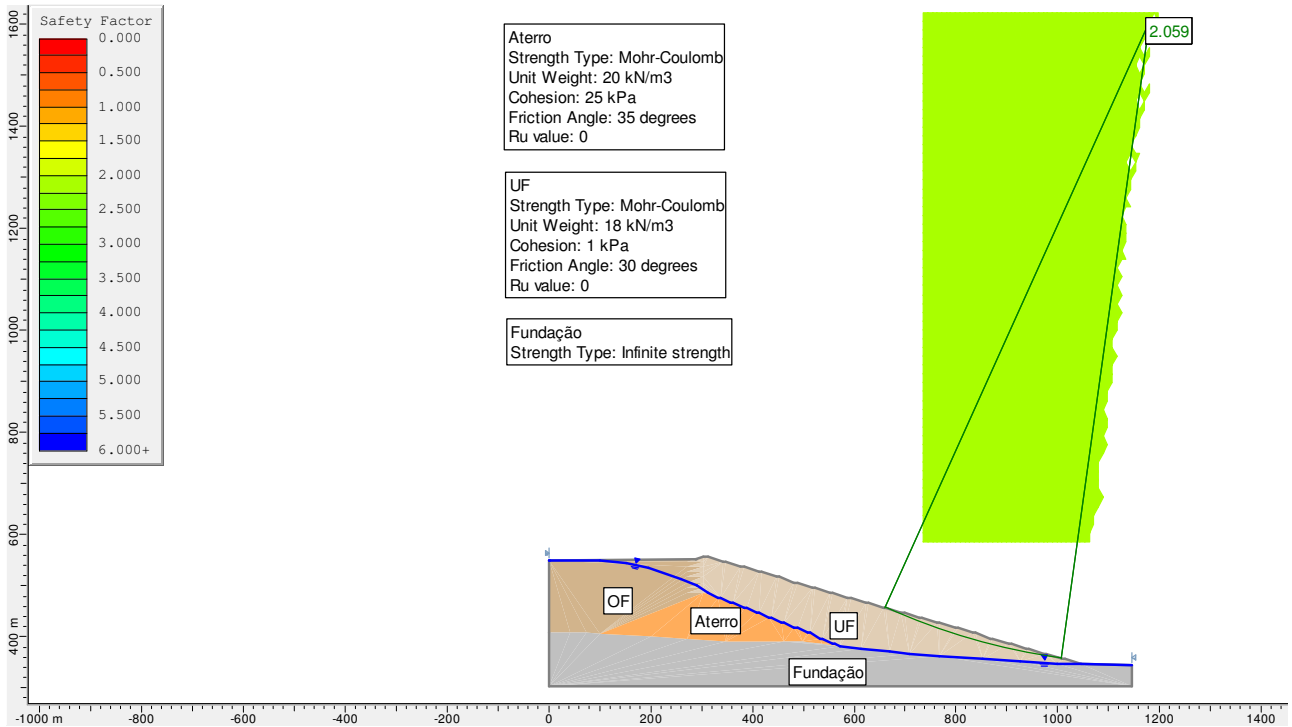


FIGURA 4.4 – Análise determinística – barragem ciclona – Fator de segurança de 2,059

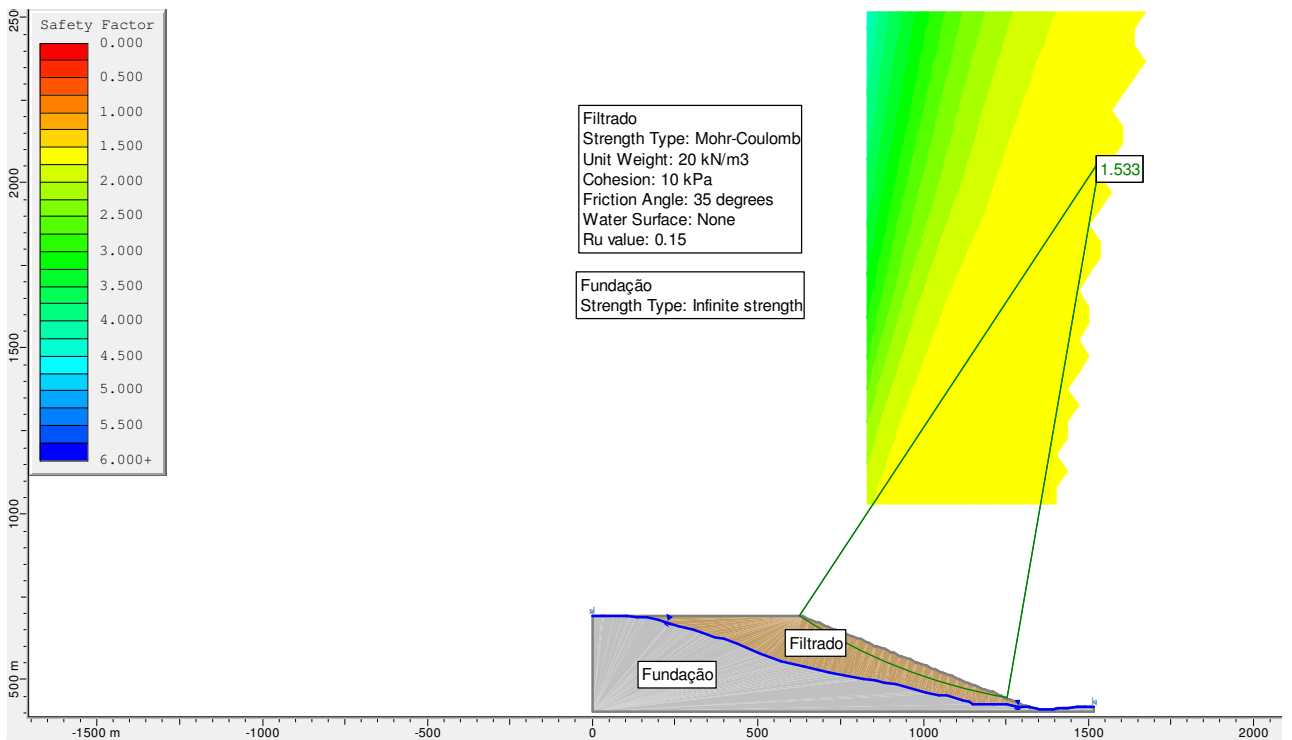


FIGURA 4.5 – Análise determinística com  $r_u$  – pilha de rejeito filtrado – Fator de segurança de 1,533

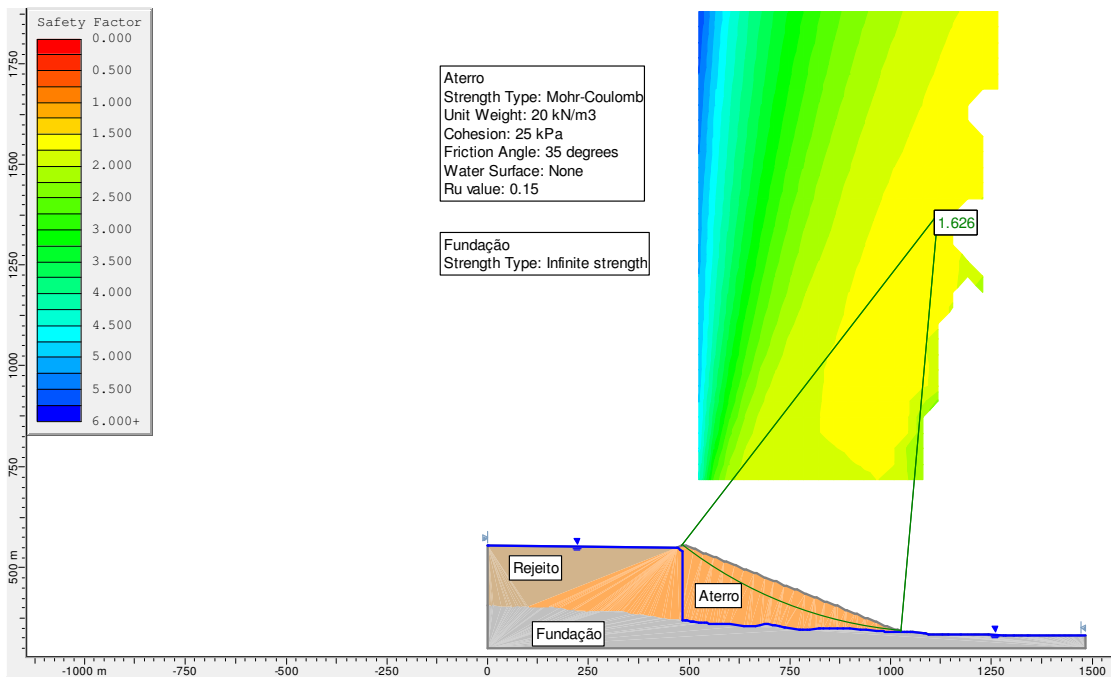


FIGURA 4.6 – Análise determinística com  $r_u$  – barragem em solo compactado – Fator de segurança de 1,626

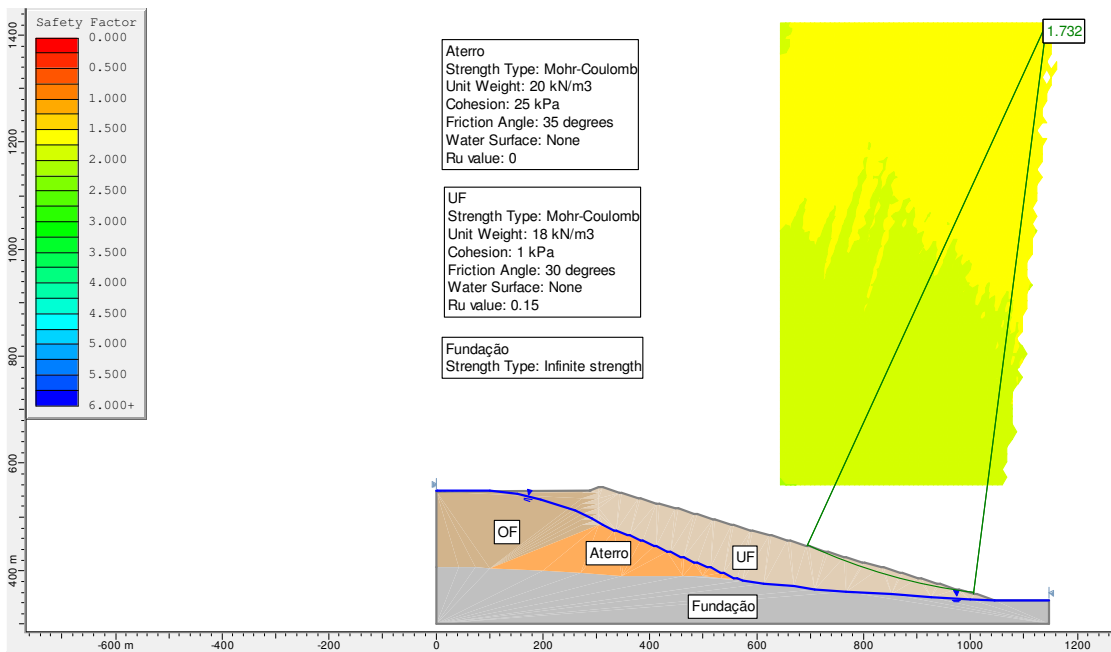
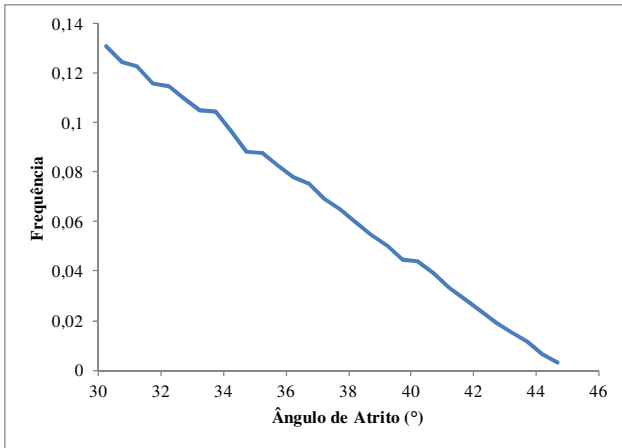


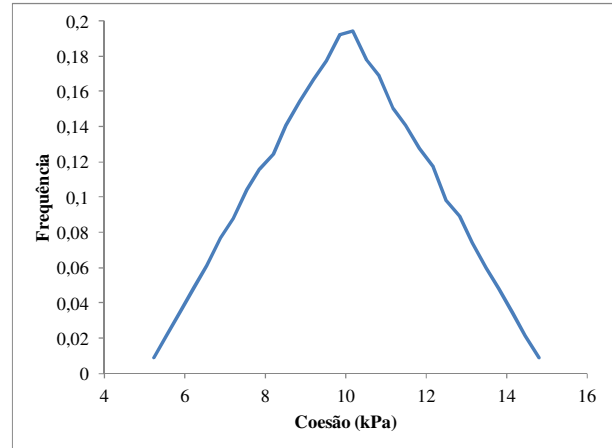
FIGURA 4.7 – Análise determinística com  $r_u$  – barragem ciclona – Fator de segurança de 1,732

TABELA 4.5 – Fatores de segurança obtidos para cada cenário nas análises determinísticas

Cenário	Condição Drenada	Condição não drenada ( $r_u = 0,15$ )
1 - Pilha de rejeito filtrado	1,843	1,533
2 - Barragem em solo compactado	1,941	1,626
3 - Barragem ciclona	2,059	1,732

