

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

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PILHAS DE  
REJEITO FILTRADO E CO-DISPOSIÇÃO DURANTE A  
CONSTRUÇÃO**

**WEBER ANSELMO DOS RAMOS SOUZA**

**ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA**

**BRASÍLIA-DF**

**AGOSTO/2020**

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

**ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PILHAS DE  
REJEITO FILTRADO E CO-DISPOSIÇÃO DURANTE A  
CONSTRUÇÃO**

**WEBER ANSELMO DOS RAMOS SOUZA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE.

**APROVADA POR:**

---

**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)  
(ORIENTADOR)**

---

**RAFAEL CERQUEIRA SILVA, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**TEREZINHA DE JESUS ESPÓSITO BARBOSA, DSc (UFMG)  
(EXAMINADORA EXTERNA)**

BRASÍLIA/DF, 03 DE AGOSTO DE 2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

SOUZA, WEBER ANSELMO DOS RAMOS SOUZA

Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-Disposição durante a Construção/ Weber Anselmo dos Ramos Souza; orientador: André Pacheco de Assis. -- Brasília, 2020.

xix 71 p., 210x297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2020)

Dissertação (Mestrado - Mestrado em Geotecnia) --Universidade de Brasília, 2020.

- |                  |                        |
|------------------|------------------------|
| 1. Mineração     | 2. Rejeito filtrado    |
| 3. Co-disposição | 4. Modelagem numérica. |
| I. ENC/FT/UnB    | II. Título (Série)     |

## REFERÊNCIA

SOUZA, W. A. R. (2020). Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-Disposição durante a Construção. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-345/2020, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Weber Anselmo dos Ramos Souza

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Análise Numérica do Comportamento de Pilhas de Rejeito Filtrado e Co-Disposição durante a Construção

GRAU / ANO: Mestre / 2020

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

---

Weber Anselmo dos Ramos Souza  
Brasília/DF – Brasil

E-mail: weberars@hotmail.com

## DEDICATÓRIA

À minha família.

“I may not have gone where I intended to go, but I think I have ended up where I needed to be.”  
*Douglas Adams*

## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação foi fruto de muito trabalho, perseverança e foco para ser finalizada e espero que nesse espaço, eu mostre o quando que cada um foi importante nessa trajetória de dois anos durante o mestrado. Esse título não é somente meu, são de todos vocês!

Agradeço a Deus pela oportunidade de cursar um dos melhores mestrado do Brasil e por ter me dado a possibilidade de aprender geotecnia com excelência.

Agradeço a minha família, principalmente minha mãe e meu pai que me incentivaram a estudar e possibilitaram isso me dando assistência e apoio quando sempre precisei.

Agradeço aos professores de geotecnia em que se dedicam seu tempo para ensinar, sendo está uma das profissões mais enriquecedoras e difíceis que se possa imaginar. Obrigado por todo o conhecimento que vocês me deram. Agradeço também ao apoio financeiro do CNPq.

Agradeço ao professor Dr. André Assis, por me guiar durante esse último ano de trabalho e ter paciência e disponibilidade quando mais precisei. Obrigado por todos os ensinamentos e ser referência de um profissional.

Obrigado Marcio Avelino pela amizade os tempos de graduação e pós-graduação. Com certeza não irei esquecer todos as vezes que me ajudou durante esse mestrado.

Obrigado André Dantas pela amizade e por me incentivar a fazer o mestrado da UnB. Seu incentivo me proporcionou a realização deste sonho.

Obrigado a Dhara Vieira e Mel pela amizade e as cantorias no karaokê durante todo o tempo em Brasília.

Obrigado Clara Toffoli, Laura Honório e Horácio Muniz pela amizade durante essa pós-graduação. Sempre lembrarei das conversas sobre a vida durante os trabalhos nos fins de semana.

Obrigado aos demais amigos da Pós-Graduação que me fizeram mais feliz durante esses dois anos: Jullyanne, Karla, Danilo, Joacas, Samuel, Ana, Thiago Brienne, Nicholas, Nara, Danielli.