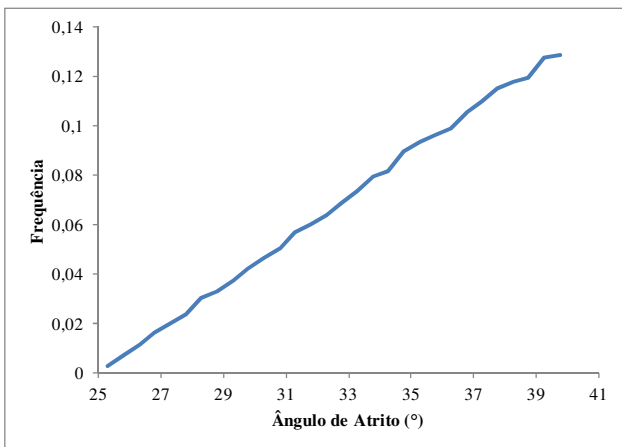


(a) variação do ângulo de atrito

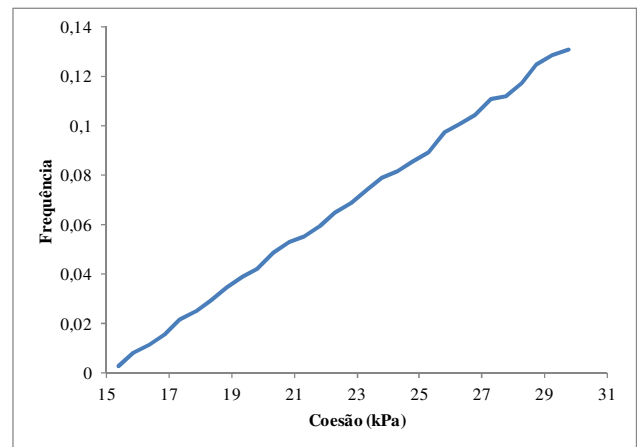


(b) variação da coesão

*Pilha de Rejeito Filtrado*

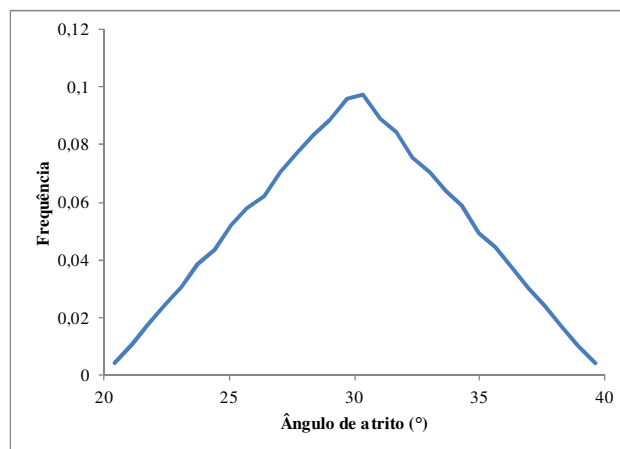


(a) variação do ângulo de atrito



(b) variação da coesão

*Barragem em Solo Compactado*



variação do ângulo de atrito

*Barragem Ciclonada*

FIGURA 4.8 – Parâmetros adotados nas análises probabilísticas

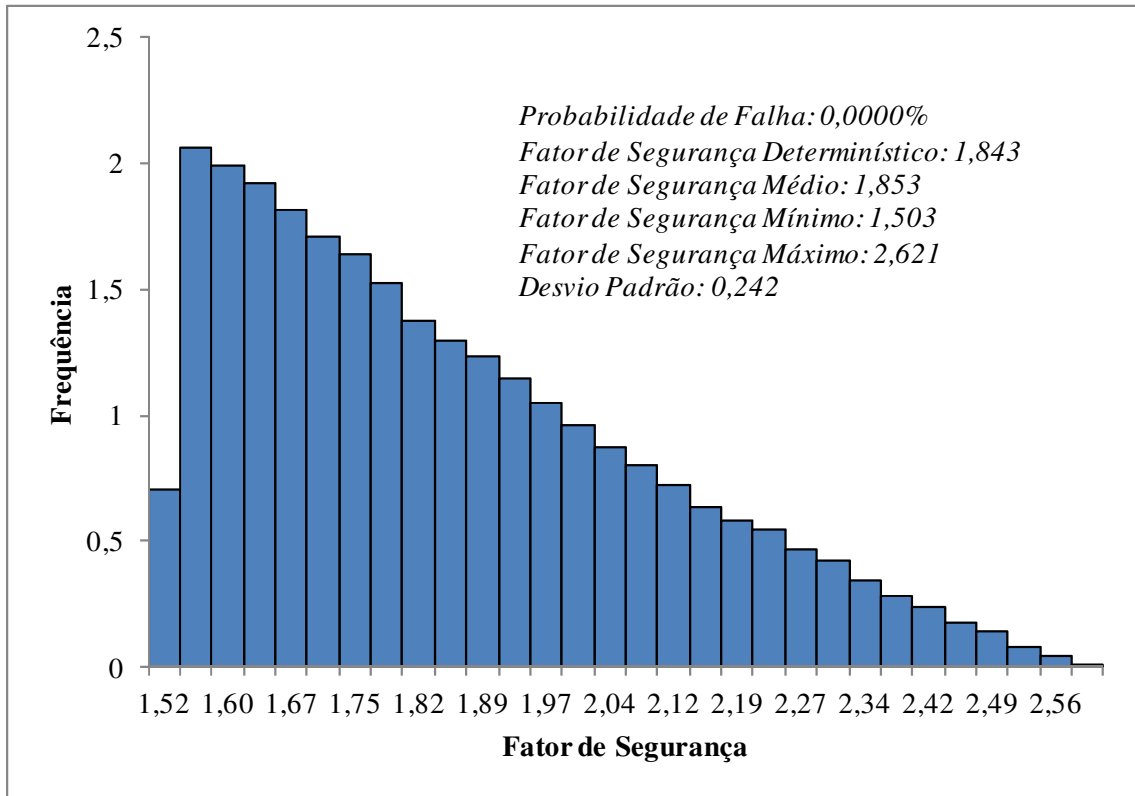


FIGURA 4.9 – Análise probabilística– pilha de rejeito filtrado

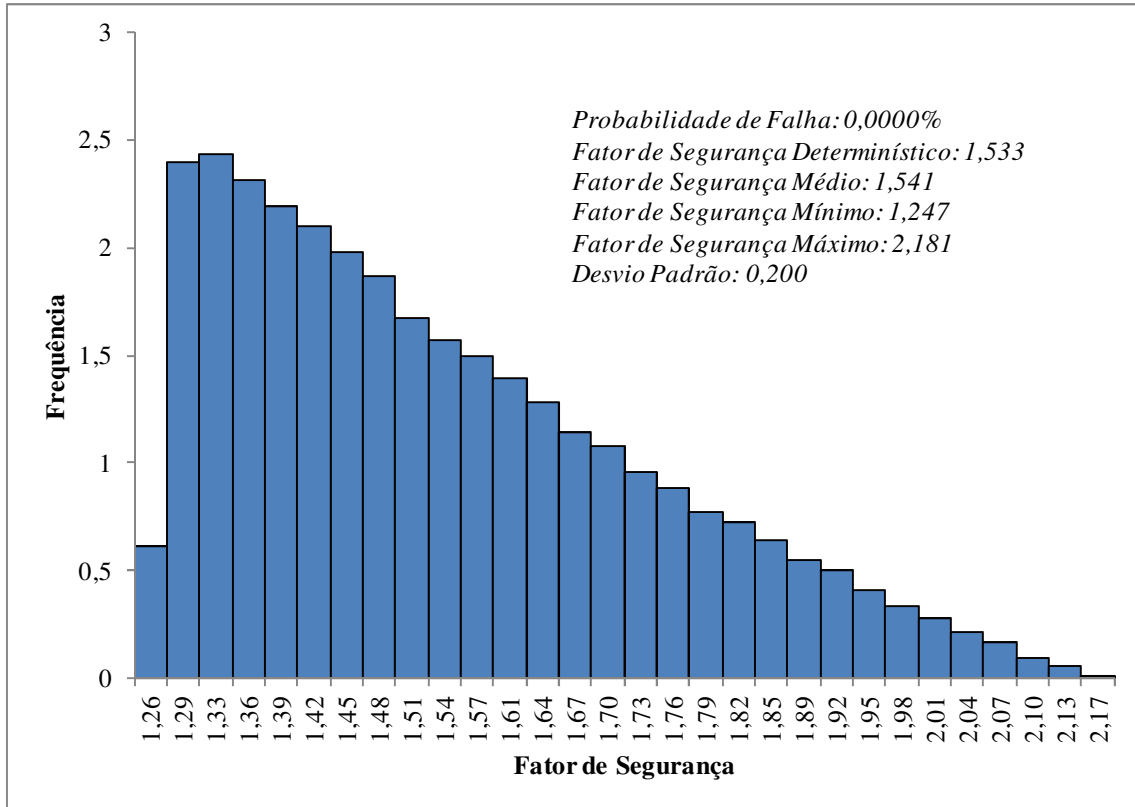


FIGURA 4.10 – Análise probabilística com  $r_u$  – pilha de rejeito filtrado

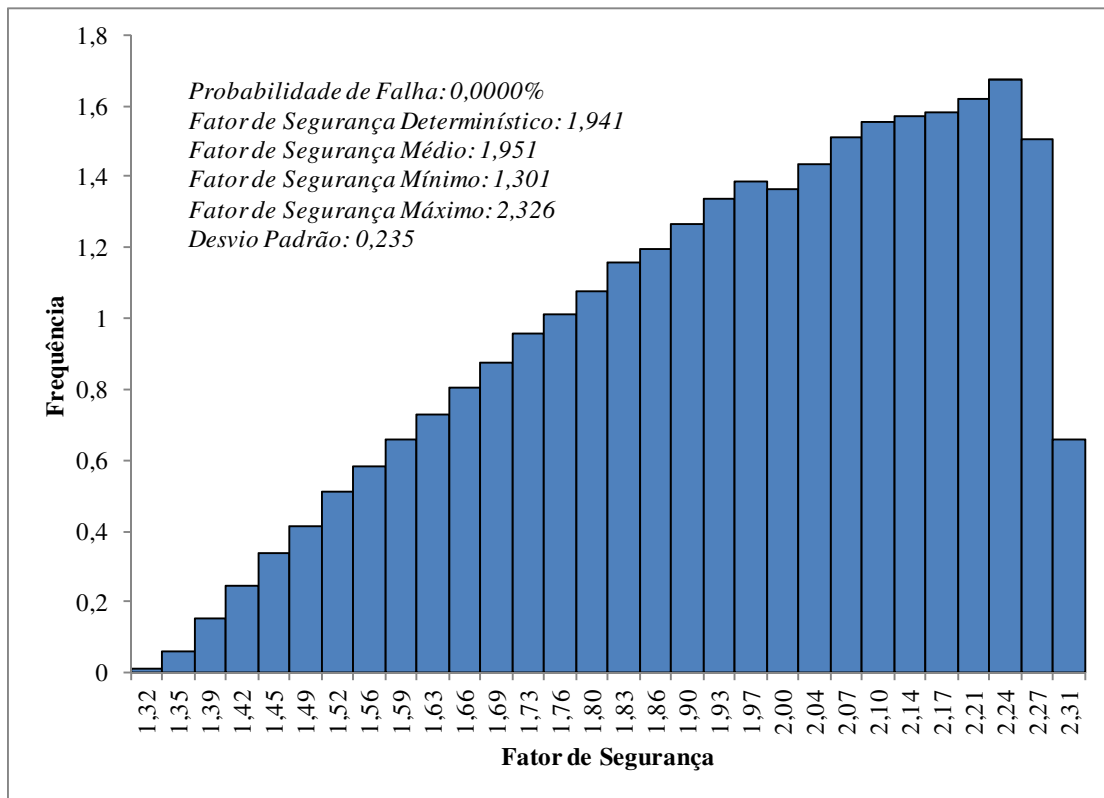


FIGURA 4.11 – Análise probabilística – barragem em solo compactado

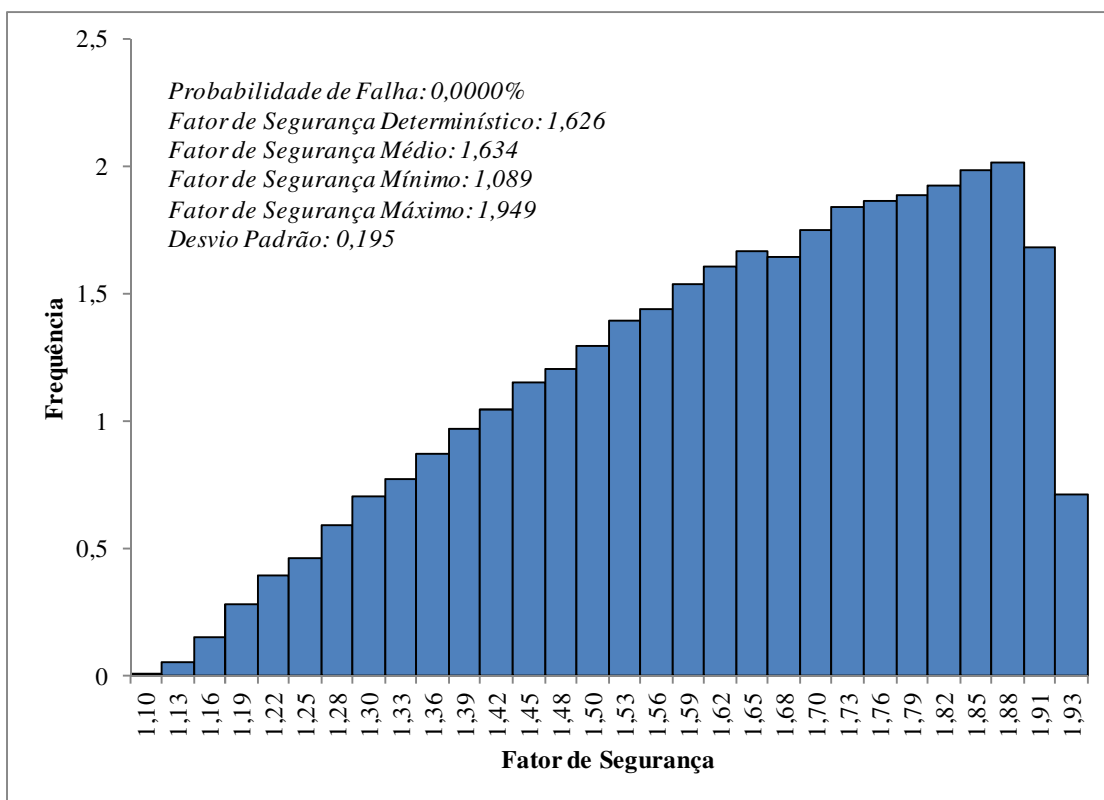


FIGURA 4.12 – Análise probabilística com  $r_u$  – barragem em solo compactado



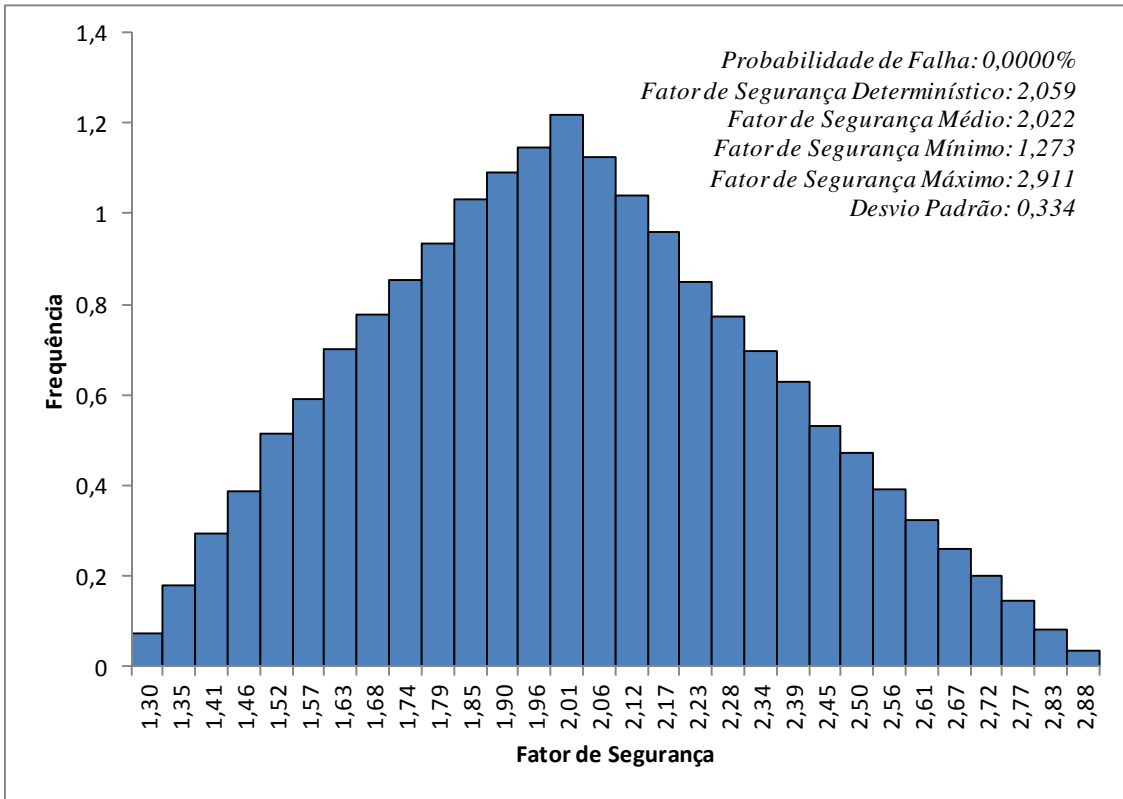


FIGURA 4.13 – Análise probabilística – barragem ciclona

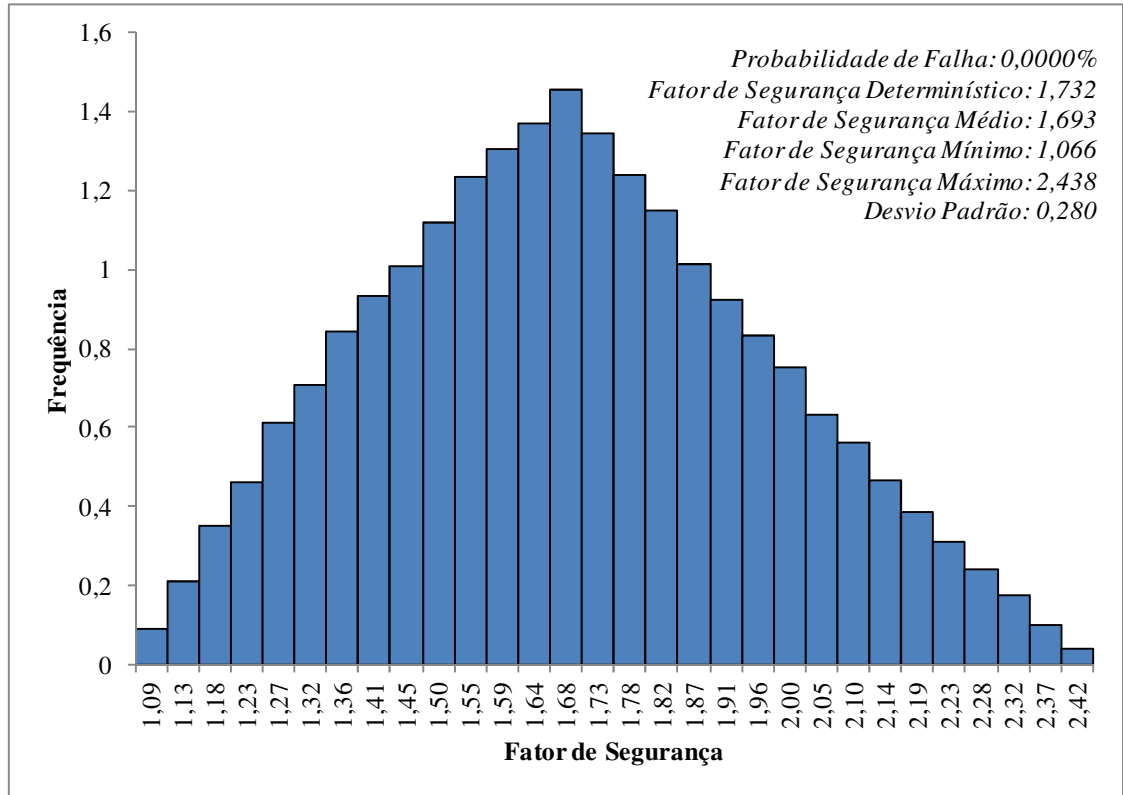


FIGURA 4.14 – Análise probabilística com  $r_u$  – barragem ciclona

As análises de estabilidade indicaram probabilidade de falha menor que 0,001% para todas as estruturas. Entretanto, analisando os fatores de segurança mínimos é possível constatar que a barragem ciclônada pode apresentar fatores de segurança abaixo de 1,5 na condição drenada e abaixo de 1,2 na condição não drenada. Da mesma forma, a barragem em solo compactado também apresentou esse comportamento, dada a variabilidade dos parâmetros de resistência assumidos nesse estudo.

Ressalta-se, com importância, que na análise determinística a barragem ciclônada apresentou maior fator de segurança se comparada às demais estruturas. A pilha de rejeito filtrado, por sua vez, apresentou fatores de segurança acima de 1,5 na condição drenada e abaixo de 1,3 na condição não drenada, sendo a estrutura que representaria menor risco geotécnico.

A FIG. 4.15 apresenta uma análise de sensibilidade para o parâmetro  $r_u$ , desenvolvida juntamente com a análise probabilística. É possível perceber que a barragem ciclônada é a estrutura que apresentou maior queda no fator de segurança em detrimento ao desenvolvimento de poropressões no maciço, devido a maior inclinação da equação de reta obtida para essa estrutura.

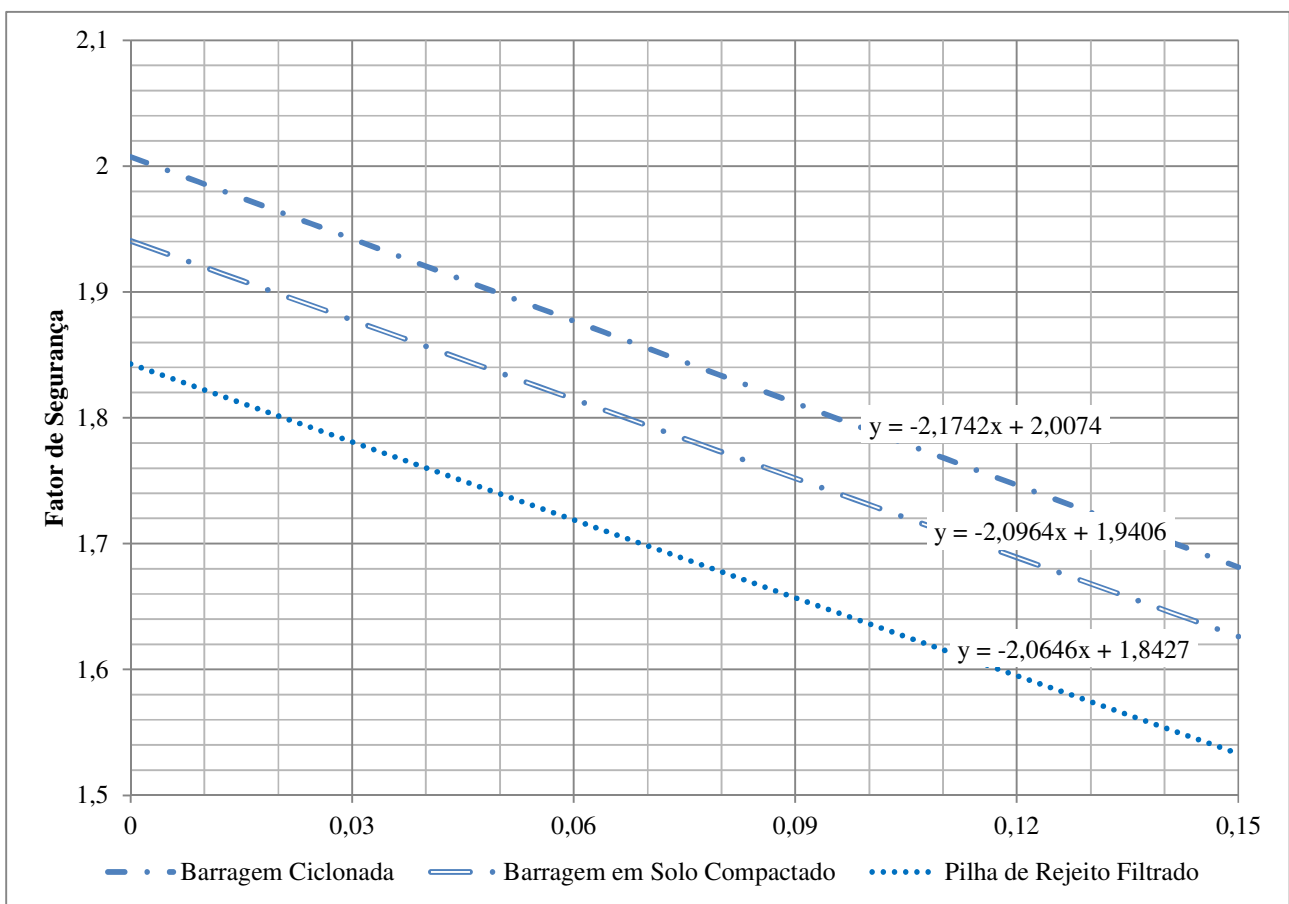


FIGURA 4.15 – Análise de sensibilidade com o parâmetro  $r_u$

### 4.3 Análise de risco

Para a aplicação do FMEA foram elaborados os sistemas para cada cenário de disposição de rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. O primeiro sistema refere-se à pilha de rejeito filtrado compactado (FIG. 4.16), o segundo refere-se à barragem em solo compactado alteada para jusante (FIG. 4.17) e o terceiro sistema, por fim, refere-se à barragem ciclonada alteada pelo método de linha de centro (FIG. 4.18).

A seguir, são apresentadas as pontuações para cada sistema de disposição de rejeitos. Os critérios são discutidos separadamente, para cada cenário, sendo os subistemas também tratados em separado. Dessa forma, facilita-se a compreensão da elaboração da matriz de risco.

#### 1 PILHA DE REJEITO FILTRADO

##### 1.1 MACIÇO PRINCIPAL

###### 1.1.1 TALUDES DE JUSANTE

###### 1.1.2 BERMAS

##### 1.2 SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA

###### 1.2.1 DRENO HORIZONTAL

###### 1.2.2 SAÍDA DO DRENO DE FUNDO

##### 1.3 SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL

##### 1.4 FUNDAÇÃO

##### 1.5 DIQUE DE CONTENÇÃO DE FINOS

FIGURA 4.16 – Sistema de disposição de rejeito filtrado disposto em pilha de rejeito filtrado

## 2 BARRAGEM EM SOLO COMPACTADO ALTEADA PARA JUSANTE

### 2.1 MACIÇO PRINCIPAL

#### 2.1.1 TALUDES DE JUSANTE

#### 2.1.2 CRISTA E BERMAS

#### 2.1.3 TALUDE DE MONTANTE

### 2.2 SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA

#### 2.2.1 FILTRO SEPTO VERTICAL/INCLINADO

#### 2.2.2 TAPETE HORIZONTAL

#### 2.2.3 SAÍDA DO DRENO DE FUNDO

### 2.3 SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL

#### 2.3.1 VERTEDOURO

### 2.4 FUNDAÇÃO

### 2.5 RESERVATÓRIO

FIGURA 4.17 – Sistema de disposição de rejeitos em forma de polpa em barragem em solo compactado alteada para jusante

### 3 BARRAGEM CICLONADA ALTEADA PELO MÉTODO DE LINHA DE CENTRO

#### 3.1 MACIÇO PRINCIPAL

##### 3.1.1 TALUDES DE JUSANTE

##### 3.1.2 BERMAS

##### 3.1.3 TALUDE DE MONTANTE

#### 3.2 SISTEMA DE DRENAGEM INTERNA

##### 3.2.1 FILTRO SEPTO VERTICAL/INCLINADO

##### 3.2.2 TAPETE HORIZONTAL

##### 3.2.3 SAÍDA DO DRENO DE FUNDO

#### 3.3 SISTEMA DE DRENAGEM SUPERFICIAL

##### 3.3.1 VERTEDOURO

#### 3.4 FUNDAÇÃO

#### 3.5 RESERVATÓRIO

##### 3.5.1 PRAIA DE REJEITOS

FIGURA 4.18 – Sistema de disposição de rejeitos em forma de polpa em barragem ciclona alçada pelo método de linha de centro

Iniciando pelo subsistema “maciço principal”, a TAB. 4.6 apresenta as principais características esperadas para cada cenário e as TABS. 4.7 a 4.9 apresentam as pontuações definidas de forma qualitativa. De uma forma geral, a pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- O término da vida útil da pilha de rejeito filtrado não apresenta impactos no empreendimento como um todo, uma vez que foi assumido a existência de controle e planejamento efetivo da mina, sendo atribuída nota 1 para a severidade. Também devido a essa premissa, a detecção e prevenção desse modo de falha é quase certa, independente do tipo de controle (nota 1).
- Para estruturas geotécnicas de grandes alturas, sabe-se que são esperadas grandes deformações, podendo ocasionar como efeito final a instabilidade global, caso a estrutura

não seja monitorada ou bem dimensionada. Uma instabilidade global pode ser catastrófica para uma estrutura geotécnica. Entretanto, para a pilha de rejeito filtrado foi atribuída nota distinta no quesito severidade se comparada com as barragens (9 e 10, respectivamente). O critério de pontuação foi devido ao alcance dos rejeitos, após ruptura, ser maior caso haja ruptura em barragens. Se a ruptura ocorre em na pilha de rejeito filtrado e compactado é esperado que o alcance do material rompido seja mais contido. Assumindo como premissa a boa qualidade do projeto e construção, a prevenção e detecção desse modo de falha é quase certa (nota 1). Para o controle de detecção, no caso dos recalques por colapso e/ou adensamento foi atribuída nota 3 (alto), assumindo-se um bom projeto de instrumentação mas a necessidade do monitoramento contínuo. No caso do controle da ineficiência da compactação, sua detecção pode ser facilmente obtida através de ensaios de campo durante a obra, sendo quase certa sua probabilidade de detecção (nota 1).

- No caso de um evento de instabilidade global foi mantido o mesmo critério em termos de severidade, conforme discutido anteriormente. Para instabilidades locais foi atribuída nota 7, em função dos possíveis impactos legais, tendo em vista que o alcance de uma ruptura local é pontual e contida. Tendo em vista a qualidade construtiva e de projeto, a prevenção e detecção desse modo de falha foi considerada quase certa (nota 1), exceto no caso do talude de jusante, onde o método de controle está atribuído ao monitoramento (nota 3).
- No que diz respeito à probabilidade de ocorrência de determinado modo de falha, mais especificamente com relação aos dados de entrada para dimensionamento do projeto, foi atribuída nota 2 (remoto), assumindo um projeto concebido com uma boa campanha de investigação geológico-geotécnica e boa qualidade de dados hidrológicos. Para aspectos relacionados à inadequação construtiva e/ou de manutenção foi atribuída nota 4 (ocasional), tendo em vista que podem ocorrer dificuldades de manutenção efetiva na prática da mineração.

TABELA 4.6 – Características adotadas para cada cenário

Cenário	Características
<p>Pilha de Rejeito Filtrado (1)</p>	<p>Maciço formado por taludes entre bermas, composto por rejeitos, compactados e revegetados. Nesse cenário espera-se obter melhores características geotécnicas, em função da redução do índice de vazios, maior homogeneidade e controle da estrutura. Para essa estrutura é esperada menor variabilidade dos parâmetros de projeto.</p>
<p>Barragem em Solo Compactado (2)</p>	<p>Maciço composto por solo compactado e revegetado. Taludes de jusante são formados entre bermas, sendo um único talude de montante. É possível obter excelentes características geotécnicas, mas a zona saturada da barragem reduz a qualidade desses parâmetros.</p>
<p>Barragem Ciclonada (3)</p>	<p>Maciço composto principalmente por rejeito granular, lançado por hidrociclones, com controle de compactação. Durante a vida útil da barragem o talude de jusante é desprovido de bermas. À montante faz-se necessária a adoção da praia de rejeitos finos, visando o controle da superfície freática.</p> <p>Em função do tipo de material que compõe essa estrutura (rejeito de minério de ferro), sabe-se que a ciclonagem dos rejeitos não é muito eficaz fazendo com que uma percentagem de rejeitos finos componha a barragem. Além disso, a praia de rejeitos também pode conter uma percentagem de rejeitos grossos (denominada zona de transição), dificultando o controle da superfície freática no interior do maciço.</p> <p>Na prática, a compactação é feita de tal forma que seja obtida uma densidade relativa que minimize os riscos com a liquefação estática. Entretanto, o complexo processo de disposição influencia na variabilidade espacial do índice de vazio obtido para o rejeito depositado, dificultando a obtenção de certas propriedades requeridas ao longo do maciço. Dessa forma é esperada maior variabilidade dos parâmetros geotécnicos.</p>

TABELA 4.7 – FMEA Maciço principal – Pilha de Rejeito Filtrado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
1.1 Maciço Principal									
Contenção de rejeitos	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	Término da vida útil	1	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto, construção e/ou operação	Prevenção	1	4
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	1	4
	Excesso de deformação	Instabilidade global	9	Colapso ou adensamento inesperados	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	54
Ineficiência da compactação	4	Ajustes construtivos	Prevenção	1	36				
		Inspeção visual e monitoramento	Deteção	1	36				
1.1.1 Taludes de jusante									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	84
	Instabilidade global	9	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	36	
					Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	108	
1.1.2 Bermas									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	1	28
	Instabilidade Global	9	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	36	
					Inspeção visual e monitoramento	Deteção	1	36	
Conferir estabilidade contra erosão	Localização de bermas ineficiente	Instabilidade a processos erosivos	4	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	16
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	1	16



TABELA 4.8 – FMEA Maciço principal – Barragem em solo compactado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
2.1 Maciço principal									
Contenção de rejeitos e água	Chuva inesperada	Galgamento	10	Dados hidrológicos inconsistentes	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	20
	Excesso de deformação	Instabilidade Global	10	Colapso ou adensamento	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
					4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	40
2.1.1 Taludes de jusante									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	120
2.1.2 Crista e bermas									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	28
		Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	40
Conferir estabilidade contra erosão	Localização de bermas ineficiente	Instabilidade a processos erosivos	4	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	16
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	16
2.1.3 Talude de montante									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	120

TABELA 4.9 – FMEA Maciço principal – Barragem ciclizada

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
3.1 Maciço principal									
Contenção de rejeitos e água	Chuva inesperada	Galgamento	10	Dados hidrológicos inconsistentes	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	20
	Excesso de deformação	Instabilidade Global	10	Colapso ou adensamento	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
					4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	40
3.1.1 Taludes de jusante									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	120
3.1.2 Crista e bermas									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	28
		Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	40
Conferir estabilidade contra erosão	Localização de bermas ineficiente	Instabilidade a processos erosivos	4	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	16
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	16
3.1.3 Talude de montante									
Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Instabilidade local	7	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	28
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	120

Para o subsistema “sistema de drenagem interna”, a TAB. 4.10 apresenta as principais características esperadas para cada cenário e as TABS. 4.11 a 4.13 apresentam as pontuações definidas de forma qualitativa. A pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- Para os eventos de instabilidade global e local foi mantido o mesmo critério para as estruturas no que diz respeito à nota atribuída ao índice de severidade.
- A nota atribuída ao índice de ocorrência foi a mesma para todas as estruturas (nota 2, remoto), seguindo os mesmos critérios adotados anteriormente e tendo em vista que a causa da falha do sistema de drenagem interna está mais relacionado ao projeto e a construção, não à manutenção. Observa-se que uma possível ocorrência de colmatção do sistema de drenagem interna se deve à alterabilidade química dos materiais de construção dos drenos.
- No que diz respeito ao tipo de controle, foi atribuída nota 1 (detecção quase certa) para os métodos preventivos, tendo em vista a qualidade prevista para elaboração do projeto e construção. Para o controle do tipo detecção, foram atribuídas duas notas: 3 e 6. A nota 3 (detecção alta) foi assinalada para modos de falha relacionadas ao aumento da poropressão, assumindo adequado projeto de instrumentação dessas estruturas. Já para o modo de falha relacionado à erosão interna, foi atribuída nota 6 (detecção baixa) devido às dificuldades de constatação de um processo de *piping*.

TABELA 4.10 – Características adotadas para cada cenário

Cenário	Características Esperadas
Pilha de Rejeito Filtrado (1)	Drenagem interna composta por drenos secundários interligados ao dreno principal, todos sobrejacentes à fundação, no contado com o maciço. Devido ao fato dessa estrutura não armazenar água, a função do dreno é principalmente a de captar contribuições da fundação e infiltração de água pela chuva e conduzi-las com segurança para fora do maciço.
Barragem em Solo Compactado (2)	Drenagem interna composta por filtro septo e dreno horizontal. A função da drenagem interna é principalmente a de captar contribuições do reservatório, da fundação e da infiltração de água pela chuva, conduzindo com segurança para fora do maciço.
Barragem Ciclonada (3)	Drenagem interna composta por filtro septo e dreno horizontal. A função da drenagem interna é principalmente a de captar contribuições do reservatório, da fundação e da infiltração de água pela chuva, conduzindo com segurança para fora do maciço.

TABELA 4.11 – FMEA Drenagem Interna – Pilha de Rejeito Filtrado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
1.2 Sistema de drenagem interna									
Drenar e filtrar as águas oriundas da fundação e da infiltração de água da chuva pelo maciço	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	42
		Instabilidade Global	9	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	54
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	6	84
		Instabilidade Global	9	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	6	108
1.2.1 Dreno horizontal									
Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras e fundação	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	42
		Instabilidade Global	9	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	54
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	6	84
		Instabilidade Global	9	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	6	108
1.2.2 Saída do dreno de fundo									
Promover a função de filtro.	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	42

TABELA 4.12 – FMEA Drenagem Interna – Barragem em solo compactado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
2.2 Sistema de drenagem interna									
Drenar e filtrar as águas oriundas da fundação e da infiltração de água da chuva pelo maciço	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	42
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
2.2.1 Filtro septo vertical/inclinado									
Interceptar, drenar e filtrar a água proveniente do reservatório no maciço.	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes construtivos	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes construtivos	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
2.2.2 Dreno horizontal									
Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro septo	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	42
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
1.2.3 Saída do dreno de fundo									
Promover a função de filtro.	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	42

TABELA 4.13 – FMEA Drenagem Interna – Barragem ciclona

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
3.2 Sistema de drenagem interna									
Drenar e filtrar as águas oriundas da fundação e da infiltração de água da chuva pelo maciço	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	42
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
3.2.1 Filtro septo vertical/inclinado									
Interceptar, drenar e filtrar a água proveniente do reservatório no maciço.	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes construtivos	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes construtivos	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
3.2.2 Dreno horizontal									
Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro septo	Aumento das poropressões no maciço	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	42
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	84
		Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	6	120
3.2.3 Saída do dreno de fundo									
Promover a função de filtro.	Ocorrência de erosão interna	Instabilidade local	7	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	14
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	42

Para o subsistema “sistema de drenagem superficial”, a TAB. 4.14 apresenta as principais características esperadas para cada cenário e as TABS. 4.15 a 4.17 apresentam as pontuações definidas de forma qualitativa, segundo os seguintes critérios:

- A incapacidade de conduzir a vazão pode ocorrer devido aos dados que alimentam os dimensionamentos hidráulicos ou obstrução da estrutura hidráulica. Dessa forma, admitiu-se índice de ocorrência igual a 2 (remoto).
- Para o método de controle preventivo foi atribuída nota 1 (detecção quase certa), tendo em vista a qualidade prevista para elaboração projeto e da execução em campo. Para o controle do tipo detecção também foi atribuída nota 1, pois entende-se que qualquer obstrução das estruturas hidráulicas são facilmente identificadas durante uma inspeção visual.

TABELA 4.14 – Características adotadas para cada cenário

Cenário	Características Esperadas
Pilha de Rejeito Filtrado (1)	Drenagem superficial composta principalmente por canaletas, descidas d’água e canais periféricos.
Barragem em Solo Compactado (2)	Drenagem superficial composta principalmente por canaletas, descidas d’água e vertedouro.
Barragem Ciclonada (3)	Drenagem superficial composta principalmente por canaletas, descidas d’água e vertedouro.

TABELA 4.15 – FMEA Drenagem Superficial – Pilha de Rejeito Filtrado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
1.3 Sistema de drenagem superficial									
Disciplinar as águas da chuva, direcionando-as para o exterior do maciço	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Surgimento de processos erosivos	4	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	8
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	8

TABELA 4.16 – FMEA Drenagem Superficial – Barragem em solo compactado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
2.3 Sistema de drenagem superficial									
Disciplinar as águas da chuva, direcionando-as para o exterior do maciço	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Surgimento de processos erosivos	4	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	8
						Inspeção visual e monitoramento	Deteccção	1	8
2.3.1 Vertedouro									
Impedir a passagem da água sobre a barragem	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Deteccção	1	20

TABELA 4.17 – FMEA Drenagem Superficial – Barragem ciclonada

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
3.3 Sistema de drenagem superficial									
Disciplinar as águas da chuva, direcionando-as para o exterior do maciço	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Surgimento de processos erosivos	4	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	8
						Inspeção visual e monitoramento	Deteccção	1	8
3.3.1 Vertedouro									
Impedir a passagem da água sobre a barragem	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	Instabilidade global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Deteccção	1	20

Para o subsistema “fundação”, por sua vez, foi admitida a mesma fundação para os três cenários. A TAB. 4.18 apresenta as principais características esperadas para cada cenário e as TABS. 4.19 a 4.21 apresentam as pontuações definidas de forma qualitativa. A pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- A ocorrência de falha da fundação é considerada remota (nota 2), sendo relacionada apenas a aspectos construtivos ou de projeto. Deve-se considerar também que estruturas desse porte não são executadas em uma única fase, sendo que a própria estrutura serve de fundação para os alteamentos seguintes. Sendo assim, é esperado que a barragem de rejeito ciclonada apresente maior risco de falha para esse subsistema, se comparada com as demais estruturas, sendo atribuída nota 3.
- Para o método de controle preventivo foi atribuída nota 1 (deteccção quase certa), tendo em vista a qualidade prevista para elaboração projeto e da execução em campo. Para o controle



do tipo detecção foi atribuída nota 3, devido à necessidade de instrumentos de monitoramento para identificação dessa falha, assumindo adequado projeto de instrumentação.

TABELA 4.18 – Características adotadas para cada cenário

Cenário	Características Esperadas
Pilha de Rejeito Filtrado (1)	Condições geológicas idênticas aos demais cenários. A fundação em um alteamento é composta por rejeito compactado, não saturado.
Barragem em Solo Compactado (2)	Condições geológicas idênticas aos demais cenários. A fundação em um alteamento é composta por solo compactado.
Barragem Ciclonada (3)	Condições geológicas idênticas aos demais cenários. A fundação em um alteamento é composta por rejeito ou rejeito compactado. Devido às dificuldades de ciclonagem do rejeito de minério de ferro, pode ocorrer no reservatório uma zona de transição, composta por rejeitos finos e grossos. O teor de finos presente no rejeito influencia na suscetibilidade à liquefação de duas maneiras distintas: contribuição para a redução da condutividade hidráulica do solo e aumento da resistência ao cisalhamento (acréscimo de coesão). Entretanto, no caso de solos formados por finos com baixa plasticidade, a influência é apenas do aumento da susceptibilidade à liquefação causada pela redução da condutividade hidráulica.

TABELA 4.19 – FMEA Fundação – Pilha de Rejeito Filtrado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
1.4 Fundação									
Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Instabilidade Global	9	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	54
Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Instabilidade Global	9	Inadequação de projetos ou construção	2	Execução de poços de alívio	Prevenção	1	18
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	54

TABELA 4.20 – FMEA Fundação – Barragem em solo compactado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
2.4 Fundação									
Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	60
Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	2	Execução de poços de alívio	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	60

TABELA 4.21 – FMEA Fundação – Barragem ciclonada

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
3.4 Fundação									
Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	3	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	30
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	90
Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Instabilidade Global	10	Inadequação de projetos ou construção	3	Execução de poços de alívio	Prevenção	1	30
						Inspeção visual e monitoramento	Deteção	3	90

O subsistema “dique de contenção de finos” foi considerado apenas para o cenário da pilha de rejeito filtrado, sendo necessário para o controle de aporte de sedimentos. A TAB. 4.22 apresenta as principais características e a TAB. 4.23 apresenta as pontuações definidas de forma qualitativa. A pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- A função do dique de contenção de finos para a pilha de rejeito filtrado é apenas o de conter sedimentos. Em caso de falha, a severidade do efeito final foi considerada como um prejuízo coletivo de grandes proporções, de difícil reparação (nota 9).
- Assumindo boa qualidade da execução da obra e do projeto, o índice de ocorrência foi admitido como remoto (nota 2). Para aspectos relacionados à inadequação construtiva e/ou de manutenção foi atribuída nota 4 (ocasional), tendo em vista as dificuldades de manutenção na prática da mineração.
- Assumindo como premissa a boa qualidade do projeto e construção, a prevenção e deteção desse modo de falha é quase certa (nota 1). Para o controle de deteção também foi atribuída nota 1 em função da facilidade da deteção da falha através de inspeção visual.