# ANÁLISE NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DE PILHAS DE REJEITO FILTRADO E CO-DISPOSIÇÃO DURANTE A CONSTRUÇÃO

## RESUMO

Os recentes acidentes de Mariana e Brumadinho desencadearam uma série de consequências severas para as empresas mineradoras, como, por exemplo, o descomissionamento e a proibição de construções de barragens a montante. Isso impulsionou a busca por novas soluções para disposição de rejeitos. Várias alternativas apareceram, sendo duas as mais promissoras: rejeito filtrado e co-disposição. Nesta dissertação é estudado o comportamento de pilhas de rejeito filtrado e da co-disposição mediante alteamentos sucessivos até o fim da vida útil. Para isso, primeiro se calibrou os materiais em dois modelos constitutivos: Cam-Clay modificado e linear elástico. Em seguida, se realizou análises de sensibilidade para avaliar o efeito da mudança de sucção e da altura de alteamento em um modelo 1D. As análises de estabilidade foram realizadas simulando em uma pilha de 300 m com uma taxa de disposição dos materiais de 25.000 m<sup>3</sup>/dia. Com o intuito de abranger o comportamento não drenado e drenado, foram realizadas as duas análises. Tempos de dissipação, possibilidade de inserção de drenos e mudança na sucção foram realizadas para avaliar esses efeitos nas pilhas. Por fim foi avaliada a mudança na taxa de alteamento devido a mudanças na geometria. Os resultados evidenciam que o modelo Cam-Clay modificado conseguiu simular os ensaios reais com certa acurácia, contudo, sendo melhor aplicado para o rejeito filtrado. O modelo elástico não teve ajuste significativo. Em relação as simulações numéricas do alteamento das pilhas, as análises drenadas mostraram valores de taxa de alteamento entre 10-18 cm/dia para o rejeito filtrado e 155 cm/dia para a co-disposição. O tempo com maior relação entre Fator de Segurança por dia para dissipação das poropressões para o rejeito filtrado foi maior em relação a co-disposição. Drenos mais superficiais foram mais efetivos para o rejeito filtrado, enquanto drenos mais profundos foram melhores para co-disposição. A mudança de sucção é mais influente no rejeito filtrado do que na co-disposição. As análises não drenadas indicaram taxas de alteamento entre 5-17 cm/dia para pilhas de rejeitos filtrados e 80 cm/dia para co-disposição. A adequação da geometria com a taxa de alteamento possibilitou mostrar a diferença entre área necessária para o rejeito filtrado e co-disposição.

# NUMERICAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF FILTERED TAILING AND CO-DISPOSAL STOCKPILES DURING CONSTRUCTION

## ABSTRACT

The recent disasters by Mariana and Brumadinho have triggered a series of harsh results for mining companies, for example, the decommissioning and the prohibition of construction of upstream dams. This encouraged the search for new solutions for tailing disposal. Several alternatives appeared, two of which are the most promising: filtered tailing and co-disposal. In this master's thesis, the behaviour of filtered tailings and co-disposal stockpiles were studied through successive increases until the end of their useful life. The first step is the fit those materials in two constitutive models: Modified Cam-Clay and elastic linear. Then, sensitivity analyzes were performed to evaluate the effect of the change in suction and the rate of rise in a 1D model. The stability analyzes were performed by simulating in a 300 m pile with a material disposal rate of 25,000 m<sup>3</sup> / day. In order to cover the undrained and drained behaviour, both analyzes were performed. Dissipation time, the possibility of insertion of drainage and change in suction were performed to assess these effects on the piles. Lastly, the change in the elevation rate due to changes in geometry was evaluated. The results show that the modified Cam-Clay model was able to simulate the actual tests with precise accuracy; however, it is better applied to the filtered tailing. The elastic model had no notable fit. Concerning the numerical simulations of the heightening of the piles, the drained analyzes showed values of heightening rate between 10-18 cm/day for the filtered tailing and 155 cm/day for the co-disposal. The time with the highest relationship between Safety Factor per day to dissipate pore pressures for filtered tailing was longer comparing to co-disposal. Shallower drainages were more effective for filtered tailing, while deeper drainages were better for co-disposal. The suction change is more substantial in the filtered tailing than in the co-disposal. The undrained analyzes indicated rate of rise between 5-17 cm / day for filtered tailing stockpiles and 80 cm / day for co-disposal. The adequacy of the geometry with the rate of rise made it possible to show the difference between the area required for filtered tailing and co-disposal.