TABELA 4.22 – Características adotadas para cada cenário

Cenário	Características Esperadas
Pilha de Rejeito Filtrado (1)	Necessário para conter os sedimentos provenientes da pilha de rejeito filtrado, devido à ocorrência laminar nos rejeitos depositados na pilha, principalmente no período construtivo.
Barragem em Solo Compactado (2)	Não se aplica.
Barragem Ciclonada (3)	Não se aplica.

TABELA 4.23 – FMEA Dique de Contenção de Finos – Pilha de Rejeito Filtrado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
1.5 Dique de contenção de finos									
Acumular sedimentos	Não conter sedimentos	Impacto ambiental	9	Inadequação de projeto ou construção	2	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	18
				Não realização da dragagem	4	Inspeção visual e monitoramento	Deteção	1	36

O subsistema “reservatório” foi considerado apenas para os cenários das barragens. A TAB. 4.24 apresenta as principais características e as TABS. 4.23 e 4.24 apresentam as pontuações definidas de forma qualitativa. A pontuação qualitativa obedeceu aos seguintes critérios:

- O término da vida útil (incapacidade de conter rejeitos) não apresenta impactos no empreendimento como um todo, uma vez que foi assumido a existência de controle e planejamento efetivo da mina, sendo atribuída nota 1 para a severidade. Também devido a premissa assumida anteriormente, a detecção e prevenção desse modo de falha é quase certa, independente do tipo de controle (nota 1).
- Para os eventos de instabilidade global, foi mantido o mesmo critério para as estruturas no que diz respeito a nota atribuída ao índice de severidade. Assumindo ainda boa qualidade da execução da obra e do projeto, o índice de ocorrência foi admitido como remoto (nota 2). Para aspectos relacionados a inadequação construtiva e/ou de manutenção foi atribuída nota 4 (ocasional), tendo em vista as dificuldades de manutenção na prática da mineração.

- Assumindo como premissa a boa qualidade do projeto e construção, a prevenção e detecção desse modo de falha é quase certa (nota 1). Para o controle de detecção foi atribuída nota 3 (alto), assumindo-se um bom projeto de instrumentação.

TABELA 4.24 – Características adotadas para cada cenário

Cenário	Características Esperadas
Pilha de Rejeito Filtrado (1)	Não se aplica, uma vez que o reservatório é constituído pelo próprio maciço da pilha.
Barragem em Solo Compactado (2)	Reservatório composto por rejeito total saturado e água.
Barragem Cyclonada (3)	Reservatório composto por rejeito fino saturado e água. Nesse cenário foi assumida a manutenção de uma praia extensa de rejeito e operação alternada a fim de promover o adensamento e ressecamento dos rejeitos finos depositados, objetivando ganho de resistência.

TABELA 4.25 – FMEA Reservatório – Barragem em solo compactado

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
2.5 Reservatório									
Acumular rejeitos totais	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	Ineficiência do reservatório	1	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Adequação da geometria	Prevenção	1	4
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	4
Amortecimento de cheia	Não amortecer cheia	Instabilidade global	10	Inadequação de projeto ou construção	2	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60

TABELA 4.26 – FMEA Reservatório – Barragem ciclizada

Função	Modo de Falha	Efeito Final	S	Causa	O	Controle	Tipo de Controle	D	NPRi
3.5 Reservatório									
Acumular rejeitos finos	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	Ineficiência do reservatório	1	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Adequação da geometria	Prevenção	1	4
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	1	4
Amortecimento de cheia	Não amortecer cheia	Instabilidade global	10	Inadequação de projeto ou construção	2	Adequação da geometria	Prevenção	1	20
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	60
3.5.1 Praia de Rejeitos									
Garantir o controle do nível freático no maciço	Zona de saturação não controlada	Instabilidade Global	10	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	4	Ajustes de projeto e construção	Prevenção	1	40
						Inspeção visual e monitoramento	Detecção	3	120

Findadas as pontuações de cada sistema e seus subsistemas, cabe salientar que as análises de risco devem ser realizadas através de um grupo multidisciplinar. Nesse trabalho as análises foram realizadas através das observações levantadas na literatura técnica e diálogo entre orientador e orientando. É bem factível, entretanto, que outros engenheiros possam atribuir pontuações distintas para os sistemas avaliados, baseados inclusive em suas experiências. Contudo, nesse trabalho procurou-se padronizar o critério de pontuação da melhor forma possível para que não houvesse prejuízo na análise de determinada estrutura, se comparada às demais. A seguir encontra-se resumido o critério de pontuação para cada índice.

Foram critérios de pontuação para a severidade (S):

- Instabilidade global da pilha de rejeito filtrado: S = 9 (Filtro: Saúde e Segurança).
- Instabilidade global ou galgamento das barragens: S = 10 (Filtro: Saúde e Segurança).
- Instabilidade local: S = 7 (Filtro: Impactos legais).
- Surgimento de processos erosivos: S = 4 (Filtro: Impactos Financeiros).
- Impacto ambiental: S = 9 (Filtro: Impactos Ambientais).
- Término da vida útil: S = 1 (Não são esperados impactos) .

Foram critérios de pontuação para a ocorrência (O):

- Inadequação construtiva e/ou de manutenção: O = 4 (ocasional, cerca de 0,1% de eventos por ano).

- Inadequação de projeto e/ou construção: O = 2 (remoto, cerca de 0,01% de eventos por ano), exceto para a barragem ciclonada: O = 3 (ocasional, cerca de 0,1% de eventos por ano) devido ao rejeito depositado servir como fundação para os alteamentos.
- Eventos inesperados, que dependem das características dos materiais e dados hidrológicos: O = 2 (remoto, cerca de 0,01% de eventos por ano).

Foram critérios de pontuação para a detecção (D):

- Ajustes de projeto, construção e/ou operação: D = 1 (detecção quase certa).
- Inspeção visual e monitoramento: D = 3 (detecção alta), exceto para constatação de piping: D = 6 (detecção baixa).

O próximo passo é definir a classificação do risco. Conforme já mencionado, para que fosse possível a classificação em termos de risco foram utilizadas duas formas distintas: obtenção do NPR e obtenção da matriz de risco.

Para o método baseado no NPR, que leva em conta as categorias ocorrência, severidade e detecção, quanto maior o valor de NPR maior é o risco para determinado modo de falha. Os valores de NPR variaram nesse trabalho de 4 a 120. Para a classificação em termos de risco foi adotado o critério apresentado na TAB. 4.27.

TABELA 4.27 – Classificação do risco em termos de NPR

Risco	NPR
Aceitável	até 20
Tolerável	21 a 50
Crítico	acima de 50

Os riscos considerados críticos estão apresentados nas TABS. 4.28 a 4.30. Observa-se que o sistema barragem ciclonada apresenta o maior número de subsistemas em condição de risco crítico. A pilha de rejeito filtrado, por sua vez, apresenta um cenário mais favorável em termos de risco, se comparada aos demais sistemas. Ressalta-se que os modos de falha com severidades elevadas merecem atenção especial, mesmo se obtido NPR inferior a 50.

TABELA 4.28 – Riscos críticos – Pilha de rejeito filtrado

Subsistema	Função	Modo de falha	Causa	Efeito Final	NPR
Maciço Principal	Contenção de rejeitos	Excesso de deformação	Colapso ou adensamento inesperados	Instabilidade Global	54
Maciço Principal / taludes de jusante	Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	108
Sistema de Drenagem Interna	Drenar e filtrar as águas oriundas da fundação e da infiltração de água da chuva pelo maciço	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	54
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	108
Sistema de Drenagem Interna / dreno horizontal	Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras e fundação	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	54
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	108
Fundação	Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	54
	Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	54

TABELA 4.29 – Riscos críticos – Barragem em solo compactado

Subsistema	Função	Modo de falha	Causa	Efeito Final	NPR
Maciço Principal	Contenção de rejeitos e água	Excesso de deformação	Colapso ou adensamento inesperados	Instabilidade Global	60
Maciço Principal / taludes de jusante	Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Maciço Principal / talude de montante	Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Sistema de Drenagem Interna	Drenar e filtrar as águas oriundas da fundação e da infiltração de água da chuva pelo maciço	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Sistema de Drenagem Interna / filtro septo vertical ou inclinado	Interceptar, drenar e filtrar a água proveniente do reservatório no maciço.	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	120
Sistema de Drenagem Interna / dreno horizontal	Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro septo	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Fundação	Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
	Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
Reservatório	Amortecimento de cheia	Não amortecer cheia	Inadequação de projeto ou construção	Instabilidade Global	60



TABELA 4.30 – Riscos críticos – Barragem ciclizada

Subsistema	Função	Modo de falha	Causa	Efeito Final	NPR
Maciço Principal	Contenção de rejeitos e água	Excesso de deformação	Colapso ou adensamento inesperados	Instabilidade Global	60
Maciço Principal / taludes de jusante	Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Maciço Principal / talude de montante	Conferir estabilidade mecânica	Perda de estabilidade mecânica	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Sistema de Drenagem Interna	Drenar e filtrar as águas oriundas da fundação e da infiltração de água da chuva pelo maciço	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Sistema de Drenagem Interna / filtro septo vertical ou inclinado	Interceptar, drenar e filtrar a água proveniente do reservatório no maciço.	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	120
Sistema de Drenagem Interna / dreno horizontal	Drenar e filtrar a água proveniente das ombreiras, da fundação e do filtro septo	Aumento das poropressões no maciço	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	60
		Ocorrência de erosão interna	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Local	84
				Instabilidade Global	120
Fundação	Assegurar a estabilidade do maciço	Perda de estabilidade mecânica da fundação	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	90
	Não gerar subpressões elevadas	Gerar subpressões elevadas na fundação	Inadequação de projetos ou construção	Instabilidade Global	90
Reservatório	Amortecimento de cheia	Não amortecer cheia	Inadequação de projeto ou construção	Instabilidade Global	60
Praia de rejeitos	Garantir o controle do nível freático no maciço	Zona de saturação não controlada	Inadequação construtiva e/ou de manutenção	Instabilidade Global	120

De forma geral, cabe também a seguinte análise a seguir dos NPR's críticos obtidos, onde se constata que a barragem ciclona apresenta 9 subsistemas classificados como crítico:

- Pilha de Rejeito Filtrado – NPR variou de 54 a 108 para 5 subsistemas.
- Barragem em Solo Compactado – NPR variou de 60 a 120 para 8 subsistemas.
- Barragem Ciclona – NPR variou de 60 a 120 para 9 subsistemas.

O segundo método adotado nesse trabalho consiste na obtenção da matriz de risco, que leva em conta os índices de severidade e ocorrência. As matrizes obtidas para cada cenário estão apresentadas nas FIGS. 4.19 a 4.21 e os modos de falha nas TABS. 4.31 a 4.33. Para cada modo de falha foi selecionada a pior pontuação possível.

TABELA 4.31 – Modos de falha da pilha de rejeito filtrado

ID	Modo de Falha	S	O
A.1	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	1	4
A.2	Excesso de deformação	9	4
A.3	Perda de resistência mecânica	9	4
A.4	Localização de bermas ineficiente	4	4
A.5	Aumento das poropressões no maciço	9	2
A.6	Ocorrência de erosão interna	7	2
A.7	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	4	2
A.8	Perda de estabilidade mecânica da fundação	9	2
A.9	Gerar subpressões elevadas na fundação	9	2
A.10	Não conter sedimentos	9	4

		OCORRÊNCIA					
		IMPROVÁVEL (1)	REMOTO (2,3)	OCASIONAL (4,5)	ALTO (6,7)	ESPERADO (8,9)	PROVÁVEL (10)
S E V E R I D A D E	TRÁGICO (10)						
	CRÍTICO (9)		A.5, A.8, A.9	A.2, A.3, A.10			
	MUITO SEVERO (7,8)		A.6				
	SEVERO (5,6)						
	MÉDIO (3,4)		A.7	A.4			
	BAIXO (1,2)			A.1			

FIGURA 4.19 – Matriz de risco obtida para a pilha de rejeito filtrado

TABELA 4.32 – Modos de falha da barragem em solo compactado

ID	Modo de Falha	S	O
B.1	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	1	4
B.2	Excesso de deformação	10	4
B.3	Perda de estabilidade mecânica	10	4
B.4	Localização de bermas ineficiente	4	4
B.5	Aumento das poropressões no maciço	10	2
B.6	Ocorrência de erosão interna	7	2
B.7	Chuva inesperada	10	2
B.8	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	10	2
B.9	Perda de estabilidade mecânica da fundação	10	2
B.10	Gerar subpressões elevadas na fundação	10	2
B.11	Não amortecer cheia	10	2

		OCORRÊNCIA					
		IMPROVÁVEL (1)	REMOTO (2,3)	OCASIONAL (4,5)	ALTO (6,7)	ESPERADO (8,9)	PROVÁVEL (10)
S E V E R I D A D E	TRÁGICO (10)		B.5, B.7, B.8, B.9, B.10, B.11	B.2, B.3			
	CRÍTICO (9)						
	MUITO SEVERO (7,8)		B.6				
	SEVERO (5,6)						
	MÉDIO (3,4)			B.4			
	BAIXO (1,2)			B.1			

FIGURA 4.20 – Matriz de risco obtida para a barragem em solo compactado

TABELA 4.33 – Modos de falha da barragem ciclizada

ID	Modo de Falha	S	O
C.1	Capacidade insuficiente de conter rejeito antes do previsto	1	4
C.2	Excesso de deformação	10	4
C.3	Perda de estabilidade mecânica	10	4
C.4	Localização de bermas ineficiente	4	4
C.5	Aumento das poropressões no maciço	10	2
C.6	Ocorrência de erosão interna	7	2
C.7	Chuva inesperada	10	2
C.8	Incapacidade de vazão (subdimensionamento e/ou obstrução)	10	2
C.9	Perda de estabilidade mecânica da fundação	10	3
C.10	Gerar subpressões elevadas na fundação	10	3
C.11	Não amortecer cheia	10	2
C.12	Zona de saturação não controlada	10	4

		OCORRÊNCIA					
		IMPROVÁVEL (1)	REMOTO (2,3)	OCASIONAL (4,5)	ALTO (6,7)	ESPERADO (8,9)	PROVÁVEL (10)
S E V E R I D A D E	TRÁGICO (10)		C.5, C.7, C.8, C.9, C.10, C.11	C.2, C.3, C.12			
	CRÍTICO (9)						
	MUITO SEVERO (7,8)		C.6				
	SEVERO (5,6)						
	MÉDIO (3,4)			C.4			
	BAIXO (1,2)			C.1			

FIGURA 4.21 – Matriz de risco obtida para a barragem ciclônada

Numa análise comparativa das matrizes de risco obtidas para as estruturas, tem-se a FIG. 4.22, onde os resultados da pilha de rejeito filtrado são representados por elipses e os resultados obtidos para as barragens são representados por triângulos.

		OCORRÊNCIA					
		IMPROVÁVEL (1)	REMOTO (2,3)	OCASIONAL (4,5)	ALTO (6,7)	ESPERADO (8,9)	PROVÁVEL (10)
S E V E R I D A D E	TRÁGICO (10)		△	△			
	CRÍTICO (9)		○	○			
	MUITO SEVERO (7,8)		△				
	SEVERO (5,6)						
	MÉDIO (3,4)		○	△			
	BAIXO (1,2)			△			

**MODOS DE FALHA:**

Barragem Ciclônada:  
 -Excesso de Deformação  
 -Perda de Estabilidade Mecânica  
 -Zona de Saturação não Controlada

Barragem em Solo Compactado:  
 -Excesso de Deformação  
 -Perda de Estabilidade Mecânica

FIGURA 4.22 – Matriz de risco comparativa para as estruturas, com destaque para os modos de falha da terceira célula classificada como severidade trágica

Das matrizes de análise de risco é possível constatar que o sistema criado para a barragem ciclizada apresenta uma situação mais crítica se comparada aos outros sistemas, sendo 3 modos de falha classificados como risco alto.

A análise conjunta dos dois métodos aplicados para a obtenção do risco qualitativo das estruturas leva a conclusão de que a pilha de rejeito filtrado é o sistema que apresenta um cenário mais confortável em termos de risco. Os resultados obtidos através da matriz de risco convergiram com os resultados obtidos através da definição do NPR, pois ambos apontam o sistema barragem ciclizada como o mais crítico em termos de risco.

O Capítulo 5, a seguir, apresenta a discussão e interpretação de todos os dados aqui obtidos.

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as interpretações e discussões dos resultados obtidos no capítulo anterior, além da comparação desses com a literatura técnica.

### 5.1 Cenários de disposição dos rejeitos filtrados e em forma de polpa

No capítulo anterior foram elaborados e apresentados três cenários de disposição de rejeitos, elaborados a partir de uma base topográfica fictícia.

Analisando geometricamente os cenários de disposição de rejeitos obtidos para os três cenários constata-se que a disposição do rejeito filtrado ocupou a menor área em planta, se comparada com as áreas ocupadas para a disposição em barragens. Observa-se ainda que o ganho, em termos de área, para o cenário de rejeito ciclonado não é tão significativo, nesse caso. Comparando os cenários das barragens, a ciclonagem de rejeitos fornece um ganho efetivo de quase 20% da área total ocupada pela barragem em solo compactado. Ao se comparar o cenário obtido para a pilha de rejeito filtrado com a barragem de rejeito ciclonado tem-se ainda uma redução de 30% da área. A FIG. 5.1 apresenta o comparativo das áreas ocupadas para cada cenário.

É de se esperar, portanto, que a técnica de rejeito filtrado proporcione uma redução da área impactada com a disposição dos rejeitos. Todavia ressalta-se que, dependendo das condições topográficas, o ganho de área ao se adotar a pilha de rejeito filtrado pode ser tornar inexpressivo.

Conforme Vick (1983), a topografia é, dentre outros, um fator importante para escolha da melhor alternativa para a disposição de rejeitos. Por exemplo, no estudo hipotético apresentado nessa dissertação, a redução da área para a pilha de rejeito filtrado está diretamente relacionada ao aumento da altura da estrutura. A pilha de rejeito filtrado foi a alternativa que apresentou menor área impactada e a maior altura dentre os outros cenários. Portanto, cada projeto deve ser bem analisado, levando em conta que poderão existir áreas distintas a ocupar que gerem vantagens em termos de área ocupada para cada alternativa, assim como interferências de projeto que restrinjam o perímetro a ser ocupado pela estrutura.

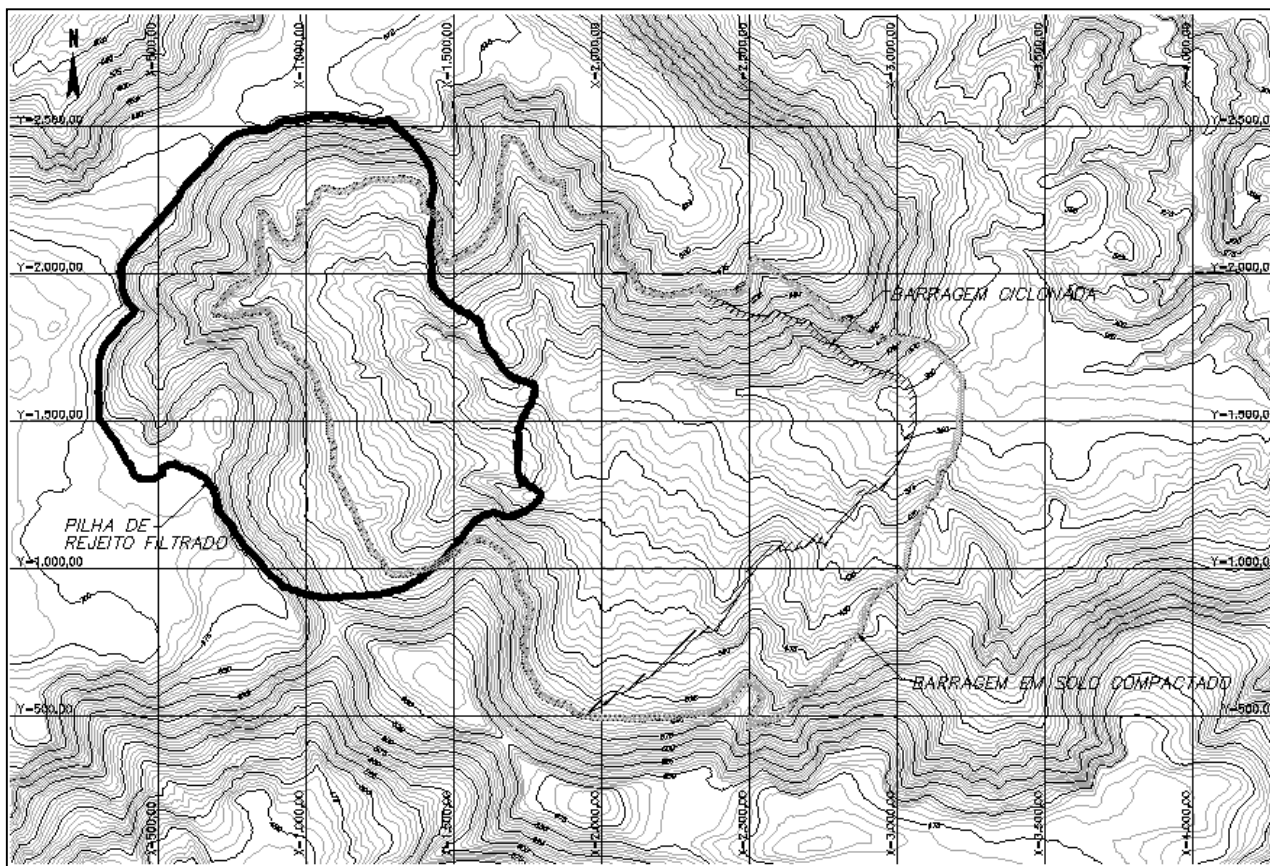


FIGURA 5.1 – Comparativo das áreas ocupadas para cada cenário

Em termos de volume é incontestável que a pilha de rejeito filtrado apresentará o menor volume final de rejeito disposto, tendo em vista a ausência de reservatório, a redução do índice de vazios através da compactação e, conseqüentemente, o aumento da densidade do rejeito compactado.

Observa-se ainda a necessidade do dique de contenção de sedimentos para a pilha de rejeito filtrado. Isso implica que, até o momento, não há como a mineração se ver livre da existência dessas estruturas (barragens), seja para contenção de sedimentos, seja para contenção de água ou rejeitos. As barragens são, portanto, estruturas necessárias à mineração e devem ser alvo de controle rigoroso, em função dos riscos inerentes. Para a planta de espessamento, por exemplo, pode haver a necessidade de uma barragem de contenção de água de recirculação para a planta de processos ou até mesmo uma barragem de água nova.

No que diz respeito a outras consistências de rejeitos espessados, como exemplo as pastas, pode-se dizer que existem ainda muitas perguntas que merecem estudos aprofundados, principalmente no que concerne à engenharia de processos no âmbito da reologia dos rejeitos e transporte.



No âmbito geotécnico, em geral os ângulos obtidos com a disposição das pastas são de, em média, de 2 a 3%. Apesar de ensaios *flume test* indicarem ângulos de até 8% ou mais, isso não é alcançado em campo. Na verdade, esses ensaios não são suficientes para representar uma disposição em escala real e os fatores para isso são: vazão, pressão e energia potencial na saída da tubulação da pasta, além das condições de contorno da calha onde esses ensaios são realizados. Os projetos das barragens de contenção das pastas, quando essas estruturas são necessárias, geralmente englobam uma faixa conservadora de ângulo que varia entre 2 a 3%, valor esse que deve ser confirmado durante a operação. Em geral, os projetos levam em consideração os resultados do *flume test* com um fator de segurança embutido, que pode variar de 3 a 5. Portanto, se o ângulo de disposição obtido no *flume test* for inferior a 6%, o ângulo de projeto da praia de rejeito deverá ser, por segurança, inferior a 2%.

Muitas vezes, dependendo das condições topográficas, o ganho de área pela escolha da alternativa de pasta é insignificante se comparada à disposição convencional de polpa. Também pode ser insignificante a redução das alturas das barragens. Por esse motivo não foi desenvolvido nesse estudo nenhum cenário para a disposição de pasta.

Os arranjos apresentados nessa dissertação buscam representar o conceito para cada cenário desenvolvido. Sabe-se que os desafios de projeto para a pilha de rejeito filtrado são grandes, em função da pouca informação atualmente disponibilizada no meio técnico para essa tecnologia.

## 5.2 Análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas

Foram conduzidas análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas, na condição drenada e não drenada, para as estruturas dimensionadas em cada cenário. Nessas análises a fundação foi considerada competente e o nível de água no interior do maciço, no caso das barragens, encontrou-se nas condições normais de operação e não influenciaram os resultados. Portanto, as análises aqui apresentadas avaliaram apenas as condições do maciço propriamente dito. Nesse caso, buscou-se padronizar a configuração geométrica através da padronização da largura das bermas, altura dos taludes e da adoção de inclinações comumente utilizadas na prática, conforme apresentado em CDBD (2012).

A barragem em solo compactado foi projetada à jusante com taludes de 10m de altura e inclinação 1:2(V:H), intercalados por bermas de 5m de largura. À montante a barragem possui um talude único

com inclinação de 1:2,5(V:H). O método de construção foi o de jusante. A barragem ciclizada, por sua vez, foi projetada à jusante com taludes de 10m de altura e inclinação 1:3(V:H), intercalados por bermas de 5m de largura. O método de construção foi o de linha de centro. A geometria da pilha de rejeito filtrado foi admitida e avaliada através das análises de estabilidade. A geometria para essa estrutura foi composta por taludes de 10m de altura e inclinação 1:2(V:H), intercalados por bermas de 5m de largura.

Para as análises determinísticas, no caso do rejeito, foram adotados parâmetros de resistência comumente assumidos em projetos. Além disso, a variabilidade desses parâmetros estão de acordo com o que se encontra reportado na literatura técnica, conforme Araujo (2006), Espósito (1995), Espósito (2000), Lopes (2000), Presotti (2002), Motta (2008), dentre outros. Para a barragem em solo compactado foram assumidos parâmetros habitualmente esperados para um bom material de empréstimo. Nesse caso, os parâmetros máximo e mínimo considerados estão na faixa reportada por CDBD (2012), para solos distintos constituintes de maciços compactados de algumas barragens de rejeito no Brasil. Menciona-se ainda que, para a atribuição desses parâmetros e sua variabilidade, foi adotada uma condição menos conservadora.

No que diz respeito aos parâmetros de caracterização e resistência de rejeitos compactados de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, não se tem muito dado disponível na literatura. Talvez o motivo esteja baseado na ausência de estruturas compactadas com controle. Os dados até então existentes têm o objetivo de avaliar a aplicabilidade desse material para a pavimentação e, geralmente, envolve a mistura com outros materiais como, por exemplo, o estéril. Entretanto, os parâmetros utilizados para a pilha de rejeito filtrado estão coerentes com os estudos disponíveis na literatura técnica.

Os resultados dos fatores de segurança determinísticos obtidos para os três cenários são aceitáveis de acordo com a NBR 13028 (ABNT, 2006). A barragem ciclizada foi a alternativa que apresentou maior fator de segurança determinístico, tanto para a condição drenada quanto para a condição não drenada.

Os resultados das análises probabilísticas indicaram probabilidade de ruptura menor que 0,001% para todas as estruturas, mesmo em condições não drenadas. Esse valor está dentro da faixa aceitável para probabilidade de ruptura de barragens, conforme Dell'Avanzi e Sayão (1998). Entretanto, a barragem ciclizada foi a estrutura que apresentou maior probabilidade de não

atendimento à NBR 13028 (ABNT, 2006), tendo em vista os fatores de segurança críticos encontrados, conforme TAB. 5.1. Não se pode dizer, entretanto, que para a condição não drenada a pilha de rejeito filtrado e a barragem em solo compactado não atendem as premissas de norma. Isso porque a norma não estabelece qual deve ser a condição de poropressão no interior do maciço, apenas que o fator de segurança deve ser maior que 1,3 na sua condição não drenada. Em outras palavras, pode-se obter uma condição de poropressão (a ser monitorada) crítica, tal que o fator de segurança atenda às especificações de norma. Contudo, é possível observar que a barragem ciclona apresentou fator de segurança mínimo abaixo do que é especificado para uma condição crítica já em sua condição drenada.

TABELA 5.1 – Fatores de segurança (FS) determinísticos e mínimos

Cenário	FS Determinístico Condição Drenada	FS Determinístico Condição não drenada ( $r_u = 0,15$ )	FS Mínimo Condição Drenada	FS Mínimo Condição não drenada ( $r_u = 0,15$ )
1 - Pilha de rejeito filtrado	1,843	1,533	1,503	1,247
2 - Barragem em solo compactado	1,941	1,626	1,301	1,089
3 - Barragem ciclona	2,059	1,732	1,273	1,066

No caso das análises probabilísticas, foram admitidas as variabilidades para os parâmetros de resistência para cada cenário de disposição e, certamente, os resultados estão condicionados a esses parâmetros. Entretanto, sabe-se que a disposição de rejeitos no método de aterro hidráulico tem sido normalmente realizada de forma aleatória e sem controle regular de operação (Santos e Ribeiro, 2007). Gomes (2009b) apresenta parâmetros de resistência de rejeito de flotação de uma única barragem ciclona, onde o ângulo de atrito efetivo do *underflow* variou de 22 a 32° aproximadamente. Victorino et al (2008) realizaram estudos para caracterizar a variabilidade *in situ* do rejeito de minério de ferro de uma barragem de rejeitos ciclona. A análise foi feita através da avaliação estatística dos dados obtidos no ensaio CPTu e ficou concluído que existe uma heterogeneidade grande para os parâmetros geotécnicos.

Analisando a variabilidade dos parâmetros considerados para os três cenários, tem-se uma condição mais favorável para a barragem em solo compactado, tendo em vista a maior probabilidade de ocorrência de parâmetros próximos aos valores máximos admitidos. Baixos valores de coesão para a barragem ciclona são preponderantes para que a mesma apresente fatores de segurança não aceitáveis. Sendo a pilha de rejeito filtrado e a barragem em solo compactado projetadas com a

mesma geometria, a queda do fator de segurança no caso da barragem em solo compactado está associada à variabilidade dos parâmetros de resistência admitida para essa estrutura.

Tendo em vista que a geometria adotada para as barragens também são comumente adotadas na prática, é possível constatar, dada a variabilidade dos parâmetros de resistência admitida nessa dissertação, que o fator de segurança mínimo pode estar bem aquém do fator de segurança determinístico. Observa-se que o fator de segurança mínimo obtido para as barragens é um contraste se comparado com o fator de segurança determinístico obtido para a mesma estrutura. Importante ainda observar que o fator de segurança, nessa presente dissertação, não foi influenciado pelas condições geotécnicas da fundação e pelas zonas de saturação presentes nos maciços das barragens. Portanto, esses resultados mostram a importância das análises probabilísticas nos projetos, de forma que se possa levar em consideração a variabilidade dos parâmetros de resistência, assim como da realização de ensaios para que se tenha representatividade estatística.

Sabe-se que é possível controlar de forma efetiva a compactação em campo, reduzindo a variabilidade dos parâmetros geotécnicos. Entretanto, as análises aqui apresentadas não levaram em consideração a saturação do maciço devido à percolação de água nas estruturas analisadas, sendo possível, portanto, uma redução ainda maior do seu fator de segurança mínimo, diante dos fatos expostos. A redução do fator de segurança é menos esperada para a pilha de rejeito filtrado, uma vez que se trata de uma estrutura não saturada. No caso das barragens é estabelecida a condição de regime permanente, sendo a poropressão resultante da percolação de água pelo maciço saturado.

A NBR 13028 (ABNT, 2006) não contempla considerações para os fatores de segurança encontrados em análises de estabilidade probabilísticas. A norma apenas referencia os fatores de segurança mínimos aceitáveis. Dentro desse contexto, havendo a ocorrência de fatores de segurança menores que os preconizados de acordo com a variabilidade aceita para os parâmetros geotécnicos, entende-se que a estrutura não atende às preconizações da referida norma. Sabe-se que fatores de segurança reduzidos implicam em maiores deformações do maciço, que pode se plastificar e ocasionar a ruptura dessas estruturas.

As análises de estabilidade probabilísticas são excelentes ferramentas para avaliar a variabilidade dos parâmetros de resistência e devem ser incorporadas aos estudos de projeto para que seja possível fornecer a probabilidade de falha da estrutura e avaliar se essa é aceitável ou não. Atualmente, no caso das barragens, quando se dimensiona um vertedouro aceita-se uma

probabilidade de falha para essa estrutura. Entretanto, a probabilidade de falha para o maciço não é comumente determinada.

### 5.3 Análise de risco

As análises de risco através do FMEA exigem grande conhecimento das condicionantes de projeto, de construção e de operação da estrutura, assim como das severidades ou consequências dos seus possíveis modos de falha. A utilização desse método deve passar por uma criteriosa avaliação multidisciplinar dos riscos, baseando-se no histórico da estrutura e todas as informações existentes. Mais importante que a classificação do risco é a gestão dos riscos considerados críticos.

Nessa dissertação, o FMEA foi aplicado tendo como base uma análise qualitativa comparativa entre as estruturas. Dessa forma, foi possível obter resultados não tendenciosos, que evidenciasse as funções críticas esperadas para cada estrutura, num contexto generalizado.

Para os cenários da pilha de rejeito filtrado e da barragem em solo compactado os modos de falha críticos se resumem aos processos de instabilidade de taludes e ao mau funcionamento da drenagem interna (por exemplo, pela colmatação do dreno). No caso da barragem ciclona, além dos processos de instabilidade de taludes e do mau funcionamento da drenagem interna, soma-se também como modo de falha crítico o controle do nível freático no reservatório, obtido através da praia de rejeitos.

É importante ressaltar que, para a barragem ciclona, foi adotado, nessa dissertação, o método construtivo que propiciasse risco baixo e menor impacto ao meio ambiente, sendo escolhido o método de linha de centro. Conforme FIG. 5.2, o método de linha de centro para as barragens ciclona apresenta menor risco de falha dentre os métodos existentes, conforme também diagnosticado por Espósito (2000). Acrescenta-se aqui que o método de jusante é o mais seguro dentre os métodos de alteamento de barragens e o contraste dessa afirmação com os dados apresentados na frase anterior é devido ao pequeno número de barragens alteadas pelo método de linha de centro àquela época, mascarando os resultados.

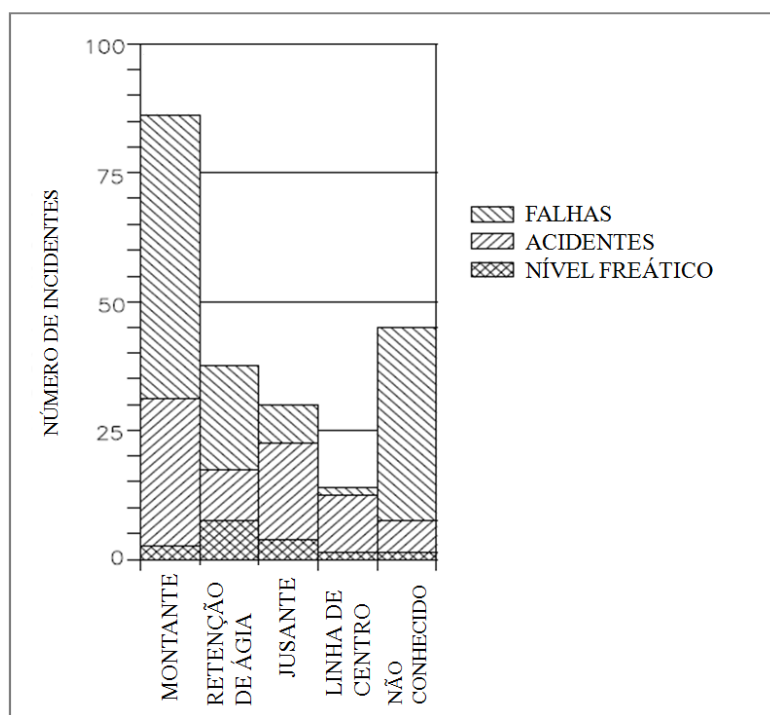


FIGURA 5.2 – Número de incidentes por método construtivo (Fonte: Icold, 2008)

Em caso de falha, ressalta-se que a severidade no caso das barragens assume maiores proporções. De acordo com Robinsky (1999), a razão pela qual a ruptura de uma barragem de rejeitos é tão desastrosa não é pela existência da barragem propriamente dita, mas sim pelo rejeito não consolidado e pelo grande volume de água dispostos no reservatório dessas estruturas. Portanto, em caso de ruptura, parte do material do reservatório se liquefaz completamente e escoam devido à abertura da brecha. Se a barragem for construída por rejeito, esse rejeito se juntará ao escoamento do material disposto no reservatório.

De uma forma geral, a análise de risco através do FMEA mostrou ser uma excelente ferramenta para identificação dos modos de falha críticos de um sistema. Pode-se incluir essa ferramenta em estudos de alternativas, a fim de auxiliar a escolha do melhor método de disposição de rejeitos.

#### 5.4 Condicionantes de projeto para uma pilha de rejeito filtrado

A geometria proposta nesse estudo para a pilha de rejeito filtrado, conforme descrita a seguir, foi suficiente para garantir boas condições de estabilidade da estrutura, tendo em vista a variabilidade admitida para os parâmetros geotécnicos. Ressalta-se, entretanto, que as características geométricas são intrínsecas a cada projeto, devendo ser dimensionada em função da variabilidade aceita para os parâmetros geotécnicos.

- Taludes globais 1:2,5 (V:H).
- Taludes locais 1:2 (V:H).
- Bermas de 5m.
- Altura entre bancos de 10m.

A concepção do arranjo para a estrutura pode ser tal que se obtenha uma zona de aterro estruturado a fim de garantir as condições mínimas de estabilidade. Em função de problemas de erosão, a face dos taludes pode ser revestida por enrocamento. Outra opção que pode minimizar a geração de sedimentos ao longo da vida útil dessa estrutura e reduzir custos de fechamento seria, na medida em que a estrutura for sendo compactada, promover a sua recuperação ambiental concomitante à operação, através de vegetação.