# SUMÁRIO

1 -	INTRODUÇÃO .....	1
1.1 -	Motivação da pesquisa.....	2
1.2 -	Objetivos.....	2
1.3 -	Estrutura da dissertação .....	3
2 -	COMPORTAMENTO DO REJEITO FILTRADO E CO-DISPOSIÇÃO .....	4
2.1 -	Estéril .....	4
2.2 -	Rejeito.....	6
2.2.1-	Rejeito convencional.....	7
2.2.2-	Rejeito filtrado.....	7
2.3 -	Co-disposição.....	10
2.3.1-	Estéril e rejeito adicionados no mesmo local .....	11
2.3.2-	Rejeito adicionado em pilha de estéril e Estéril adicionado em área de rejeito. 12	
2.3.3-	Rejeito em células de estéril e rejeito em camadas .....	13
2.3.4-	Co-disposição por bombeamento .....	13
2.3.5-	Mistura homogênea entre estéril e rejeito .....	14
2.3.6-	Propriedades mecânica, hidráulicas e comportamento não saturado .....	15
2.4 -	Projetos de co-disposição encontrados na literatura .....	20
2.4.1-	Projeto NICO.....	20
2.4.2-	Projeto Penãsquito.....	21
2.5 -	Comportamento da pilha.....	22
2.5.1-	Taxa de alteamento.....	23
2.5.2-	Altura do alteamento .....	23
2.5.3-	Infiltração .....	24
2.5.4-	Geometria .....	24

2.5.5-	Diferenças entre rejeito filtrado e co-disposição.....	26
2.6 -	Simulação numérica.....	26
2.6.1-	Análise acoplada em solos não saturados .....	26
2.6.2-	Modelos constitutivos .....	28
2.6.3-	Método do equilíbrio limite.....	29
2.6.4-	Tipos de ruptura .....	32
2.6.5-	Exemplos numéricos encontrados na literatura técnica .....	33
3 -	METODOLOGIA .....	35
3.1 -	Material.....	35
3.2 -	Calibração dos modelos .....	37
3.3 -	Simulação numérica.....	38
3.3.1-	Modelo geométrico .....	38
3.3.2-	Condições de contorno, carregamentos e geração de malha.....	39
3.3.3-	Análise de sensibilidade .....	40
3.3.4-	Análises de estabilidade .....	41
3.3.5-	Alteração na geometria.....	42
4 -	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
4.1 -	Calibração dos modelos .....	43
4.1.1-	Modelo Cam-Clay Modificado (CCM).....	43
4.1.2-	Linear elástico .....	45
4.2 -	Análises de sensibilidade .....	46
4.2.1-	Sucção .....	47
4.2.2-	Altura de alteamento .....	48
4.3 -	Análises drenadas.....	49
4.3.1-	Tempo de dissipação .....	54
4.3.2-	Drenos .....	56
4.3.3-	Mudança na sucção .....	58

4.4 -	Análises não drenadas.....	59
4.4.1-	Mudança de sucção .....	61
4.5 -	Alterações na geometria.....	61
5 -	CONCLUSÕES.....	63
5.1 -	Sugestões para pesquisa futuras.....	65
	REFERÊNCIAS .....	66

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Interações possíveis com o meio em uma pilha. ....	4
Figura 2.2 – Relação entre ângulo de atrito e tensão normal aplicada (Modificado Leps, 1970).....	5
Figura 2.3 - Relação entre o pico do ângulo de atrito e diâmetro máximo da partícula. (Marachi et al., 1972 apud. Fox & Carraro, 2010).....	6
Figura 2.4 - Etapas dos processos necessárias em uma mina que se utiliza da tecnologia da rejeito filtrado (Goldcorp, 2019). ....	9
Figura 2.5 – Estéril e rejeito adicionados no mesmo local na mina de ouro de Kidston (Gowan et al., 2010).....	11
Figura 2.6 - Rejeito aplicado em uma pilha de estéril (a) e estéril aplicado em uma barragem de rejeito (b) (Hawley & Cunning, 2017). ....	12
Figura 2.7 - Rejeito em células de estéril (Hawley & Cunning, 2017).....	13
Figura 2.8 - Co-disposição por bombeamento. (Gowan, s.d.) .....	14
Figura 2.9 - Mistura homogênea entre rejeito e estéril (Wilson et al., 2003). ....	15
Figura 2.10 - Granulometria do rejeito filtrado, co-disposição e estéril (Gorakhki et al., 2019). ....	16
Figura 2.11 - Etapas dos processos necessárias em uma mina que utiliza a tecnologia da co-disposição (Goldcorp, 2019). ....	17
Figura 2.12 - Possíveis matriz da co-disposição de acordo com a dosagem.....	18
Figura 2.13 - Composição da parte volumétrica em função da razão da mistura. ....	19
Figura 2.14 - Comportamento da umidade, massa específica seca e grau de saturação com a razão da mistura. ....	19
Figura 2.15 - Seção tipo de projeto NICO. (Golder Associates, 2000).....	21
Figura 2.17 – Processo de estaqueamento e compactação na mina de Penãsquito (Goldcorp, 2019).....	22
Figura 2.16 - Campos experimentais de co-disposição e estéril para comparar a drenagem ácida (Bareither et al., 2018).....	22
Figura 2.18 - Ensaio de cisalhamento direto realizado por Burden et al. (2019).....	24
Figura 2.19 - Formatos de pilhas mais comuns: pilha em vale (a), pilha transversal a um vale (b), pilha de encosta (c), pilha de crista (d) pilha “bolo de noiva” (e) Wahler (1979, apud. Hawley & Cunning, 2017). ....	26