De acordo com Lara et al (2013), a adoção de uma estrutura de rejeito filtrado deve levar em conta os custos de operação e fechamento, além dos custos de eventuais estruturas anexas: dique de contenção de sedimentos, barragens para armazenamento de água, dentre outras. Essa instalação deve ainda ser sustentável e ambientalmente amigável, com uma operação simples e flexível, apta a aceitar mudanças na filosofia da operação da mina.

No que diz respeito aos dimensionamentos de projeto, o parâmetro de relevância oriundo da engenharia de processo, e extremamente importante para o projeto geotécnico da pilha de rejeito, é o teor de umidade com o qual o rejeito filtrado sairá da planta de filtragem. Esse parâmetro deve ser comparado com o teor de umidade ótimo do rejeito. Assumindo-se que a compactação no campo se dará no ponto ótimo da curva de compactação, se o teor de umidade do rejeito filtrado for maior que o seu teor de umidade ótimo haverá necessidade de área para correção da umidade (secagem). Do contrário, estando o rejeito filtrado com teor de umidade abaixo de seu teor de umidade ótimo, será necessário umidificar o rejeito antes de sua compactação. Esses procedimentos implicam em logísticas operacionais distintas, que devem ser levados em conta no projeto.

Os argumentos aqui expostos reforçam que a engenharia de processo deve estar bem alinhada com a engenharia geotécnica, objetivando a obtenção da melhor configuração estrutural e melhores condições operacionais. Esses aspectos, por sua vez, irão impactar diretamente na redução dos custos, pois modificam o arranjo final da estrutura.

As FIGS. 5.3 a 5.5 apresentam a variabilidade da umidade final obtida para a torta, em diferentes usinas, obtidas por Guimarães (2011).

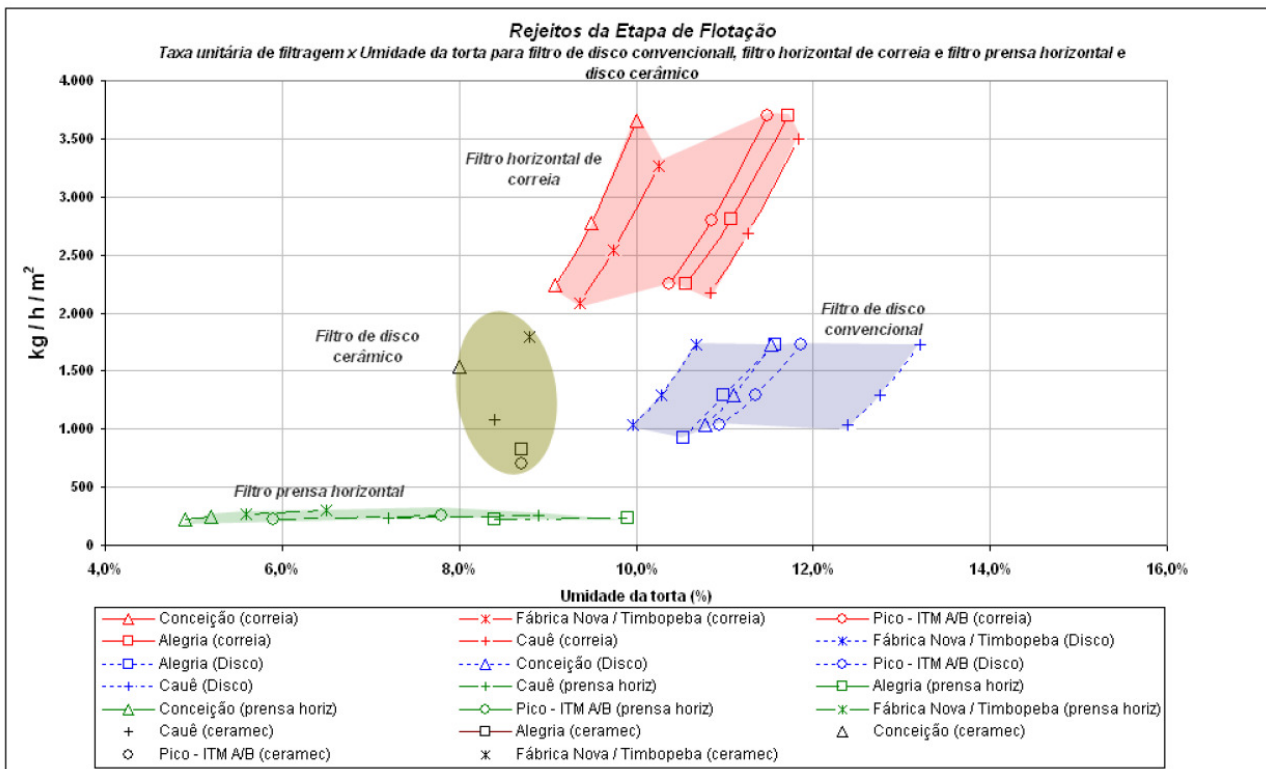


FIGURA 5.3 – Umidade de torta de rejeitos de flotação de diferentes usinas (Fonte: Guimarães, 2011)

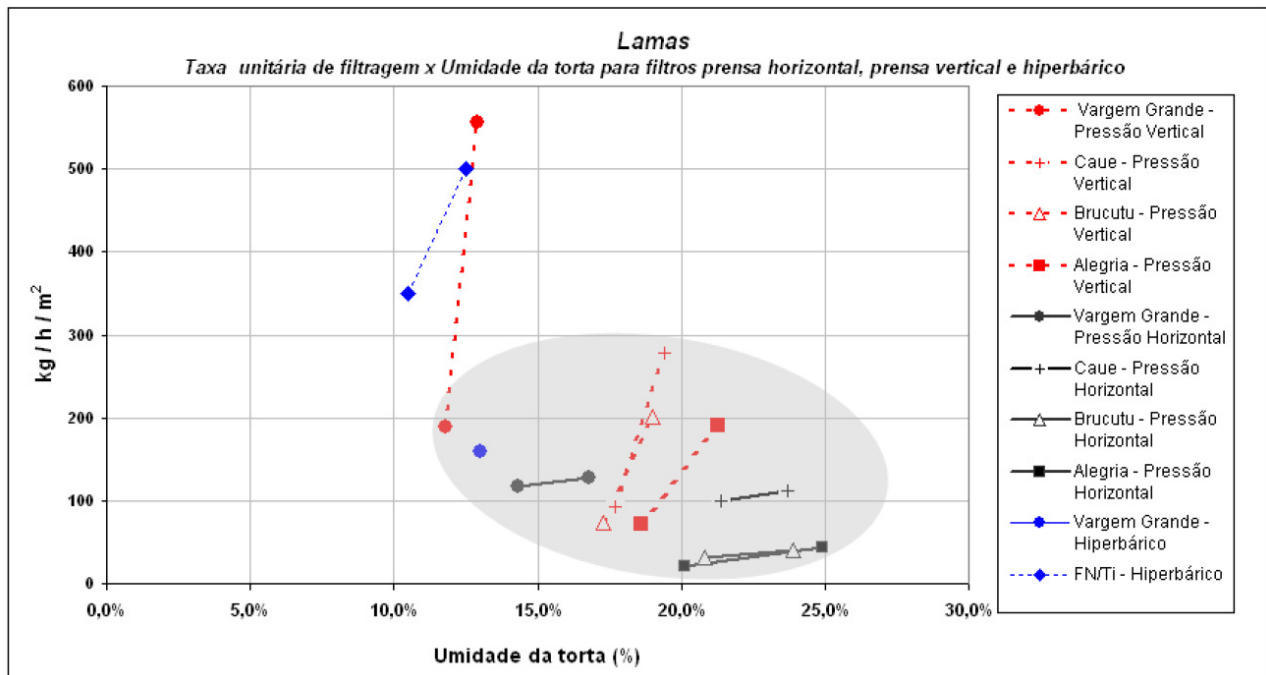


FIGURA 5.4 – Umidade de torta para lamas de diferentes usinas (Fonte: Guimarães, 2011)



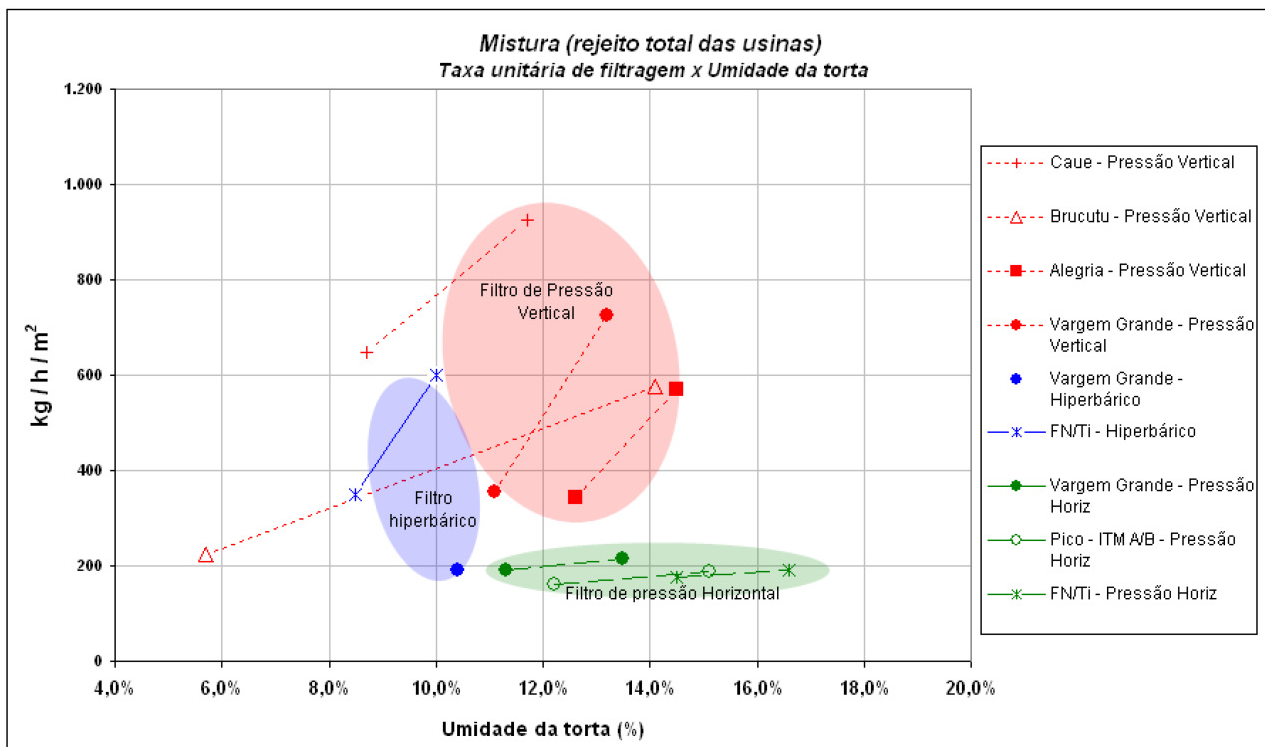


FIGURA 5.5 – Umidade de torta de rejeitos totais (mistura) de diferentes usinas (Fonte: Guimarães, 2011)

Observa-se, nas figuras apresentadas acima, que o teor de umidade considerado nessa dissertação para elaboração do cenário da pilha de rejeito filtrado encontra-se na faixa superior obtida pelo autor. Em outras palavras, teores de umidade inferiores para as tortas são passíveis de serem obtidos. Isso poderia aumentar os custos da planta de filtragem, mas reduziriam custos de operação.

De acordo com Troncoso (1997) apud Araujo (2006), os rejeitos de minério de ferro filtrados e compactados tenderão a apresentar um comportamento dilatante, o que garante melhores condições em termos de resistência devido ao embricamento dos grãos e ao comportamento dilatante desse material.

Lara et al (2013) recomendam grau de compactação entre 90 a 95%. A experiência operacional dos autores recomenda ainda grau de saturação do rejeito filtrado compactado em campo entre 70 a 80%. Entretanto, em regiões de elevadas precipitações, como é o caso da região do Quadrilátero Ferrífero, compactar os rejeitos no tramo seco da curva de compactação implicaria em uma perda substancial de resistência durante um evento de chuva. Dessa forma, deve-se procurar compactar os rejeitos filtrados próximo ao ponto ótimo de compactação.

No caso da adoção da tecnologia de rejeito filtrado, outras alternativas de disposição podem ser utilizadas nos períodos chuvosos, quais sejam: codisposição, disposição compartilhada, disposição de polpa em barragens, disposição de pasta, dentre outros. Contudo, cada projeto apresenta condições de contorno singulares e uma análise econômica deve ser realizada para nortear a tomada de decisão.

No que diz respeito ao monitoramento, podem ser citadas algumas recomendações, complementadas por Lara et al (2013):

- Controle da camada de compactação.
- Controle da densidade e umidade de compactação.
- Controle da graduação e do peso específico dos sólidos.
- Execução de sondagens percussivas com obtenção do  $N_{SPT}$  e ensaios  $CPTu$ , além de outros que se façam necessários, para obtenção indireta das propriedades de resistência, umidade e poropressão ao longo da profundidade.
- Controle do nível de água no interior do maciço e das poropressões.
- Inspeções visuais.

Para o transporte desses rejeitos esses devem ter um teor de umidade abaixo do LL, para evitar liquefação durante o transporte (Lara et al, 2013).

## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões e sugestões para pesquisas futuras, além das principais discussões das análises e aplicabilidade dos resultados. Ao final são indicadas recomendações de pesquisas futuras.

São conclusões desse trabalho:

- As geometrias comumente utilizadas para as estruturas geotécnicas de contenção de rejeitos são replicadas em projetos, tendo como base análises determinísticas com parâmetros de resistência médios. A proposição da modificação da geometria utilizando-se de taludes mais suaves é muito questionada e não é bem aceita, tendo em vista o estado da prática já consagrado no meio técnico. Entretanto, conforme visto ao longo dessa dissertação, essa situação pode apresentar uma condição de estabilidade física não aceitável (risco de falha).
- Independente da alternativa escolhida para a disposição de rejeitos, os projetos devem ponderar a variabilidade dos parâmetros de resistência através de análise probabilística. O método construtivo deve ser controlado, de tal forma que garanta a variabilidade dos parâmetros admitida no projeto.
- As análises de estabilidade determinísticas e probabilísticas atestaram a geometria proposta para a pilha de rejeito filtrado em sua condição drenada e indicaram, para os parâmetros assumidos, menores riscos associados se comparado com os cenários das barragens. A sua condição não drenada, entretanto, deve ser melhor estudada através da execução de aterros experimentais instrumentados, além de bem controlada.
- A análise de risco mostrou ser uma excelente ferramenta para identificação dos modos de falha. Por evidenciar os possíveis modos de falha e suas consequências, a análise de risco deve ser realizada sempre por um grupo multidisciplinar. Posteriormente, deve ser feita a gestão de todos os riscos, principalmente daqueles considerados críticos.
- A pilha de rejeito filtrado apresenta subsistemas que propiciam menores riscos ao meio ambiente e à sociedade. As barragens ciclonadas, dentre os cenários analisados, tendem a apresentar maior número de subsistemas críticos, que devem ser bem controlados desde a etapa de projeto até a construção e operação.
- Análises tensão deformação devem ser realizadas para estruturas com elevadas alturas, como as apresentadas nessa dissertação. As análises determinísticas e probabilísticas via

equilíbrio limite não são capazes de levar em conta potenciais superfícies de rupturas ocasionadas por zonas de plastificação no maciço.

- A melhor alternativa de processo para filtragem de rejeitos deve ser bem analisada, em função de restrições operacionais, além de outros aspectos.
- No que diz respeito à erodibilidade dos rejeitos, grande ponto de questionamento dos rejeitos filtrados, Robinsky (1999) cita que a presença da fração argila em rejeitos tenderia a aumentar a resistência à erodibilidade ao promover a cimentação entre grãos, seja a erosão laminar ou eólica. Todavia, a presença da fração fina dificulta a filtragem. Outra forma de minimizar problemas relacionados com a erosão é a revegetação da pilha concomitante à sua execução.
- A metodologia construtiva para os períodos de seca e chuva deve ser distinta e preconizada em projeto. A compactação do maciço não será eficiente no período chuvoso e os parâmetros de resistência serão reduzidos em função da obtenção de índices de vazios maiores. Aconselha-se a divisão do maciço em zonas de aterro estruturado e não estruturado, da seguinte forma: zona de aterro estruturado à jusante, compactado durante períodos de seca, garantindo um fator de segurança adequado à estrutura. A zona de aterro não estruturado, localizada à montante, é contida pelo aterro estruturado, sendo executada no período chuvoso.
- A pilha de rejeito filtrado apresenta a grande vantagem de ser possível iniciar, desde o início de sua operação, a recuperação da área impactada através da vegetação, o que minimizaria problemas relacionados à erosão laminar e eólica, conforme mencionado anteriormente. Esse aspecto agrega grande vantagem ambiental e econômica para essa tecnologia.
- Espera-se que o rejeito filtrado de minério de ferro compactado em campo apresente comportamento dilatante. Isso implica em garantia de segurança contra liquefação, de acordo com o que se encontra reportado na literatura técnica.
- A adição de polímeros em rejeitos espessados pode influenciar o comportamento geotécnico durante a disposição. Portanto, deve-se ter cuidado em comparar os resultados aqui apresentados com o real comportamento de um rejeito filtrado, haja vista o processo químico pelo qual este tipo de rejeito está suscetível quando do processo de filtragem.
- Objetivando a redução dos riscos da adoção da tecnologia de rejeitos filtrados, para a elaboração de seu projeto, assim como qualquer outro projeto geotécnico, é indispensável a execução de uma campanha de investigação geológico-geotécnica. Essa campanha deve ser consistente e representativa, de forma que seja possível obter a variabilidade dos parâmetros.

- Atenção especial deve ser dada ao dimensionamento e execução da drenagem interna de uma pilha de rejeito filtrado. Da mesma forma, além das análises de estabilidade, devem-se incluir nos estudos de projeto as análises tensão-deformação objetivando identificar potenciais zonas de plastificação.
- A obtenção de teores de umidade pós-filtragem acima do teor de umidade ótimo da curva de compactação implica em uma logística construtiva mais complexa devido à necessidade de secagem prévia dos rejeitos, o que exigiria grandes áreas impactadas.
- A engenharia de processo deve estar vinculada à engenharia geotécnica, assim como a engenharia geotécnica deve estar vinculada à engenharia de processos. Para a mineração não é conveniente aplicar uma tecnologia econômica para geração de rejeitos, sendo que sua disposição seja prejudicada em termos técnicos e econômicos.
- O dimensionamento da pilha de rejeito filtrado deve considerar as características hidráulicas, de compressibilidade e resistência dos rejeitos compactados. Além desses parâmetros, o teor de umidade possível de ser obtido após filtragem é de extrema importância.
- Para estudos econômicos, deve-se levar em conta não apenas o custo inicial de implantação. A pilha de rejeito filtrado pode se tornar uma alternativa que exija um investimento inicial elevado. Entretanto, o custo final pode ser bem menor se comparado às outras alternativas de disposição de rejeitos, em função de dois fatores de peso: recuperação de água, ausência de barragens de grandes alturas e redução do custo final de fechamento, conforme já mencionando, tendo em vista que a pilha de rejeito filtrado pode ser descomissionada ao longo de sua vida útil.
- As conclusões aqui expostas levam em conta determinados parâmetros e condições de contorno, não sendo portanto conclusões universais.

De forma a complementar os estudos apresentado nessa dissertação, relacionam-se a seguir sugestões para pesquisas futuras, objetivando melhor conhecer a técnica de rejeitos filtrados de minério de ferro:

- Estudos acerca da erodibilidade, ou resistência à erosão, para rejeitos de minério de ferro compactado.
- Estudos da variação dos parâmetros de resistência do rejeito compactado com o grau de compactação.

- Estudos da influência efetiva da adição de polímeros utilizados no processo no que diz respeito às características hidráulicas, de compressibilidade e mecânicas do rejeito compactado, além de aspectos ambientais.
- Estudos no âmbito dos solos não saturados, para melhor compreender as propriedades de resistência e percolação em um maciço de rejeito compactado não saturado.
- Execução de aterro experimental monitorado, a fim de melhor representar o comportamento de rejeitos de minério de ferro filtrado, imprescindível para o bom entendimento geotécnico dessa estrutura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abbade, P.U.B., Villar, L.F.S., e Pereira, G.A. (2010). Caracterização geotécnica e parâmetros mecânicos e hidráulicos de um rejeito de minério de ferro. UFMG Conhecimento e Cultura 2010, XIX Semana de Iniciação Científica, Anais da XIX Semana de Iniciação Científica, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

ABNT (1998). Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. NBR NM 67, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 8p.

ABNT (2004). Resíduos sólidos – Classificação. NBR 10004, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 71 p.

ABNT (2006). Mineração – Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água. NBR 13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP. 6 p.

*Access Mining Consultants* (2003). Examination of revegetation methodologies for dry stack tailings in northern environments. Mining environmental research group. Government of Yukon. 35 p.

Alves, A.R.C. (2009). Disposição compartilhada de rejeito e estéril gerados no Processo de extração de minério de ferro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 183 p.

Alves, R.C.A., Ribeiro, L.F.M., Espósito, T.J. (2010). Análise de estabilidade de sistemas de disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cavas exauridas de minas. Anais do COBRAMSEG 2010. Gramado, Brasil. 7 p.

Amarante, S.C. (2002). Filtragem de minérios de ferro – comparação entre métodos de filtragem de laboratório: testes de folha e de funil de Büchner. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. 125 p.

Araújo, C.B. (2006). Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 136 p.

Australian (2007). Tailings management. Leading practice sustainable development program for the mining industry. Australian Government, Department of Industry Tourism and Resources. 88 p.

Azam, S. e Imran, S.A. (2008). A statistical model for slurry thickening. 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics, IACMAG. Goa, India. 71-77 pp.

Azevedo, U.R. (2007). Patrimônio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. 211 p.

Baptista, M.L.P. (2008). Abordagens de risco em barragens de aterro. Tese de Doutorado. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal. 534 p.

Barreda, R.H.O. (2008). Desenvolvimento de equipamento produtor de pasta mineral. Tese de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 150 pp.

Bisco, A.P.R. (2009). A influência de algumas variáveis sobre a reologia de polpas minerais. Tese de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 87 p.

Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H. (2003). Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas & SIG. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, Brasília. 692 p.

Brasil (2010). Decreto-Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou



temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, 21 de setembro de 2010, pt1.

Caldwell, J.A. e Zyl, D.V. (2011). Thirty years of tailings history from tailings & mine waste. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC. 13 p.

CBDB (2012). Barragens de rejeito no Brasil. Comitê Brasileiro de Barragens. 308 p.

Colle, G.A. (2008). Metodologias de análise de risco para classificação de barragens segundo a segurança. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná. 104 p.

COPAM (2002). Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17 de dezembro de 2002. Dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais.

Davies, M.P. (2004). An alternative to conventional tailing management – dry stack filtered tailings. In Proceedings Tailings and Mine Waste '01, Balkema.

Davies, M.P. e Rice, S. (2001). An alternative to conventional tailing management – dry stack filtered tailings. In Proceedings of the Eighth Internacional Conference on Tailings and Mine Waste. Fort Collins, Colorado, US: Balkema. 441-422 pp.

Davies, M.P. (2011). Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. In Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, BC, Canada, disponível em <http://www.infomine.com/publications/docs/Davies2011.pdf>. Acessado em 25 de janeiro de 2012.

Dell'Avanzi, E., Sayão, A.S.F.J. (1998). Avaliação da Probabilidade de Ruptura de Taludes. XI COBRAMSEG, Brasília, Brasil, vol.2. 1289-1295 pp.

DNPM (2011). Departamento Nacional de Produção Mineral. Ministério de Minas e Energia. Ferro/Aço. 99-116 pp.

Doucet J. e Paradis, R. (2010). Thickening/mud stacking technology – an environmental approach to redidue management. Paste 2010 – R.J. Jewell and A.B. Fourie. Australian Centre of Geomechanics, Perth, Australia.

Duarte, A.P. (2008). Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, UFMG, Belo Horizonte, MG. 114 p.

Espósito, T.J. (1995). Controle geotécnico da construção da barragem de rejeito – Análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159 p.

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.

Espósito, T. e Caldeira L. (2010). Gestão da segurança de uma pilha drenada de rejeitos de minério de ferro:a aplicação das análises FMEA/FMECA. Anais do COBRAMSEG 2010. Gramado, Brasil. 8 P.

Fernandes, G. (2005). Comportamento de estruturas de pavimentos ferroviários com utilização de solos finos e/ou resíduos de mineração de ferro associados a geossintéticos. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 250 p.

Fernandes, G., Ribeiro, L.F.M., Gomes, R.C., Palmeira, E.M. e Pereira, R.A. (2004). Estudo de resíduos de minério de ferro para utilização em pavimentos. Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 10 p.

Figueiredo, M.M. (2007). Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Núcleo de Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 100 p.

Fourie, A.B. e Gawu, S.K.Y. (2010). The validity of laboratory flume data for predicting beach slopes of thickened tailings deposits. Paste 2010 – R.J. Jewell and A.B. Fourie. Australian Centre of Geomechanics, Perth, Australia.

Franco, C.S.S.P.A (2008). Segurança de barragens: aspectos regulatórios. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia Civil. Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil. 134 p.

Gomes, R. C. (2009a). 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, M.F.M. (2009b). Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil. 193 p.

Gomes, R.C., Pereira, E.L. (2002). Avaliação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração. III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, SBMR, São Paulo, SP, 91-101 pp.

Grabinsky, M.W., Theriault, J. e Welch, D. (2002). An overview of paste and thickened tailings disposal on surface. Mine Waste and the Environmental Conference, Rouyn-Noranda, Quebec. 8 p.

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

Guimarães, N.C., Valadão, G.E.S e Peres, A.E.C. (2012). Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 65(4), 543-548 pp.

Hernandes, H.M.O. (2000). Influência do conteúdo de ferro na resistência de rejeitos de minério de ferro. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. 1-11 pp.

Hernandez, H.M.O. (2002) Caracterização geomecânica de rejeitos aplicada a barragens de aterro hidráulico, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. 174 p.

Hernandez, H.M.O. (2007). Ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH) para a caracterização de rejeitos utilizados em barragens de aterro hidráulico. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 186 p.

Hernández, C.A., Pizarro, E.A., Molina, J.A., Araujo, A.C. and Valadão, G.E.S. (2009). Mineral paste comparison between copper and iron tails. Proceedings of the twelfth international seminar on paste and thickened tailings. Australian Centre for Geomechanics, Perth. Viña del Mar, Chile. 47-55 pp.

IABR (2011). Siderurgia no Brasil. Instituto Aço Brasil, disponível em: <http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/aco/siderurgia-no-brasil--desenvolvimento.asp>. Acessado em junho de 2011.

IBRAM (2011). Informações e análises da economia mineral brasileira, 6ª edição. Instituto Brasileiro de Mineração, disponível em <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00001669.pdf>. Acessado em 25 de novembro de 2012.

ICOLD (2008). Tailings dams. Risk of dangerous occurrences. Lessons learnt from practical experiences. Bulletin 121. 144 p.

Jaouhar, E.M., Aubertin, M. e James, M. (2011). Effect of mine waste rock inclusions on the consolidation of tailings. Pan American CGS Geotechnical Conference. 8 p.

Jewell, R.J. (2010). Ensuring the credibility of thickening technology. Paste 2010 – R.J. Jewell and A.B. Fourie. Australian Centre of Geomechanics, Perth, Australia.

Kealy, C. e Busch, R. (1971). Determining seepage characteristics of mill-tailings dams by the finite-element method. U.S. Bureau of Mines, R1 7477.

Lamoso, L.P. (2001). A exploração de minério de ferro no Brasil e no Mato Grosso do Sul. São Paulo, 2001. Tese Doutorado em Geografia. Faculdade de Filosofia, Ciência e Letras, Universidade de São Paulo. 309 p.

Lara, J.L. e León, E. (2011). Design and operational experience of the Cerro Lindo filtered tailings deposit. Paste 2011. Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia. 25-38 pp.

Lara, J.L., Pornillos, E.U. e Muñoz, H.E. (2013). Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application for dry stacking tailings deposits – state-of-the-art. Paste 2013 – R.J. Jewell, A.B. Fourie, Caldwell, J. e Pimenta, J. Belo Horizonte, Brasil.

Laudriault, D. (2002). The surface disposal of industrial waste: slurry placement v/s high density slurry placement v/s placement as a paste. In: High Density & Paste Seminar. Santiago, Chile. Apresentações Digitais.

Lima, L.M.K. (2006). Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo. Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 125 p.

Lopes, M.C.O. (2000). Disposição hidráulica de rejeitos arenosos e influência nos parâmetros e resistência. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 157 p.

Lozano, F.A.E. (2006). Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações. São Paulo, SP. 128 p.

Lupo, F. e Hall, P.E. (2010). Dry stack tailings design considerations. Disponível em [www.infomine.com/publications/docs/Lupo2010.pdf](http://www.infomine.com/publications/docs/Lupo2010.pdf). Acessado em 6 de março de 2012.

Machado, W.G.F. (2007). Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 155 p.

Mafra, J.M.Q., Moreira, D.O., Villefort, L.F.C.B. e Saliba, A.P.M. (2011). Controle de enchimento de reservatórios de rejeitos. Anais VII Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental e VI Simpósio Brasileiro de Geossintéticos, REGEO/Geossintéticos, Belo Horizonte, MG, Brasil. 6 p.

Mapa, P.S. (2006). Rota de processo para o underflow da deslamagem de minério de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A.. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG. 172 p.

Meggyes, T. e Debreczeni, Á. (2006). Paste technology for tailings management. Land Contamination & Reclamation, vol.4, n°.4, CEPP Publications Ltd. 815-827 pp.

Mendes, M.B. (2008). Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante. Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 189 p.

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.

Motta, H.P.G. (2008). Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga geotécnica. Dissertação de Mestrado. COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 132 p.

Oliveira, J.B.V.R. (2010). Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 149 p.

Osorio, C.A.H. (2005). Caracterização de pastas minerais. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 177p.

Osorio, C.A.H., Araújo, A.C. e Valadão, G.E.S. (2008). Estudo de características de algumas pastas minerais. *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, São Paulo, SP, v.4, n.3. 50-55 pp.

Perini, D.S. (2009). Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 128p.

Petronilho, M.R. (2010). Avaliação do comportamento geotécnico de pilhas de estéril por meio de análise de risco. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 137 p.

Presotti, E.S. (2002). Influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. Dissertação de Mestrado em Geotecnia. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 153 p.

Pimenta, J. (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.

Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A.R., Díez-Herrero, A. e Pereira, H.G. (2008). Reported tailings dam failures. A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*. ScienceDirect. Elsevier. 846-852 pp.

Robertson, A.M. (1986). Mine waste disposal: An update on geotechnical and geohydrological aspects. *Geotechnical and Geohydrological Aspects of Waste Management: Proceedings of the Eighth Symposium*, Fort Collins, Co. Colorado State University, February 5-7, 1986. 31-50 pp.

Robinsky E.I. (1999). *Thickened Tailings Disposal in the Mining Industry*. Quebecor Printpak, Ontario, Canada. 209 p.

Robinsky, E. (2002). Site Planning for Thickened Tailings Disposal (TTD). In: *High Density & Paste 2002 Seminar*, Apr-2002, Santiago, Chile, Apresentações digitais.

Russo, F.M. (2007). Comportamento de barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico: caracterização laboratorial e simulação numérica do processo construtivo. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 295p.

Santos, A.G. (2004). Influência do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 191 p.

Santos, A.G. e Ribeiro, L.F.M. (2007). Condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro. Rem: Rev. Esc. Minas, vol.60, n.3. 465-470 pp.

Silva, D.L., Villar, L.F.S., Pereira, G.A. e Campos, T.P.A. (2010). Caracterização geotécnica e parâmetros mecânicos e hidráulicos de um rejeito de minério de ferro. Anais do XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, Brasil. 1-8 pp.

Silva, W.P. (2010). Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 120p.

Slottee, J.S. e Johnson, J. (2009). Paste thickener design and operation selected to achieve downstream requirements. Proceedings of the twelfth international seminar on paste and thickened tailings. Australian Centre for Geomechanics , Perth. Viña del Mar, Chile. 69-75pp.

Slottee, J.S., Johnson, J. e Crozier, M. (2005). Paste thickening iron ore tailings. XXXV Ironmaking and Raw Materials Seminar, VI Brazilian Symposium on Iron Ore, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil. 8 p.

Slottee, J.S., Johnson, J. e Crozier, M. (2008). Paste thickening iron ore tailings update. 2th Internacional Symposium on Iron Ore, São Luis, Brasil. 10 p.

Tailings.info (2009). Acidentes e Falhas ocorridos com rejeitos. Disponível em [www.tailings.info/accidents.htm](http://www.tailings.info/accidents.htm). Acessado em 10 de janeiro de 2009.



Takehara, L. (2004). Caracterização geometalúrgica dos principais minérios de ferro brasileiros – fração Sinter Feed. Tese de Doutorado. Instituto de Geociência, Programa de Pós-Graduação em Geociência, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. 403 p.

Therriault, J.A., Frostiak, J. e Welch, D. (2003). Surface disposal of paste tailings at the Bulyanhulu gold mine, Tanzania. Proceedings (CD-ROM) of Sudbury Mining and Environment Conference, Eds.G. Spiers, P. Beckett, H. Conroy, Prof. 149.

Troncoso, J.H., (1997). Geotechnics of Tailings dams and sediments. International Congress of Environmental Geotechnics, ICEG. 1405-1423 pp.

Ulrich, B. e Coffin, J. (2013). Considerations for tailings facility design and operation using filtered tailings. Paste 2013 – R.J. Jewell, A.B. Fourie, Caldwell, J. e Pimenta, J. Belo Horizonte, Brasil.

Vanden Berghe, J.F., Ballard, J.C., Wintgens, J.F. e List, B. (2011). Geotechnical risks related to tailings dam operations. Proceedins Tailings and Mine Waste 2011, Vancouver, BC. 11 p.

Victorino, M.M., Dyminski, A.S., Kormann, A., Neto, L.N. (2008). Estudo da Variabilidade Estatística de Parâmetros de Resistência de Rejeito de Minério de Ferro Usando Dados de Ensaio CPTu. Anais do COBRAMSEG 2008. Buzios, Rio de Janeiro. 1381-1387pp.

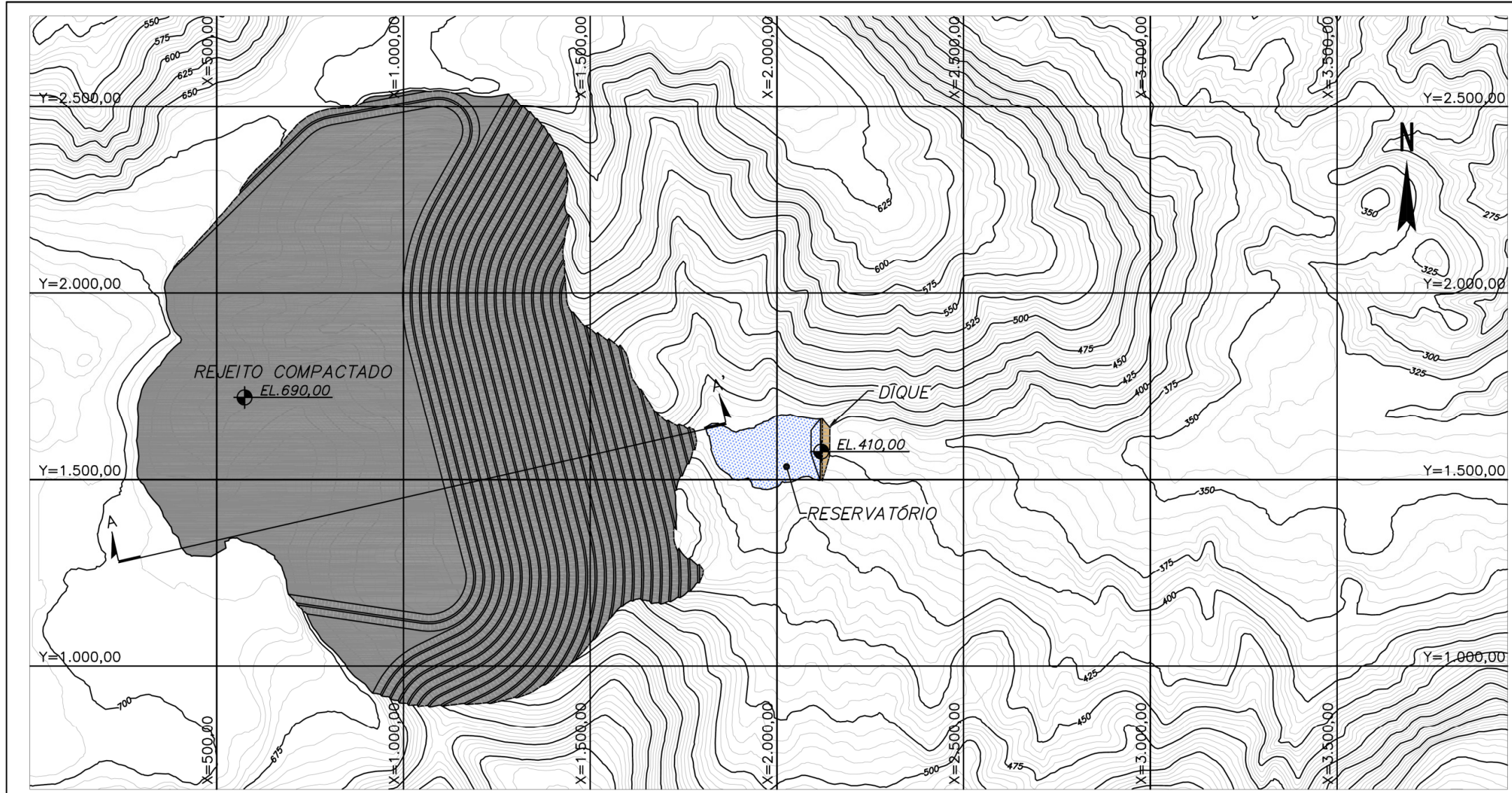
Vick, S.G. (1983). Planning, design, and analysis of tailing dams. John Wiley & Sons, New York, USA. 369 p.

Welch, D.E. (2000) Tailings basin water management, Chapter 43, Slope stability in surface mining, W.A. Hustrulid, M.K. McCarter and D.J.A. Van Zyl (Eds.) Society of Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton, CO. 391-398 pp.

Wolff (2009), A.P. (2009). Caracterização de rejeitos de minério de ferro de mina da Vale. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Mineral. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG. 90 p.