Figura 2.20 - Linha de estados críticos, linha de compressão isotrópica e as variáveis do modelo Cam-Clay (Geoslope, 2012).....	29
Figura 2.21 - Variáveis consideradas no método Morgenstern-Price. ....	31
Figura 2.22 - Cunha de ruptura circular (Geoslope, 2012). ....	32
Figura 2.23 - Cunha de ruptura plana (Geoslope, 2012).....	32
Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia desse trabalho. ....	35
Figura 3.2 – Aspectos visuais dos materiais utilizados nessa pesquisa: a) Rejeito filtrado; b) co-disposição. ....	36
Figura 3.3 – Variação do grau de saturação com a massa específica para os materiais estudados. ....	37
Figura 3.4 - Curva de retenção dos materiais estudados. ....	37
Figura 3.5 – Geometria 2D da pilha considerada para análise drenada. ....	38
Figura 3.6 - Taxas de alteamento para as pilhas de rejeito filtrado e co-disposição para duas inclinações diferentes. ....	39
Figura 3.7 - Condições de contorno aplicadas: a) Modelo 1D; b) Modelo 2D. ....	39
Figura 3.8 – Diferenças entre o alteamento real e o alteamento estimado médio considerado. ....	40
Figura 3.9 – Determinação da posição do dreno na pilha. ....	41
Figura 4.1 - Tensão desviadora do ensaio real e do modelo CCM para o rejeito filtrado .....	43
Figura 4.2 - Poropressão do ensaio real e do modelo CCM para o rejeito filtrado.....	43
Figura 4.3 – Tensão desviadora do ensaio real e do modelo CCM para a co-disposição .....	44
Figura 4.4 - Tensão poropressão do ensaio real e do modelo CCM para a co-disposição.....	44
Figura 4.5 - Resultados da análise de sensibilidade do modelo e dos ensaios do rejeito filtrado: a) Tensão desviadora; b) Poropressão. ....	45
Figura 4.6 - Resultados da análise de sensibilidade da tensão desviadora (a) e poropressão (b) do modelo e dos ensaios da co-disposição. ....	46
Figura 4.7 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes valores de sucção em uma pilha de rejeito filtrado. ....	47
Figura 4.8 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes valores de sucção em uma pilha de co-disposição .....	48
Figura 4.9 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes taxas de alteamento na pilha de rejeito filtrado (20%).....	48
Figura 4.10 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes taxas de alteamento na pilha de co-disposição.....	49

Figura 4.11 - Fatores de segurança encontrados durante o alteamento nas análises drenadas.	50
Figura 4.12 - Posição da linha freática à cem metros na pilha de rejeito filtrado (20%) (a) e co-disposição, com inclinação de 3H:1V. ....	51
Figura 4.13 - Superfície de ruptura do rejeito filtrado (a) e co-disposição (b). ....	51
Figura 4.14 – Poropressões finais do rejeito filtrado (20%) e co-disposição em uma seção no meio da pilha. ....	52
Figura 4.15 - Deslocamentos finais do rejeito filtrado (20%) e co-disposição em uma seção no meio da pilha. ....	52
Figura 4.16 – Deslocamentos na pilha de rejeito filtrado (20%) a 215 m (a) e na pilha de co-disposição a 283 m (b). ....	53
Figura 4.17 - Índices de vazios na pilha de rejeito filtrado (20%) a 215 m (a) e na pilha de co-disposição (b). ....	54
Figura 4.18 - Mudança do fator de segurança na pilha de rejeito filtrado (20%) para vários intervalos de dias. ....	55
Figura 4.19 - Mudança do fator de segurança na pilha de co-disposição para vários intervalos de dias. ....	56
Figura 4.20 – Fatores de segurança para diversas localizações de dreno na pilha de rejeito filtrado. ....	56
Figura 4.21 - Excesso de poropressão desenvolvido nas pilhas de rejeito filtrado para tapetes drenantes posicionado na profundidade: a) 5 m; b) 10 m; c) 15 m. ....	57
Figura 4.22 - Fatores de segurança para diversas localizações de dreno na pilha de co-disposição. ....	58
Figura 4.23 - Fatores de segurança para diversos valores de sucção para o rejeito filtrado e co-disposição na análise drenada. ....	58
Figura 4.24 - Comportamento da linha freática a mudança da sucção para 18 kPa: a) Rejeito filtrado; b) Co-disposição. ....	59
Figura 4.25 - Fatores de segurança encontrados durante o alteamento nas análises não drenadas para o rejeito filtrado (20%) e a co-disposição considerado e sem considerar a sucção. ....	60
Figura 4.26 - Posição da linha freática à cem metros na pilha de rejeito filtrado (20%) (a) e co-disposição, com inclinação de 3,5H:1V. ....	60
Figura 4.27 - Fatores de segurança para diversos valores de sucção para o rejeito filtrado e co-disposição na análise não drenada. ....	61

Figura 4.28 - Taxa de alteamento para vários comprimentos de pilhas diferentes nas  
inclinações estudadas. .... 62

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Tipos de rejeito de acordo com Ulrich (2019) .....	7
Tabela 2.2. Vantagens e desvantagens da co-disposição .....	10
Tabela 2.3 - Classes de co-disposição de acordo com Wickland <i>et al.</i> (2006) .....	11
Tabela 2.4 – Tendência da razão da mistura e da densidade seca quando se aumenta os teores de umidade, índice de vazios ou densidades dos materiais.....	20
Tabela 3.1. Propriedades do rejeito filtrado e co-disposição utilizados.....	36
Tabela 4.1 - Parâmetros do CCM encontrados da calibração do modelo para os materiais estudados.....	45
Tabela 4.2 - Parâmetros encontrados da calibração do modelo linear elástico para os materiais estudados.....	46
Tabela 4.3 - Taxas de alteamento obtidas nas análises drenadas e não drenadas nos materiais estudados.....	62

## Lista de símbolos

---

Símbolo	Descrição
$[K]_s$	Matriz de rigidez
$[K]_w$	Matriz de condutividade hidráulica
$[L]$	Matriz de acoplamento
1D	Modelo unidimensional
2D	Modelo bidimensional
$C_c$	Coefficiente de compressão primário
$C_\alpha$	Coefficiente de compressão secundário
$c'$	Coesão
$dEz$	Incremento infinitesimal da força normal entre fatias
$dN$	Força normal na base da fatia
$dx$	Comprimento da lamela
$dPb$	Resultante das pressões neutras na base da fatia
$dPw$	Incremento infinitesimal das pressões neutras na lateral da fatia
$ds$	Força cisalhante mobilizada na base da fatia
$dT$	Incremento infinitesimal da força tangencial entre fatias
$dW$	Força peso da fatia
$E$	Módulo de Young
$E_c$	Força normal entre lamelas
$Ez$	Força normal entre fatias
$e$	Índice de vazios

---

Símbolo	Descrição
$F'$	Força nas condições de contorno
$F$	Função de superfície
KCB	Klohn Crippen Berger
$FS$	Fator de segurança
$H$	Horizontal
$M$	Inclinação da linha dos estados críticos
MCC	Modelo Cam-Clay
$p$	Tensão média
$p_x$	Tensão média quando atinge o estado crítico
$Q$	Fluxo nas condições de contorno
$q$	Tensão de cisalhamento
$T$	Força tangencial entre fatias
$N$	Valor do volume específico quando a linha de compressão isotrópica tem valor $p=\ln(1)$
$u_a$	Poropressão do ar
$u_w$	Poropressão da água
$v_s'$	Valor do volume específico quando a linha de recompressão tem valor $p=\ln(1)$
$V$	Vertical
$\nu'$	Coefficiente de Poisson
$V_{agua}$	Volume de água
$V_{ar}$	Volume de ar
$V_{rejeito}$	Volume de estéril