# APÊNDICE

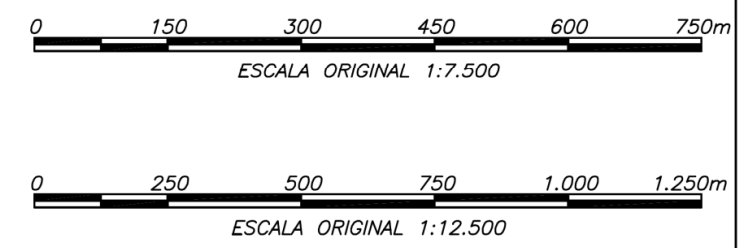
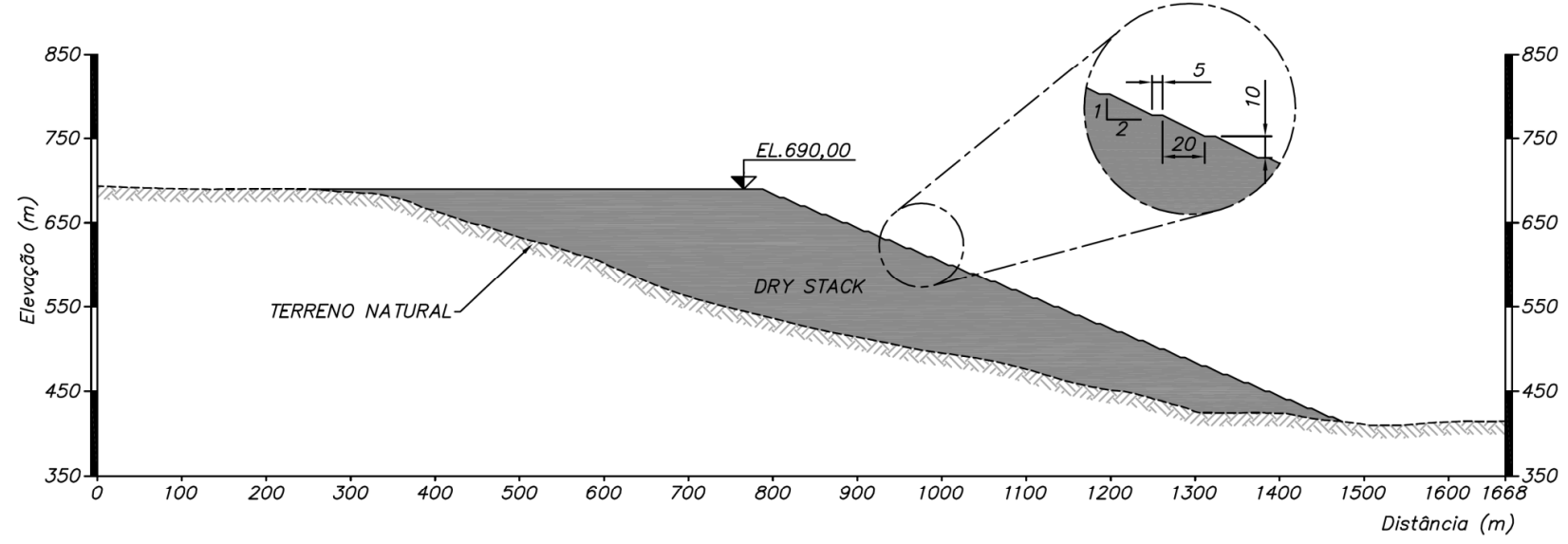
## **A.1 Arranjo geométrico conceitual obtido para a pilha de rejeito filtrado**



**LEGENDA**

-  CURVAS DE NIVEL
-  MACIÇO (REJEITO COMPACTADO)
-  DIQUE
-  RESERVATÓRIO

**PLANTA – CENÁRIO 1 – PILHA DE REJEITO FILTRADO**  
Esc. 1:12.500



**SEÇÃO A-A' – CENÁRIO 1 – PILHA DE REJEITO FILTRADO**  
Esc. 1:7.500

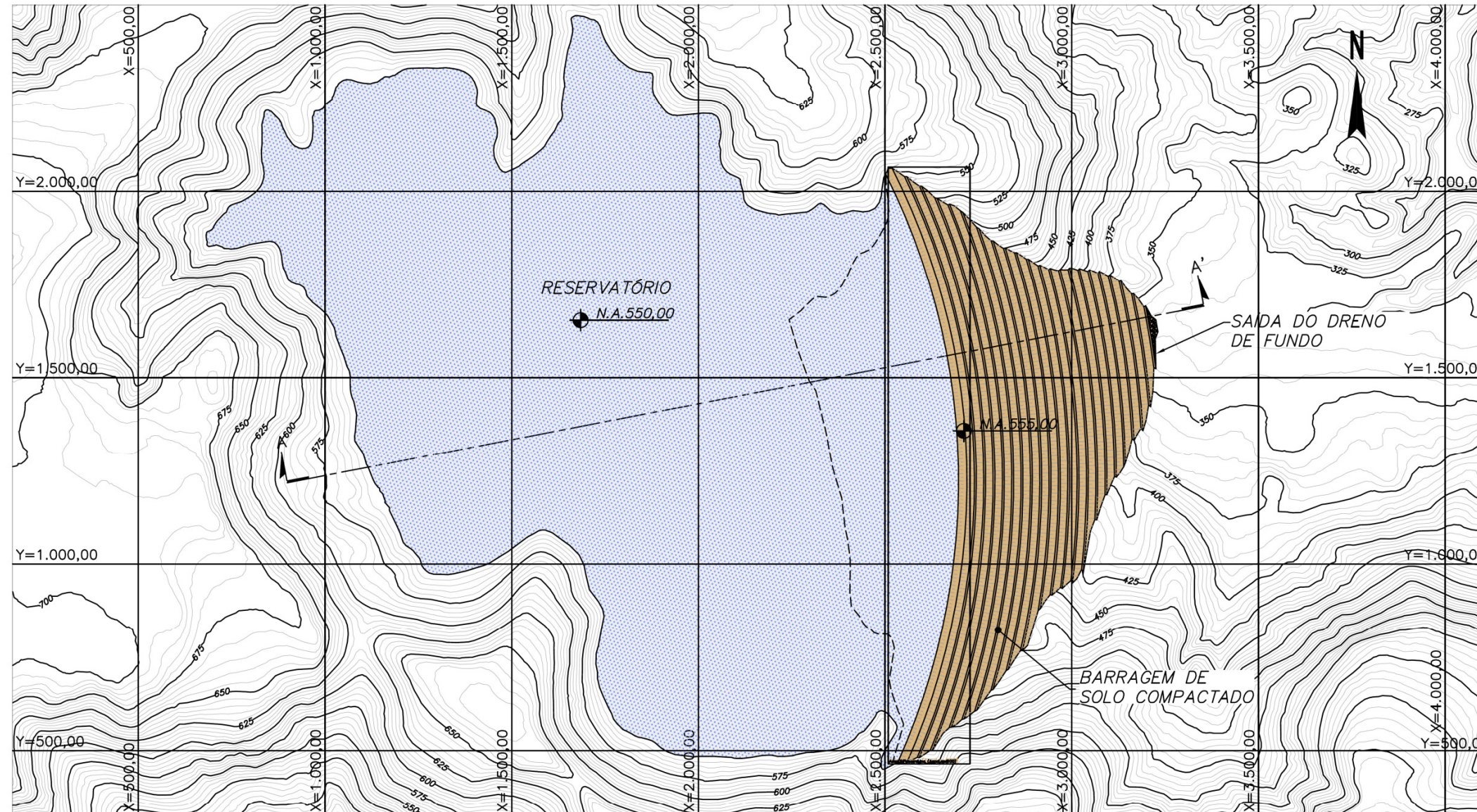
INSTRUÇÕES P/ PLOTAGEM	
COR	ESPESSURA
COR N. B	0,05
WHITE	0,1
YELLOW	0,1
GREEN	0,2
CYAN	0,3
BLUE	0,4
RED	0,6
MAGENTA	0,8

Universidade Federal de Minas Gerais  
Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Cenário 1 - Pilha de Rejeito Filtrado  
Arranjo Geral - Planta e Seção

## **A.2 Arranjo geométrico conceitual obtido para a barragem em solo compactado alteada para jusante**

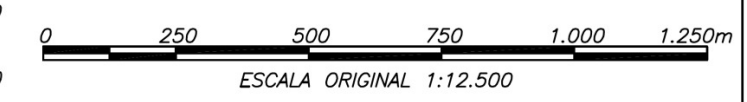
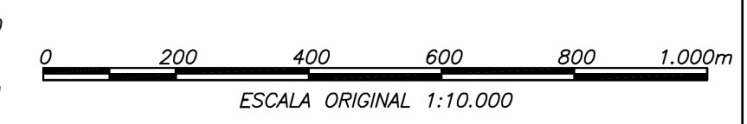
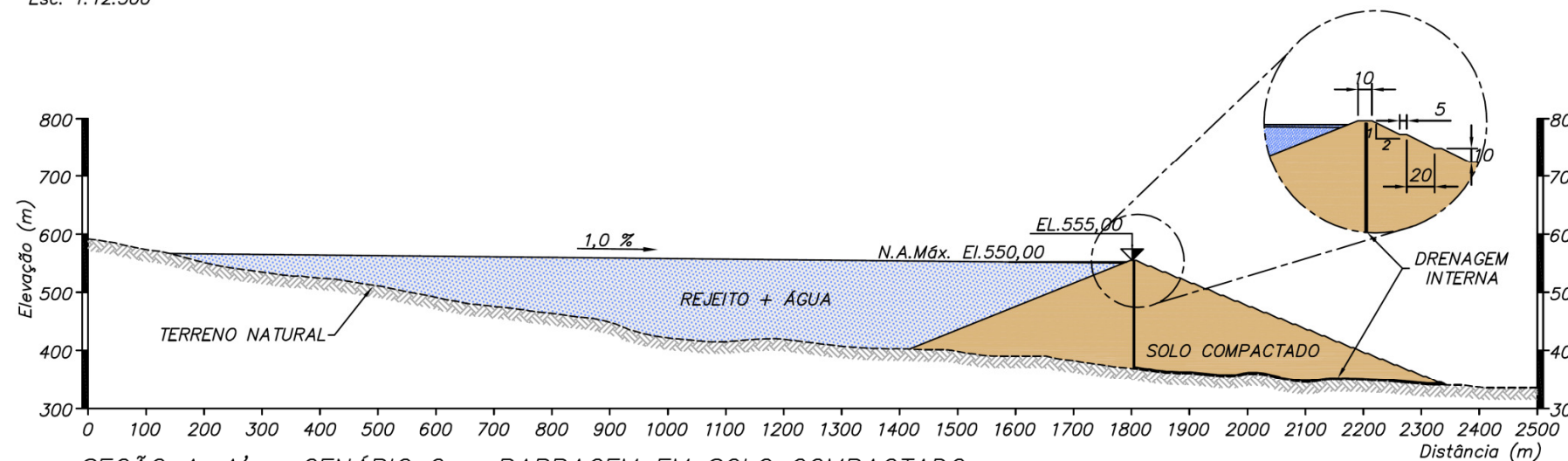




**LEGENDA**

- CURVAS DE NÍVEL
- MACIÇO (SOLO COMPACTADO)
- RESERVATÓRIO (REJEITO + ÁGUA)
- DRENAGEM INTERNA
- ENROCAMENTO (SAIDA DO DRENO DE PÉ)

**PLANTA – CENÁRIO 2 – BARRAGEM EM SOLO COMPACTADO**  
Esc. 1:12.500



INSTRUÇÕES P/ PLOTAGEM	
COR	ESPESSURA
COR N. 8	0,05
WHITE	0,1
YELLOW	0,1
GREEN	0,2
CYAN	0,3
BLUE	0,4
RED	0,6
MAGENTA	0,8

**SEÇÃO A-A' – CENÁRIO 2 – BARRAGEM EM SOLO COMPACTADO**  
Esc. 1:10.000

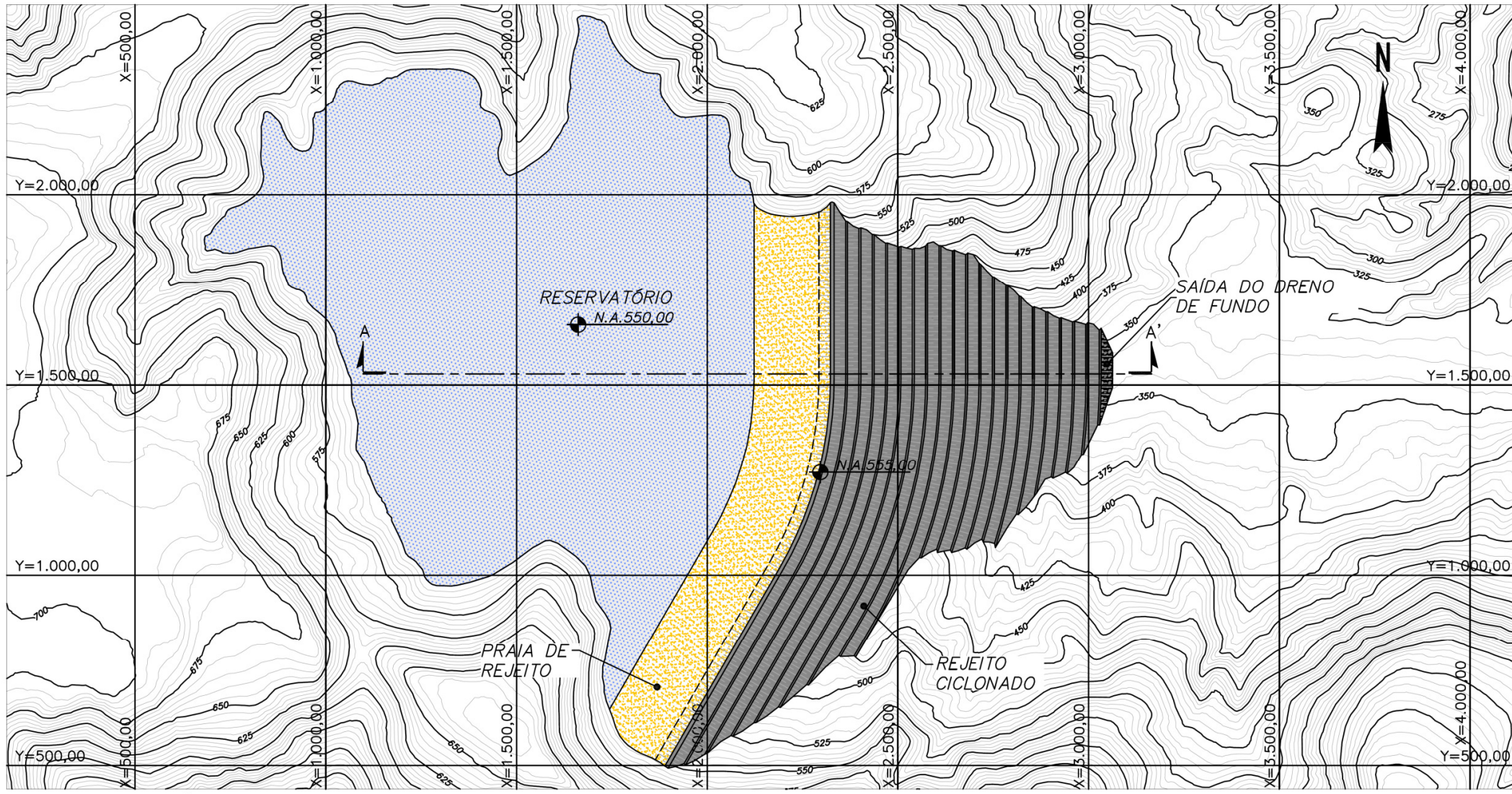
Universidade Federal de Minas Gerais  
Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Cenário 2 - Barragem em Solo Compactado  
Arranjo Geral - Planta e Seção



### **A.3 Arranjo geométrico conceitual obtido para a barragem ciclizada alteada pelo método de linha de centro**

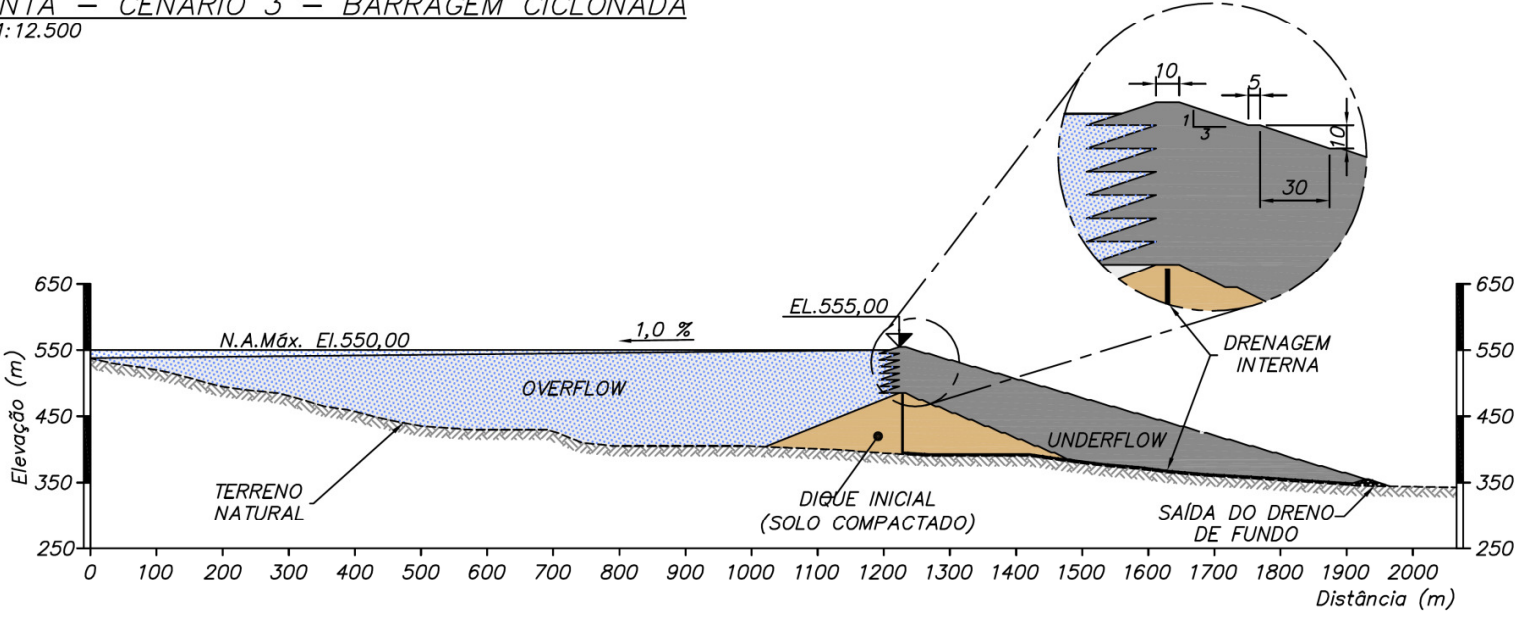




**LEGENDA**

- CURVAS DE NÍVEL
- MACIÇO (UNDERFLOW)
- RESERVATÓRIO (OVERFLOW + ÁGUA)
- PRAIA DE REJEITO
- DRENAGEM INTERNA
- ENROCAMENTO (SAIDA DO DRENO DE PÉ)

**PLANTA – CENÁRIO 3 – BARRAGEM CICLONADA**  
Esc. 1:12.500



INSTRUÇÕES P/ PLOTAGEM	
COR	ESPESSURA
WHITE	0,1
YELLOW	0,1
GREEN	0,2
CYAN	0,3
BLUE	0,4
RED	0,6
MAGENTA	0,8

**SEÇÃO A-A' – CENÁRIO 3 – BARRAGEM CICLONADA**  
Esc. 1:10.000

Universidade Federal de Minas Gerais  
Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes  
Cenário 3 - Barragem Ciclonada  
Arranjo Geral - Planta e Seção