Símbolo	Descrição
$v$	Volume específico
$w$	Teor de umidade
$X$	Força cisalhante entre lamelas
$(y - yt)$	Braço de alavanca
$\alpha$	Inclinação da lamela
$\alpha'$	Ângulo de inclinação da pilha
$\Delta d$	Incremento de deslocamentos
$\Delta u$	Incremento de poropressão
$\lambda$	Inclinação da linha de compressão isotrópica
$\lambda'$	Porcentagem da função usada (em forma decimal)
$\kappa$	Inclinação da linha de recompressão
$\theta_s$	Teor de umidade volumétrico saturado
$\theta_r$	Teor de umidade volumétrico residual
$\theta_w$	Teor de umidade volumétrico
$\phi^b$	Ângulo de atrito devido a sucção
$\phi'$	Ângulo de atrito efetivo
$\phi$	Ângulo de atrito total

# 1 - INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade essencial para a economia brasileira, visto que as atividades de produção mineral são responsáveis por 20,5% das exportações e 4% do PIB do Brasil (Ministério de Minas e Energia, 2019). Por exemplo, o Brasil foi o segundo maior produtor de minério de ferro do mundo com uma produção em torno de 480 Mt em 2019 (USGS, 2019). No entanto, estas atividades geram um volume significativo de resíduos decorrentes dos processos de lavra e beneficiamento. Abraão em 1987, citado por Espósito (2000) firmam que a razão entre a média do produto final e a geração de rejeitos de minério de ferro, carvão, fosfato, cobre e ouro são 2/1, 1/3, 1/5, 1/30 e 1/10000, respectivamente. Tendo em vista isso, a crescente demanda mundial por bens minerais, aliada ao desenvolvimento econômico e tecnológico, tem condicionado o aproveitamento de minérios de baixo teor ou mesmo aqueles de difícil beneficiamento, o que resultou no crescimento expressivo da produção de rejeitos, aumentando ainda mais a demanda por métodos de disposição (Soares, 2010).

Atualmente, a disposição de resíduos das minas é realizada separadamente, sendo o rejeito e estéril disposto em barragens e em pilhas, respectivamente. Contudo, em um período de apenas três anos, ocorreu o rompimento das barragens a montante em Mariana e Brumadinho, onde juntas resultaram em cerca de 290 mortes, bem como em imensurável dano ambiental. Dentre diversos casos de acidentes em barragens de mineradoras no Brasil, esses acidentes contribuíram para endossar os riscos associados à falha das barragens à montante, o que motivou a Agência Nacional de Mineração (2019) a estabelecer o descomissionamento de 61 destas barragens, dita como um método de alto risco.

Assim, o setor de mineração tem procurado por tecnologias viáveis que possam substituir a construção das barragens de rejeito, devido ao seu grande risco potencial (KCB, 2017). Hoje em dia, as soluções vistas como promissoras são as pilhas de rejeito filtrado e de co-disposição, pois não geram reservatórios de água, o que reduz consideravelmente as consequências de uma eventual ruptura. Contudo, deve-se considerar que não há remediações universais e que a disposição de rejeitos e toda sua instalação deve ser projetada baseada em critérios específicos do local (Ulrich, 2019).

Outros desafios relacionados a disposição de resíduos em pilha apareceram nos últimos anos, como deve ser a construção dessas estruturas autoportantes, com material de baixa permeabilidade, alta sucção e alturas superiores a 100 m. Autores da literatura técnica alertam sobre os cuidados, em relação a resistência e a densidade dos materiais quando se constrói pilhas com alturas superiores a 100 m (Crystal et al., 2018).

### **1.1 - Motivação da pesquisa**

A compreensão dos problemas envolvidos na disposição em pilhas de rejeito filtrado e co-disposição é de suma importância, tanto para a mineradora, como para os governantes e população em geral, visto que essas obras envolvem riscos para todos. Um dos principais pontos a serem observados são as considerações durante o dimensionamento dessa estrutura sob critérios que se baseiam em estruturas de baixas alturas, levando a premissas de projeto equivocadas. Dito isso, a simulação numérica pode ser utilizada para analisar o comportamento da estrutura de alto porte durante os alteamentos, estimando os parâmetros de poropressão e deslocamentos ao decorrer da construção.

Ademais, outro ponto é as comparações entre as soluções possíveis para construção de uma estrutura de disposição de rejeitos/estéril. Uma análise numérica pode alavancar ou diminuir investimentos em determinada tecnologia, dependendo dos resultados obtidos. O rejeito filtrado é uma tecnologia mais consolidada do que a co-disposição, contudo não se sabe quais são as vantagens e desvantagens de ter esse tipo de disposição em relação a co-disposição, em que se exige mais custos de implantação e operação.

Diante desse cenário, observa-se a utilidade de avaliação das pilhas de rejeito filtrado e de co-disposição quando apresentam alturas superiores a 100 m. Estudar a taxa de alteamento dos materiais é crucial para ter uma ideia inicial de qual é o possível comportamento dessas pilhas no campo. Além disso, a simulação numérica é uma ferramenta que pode ser utilizada para diversos tipos de geometrias, taxas de alteamento diárias de materiais, além de poder avaliar qual é a melhor alternativa de dissipação de poropressões para cada material. Essa pesquisa desenvolvida neste mestrado tem como colaborar com as empresas de mineração na compreensão do comportamento desses materiais mediante a alta tensões confinantes.

### **1.2 - Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a estabilidade de pilhas de rejeito filtrado e co-disposição por meio da análise de uma simulação numérica de tensão-deformação-adensamento.

Os objetivos específicos são:

- Calibrar os materiais para os modelos constitutivos utilizados neste trabalho;
- Determinar a taxa de alteamento limite para cada tipo de material;
- Avaliar a influência da sucção nos materiais durante o alteamento;
- Definir qual tipo de ruptura ocorre no rejeito filtrado e co-disposição;
- Avaliar as mudanças de comportamento drenado e não drenado na taxa de alteamento;
- Ponderar as formas de acelerar a taxa de alteamento, como por exemplo, inserção de drenos e pausa no alteamento;
- Avaliar a influência da geometria na definição da taxa de alteamento.

### **1.3 - Estrutura da dissertação**

Essa dissertação está estruturada em seis capítulos. No Capítulo 1 é apresentado uma introdução, motivação do problema estudado e os objetivos geral e específicos desse trabalho. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura sobre os materiais, além de uma análise sobre o comportamento da pilha e uma fundamentação teórica para entender os capítulos subsequentes. Os principais tópicos abordados são as definições do rejeito filtrado e co-disposição, como é realizado a dosagem da co-disposição, modelos constitutivos e o método de equilíbrio utilizado.

O Capítulo 3 aborda a metodologia desse trabalho, apresentando as propriedades mecânicas e hidráulicas dos materiais estudados, como o ângulo de atrito, peso específicos, coeficiente de compressão primário e coeficiente de permeabilidade. Além disso, esse capítulo descreve os procedimentos empregados para calibrar os materiais estudados com base nos triaxiais estudados, além de detalhar como foram realizadas as análises de sensibilidade, análises de estabilidade e avaliação da influência da geometria na taxa de alteamento.

Os resultados obtidos com essa dissertação e as discussões sobre eles estão expostos no Capítulo 4, onde pode-se destacar as comparações entre o modelo calibrado e os ensaios reais, as taxas de alteamento limite obtidas, o desenvolvimento da linha freática durante os alteamentos e a influência da sucção nas pilhas de rejeito filtrado e co-disposição. O último capítulo apresenta as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros com base nos resultados obtidos.

## 2 - COMPORTAMENTO DO REJEITO FILTRADO E CO-DISPOSIÇÃO

### 2.1 - Estéril

Segundo Tiruta-Barna *et al.* (2007), a mineração se caracteriza como uma das maiores produtoras de resíduos. Dentre os diversos métodos de disposição de resíduos que uma mina pode implementar, os mais comuns são pilhas e barragem. Devido aos riscos físicos e geoquímicos, os custos com manejo e disposição podem gerar uma perda financeira entre 1-3,5% do custo total da mina (Knapman, 2001; KCB, 2017).

O estéril é um material que não possui valor econômico agregado ao mineral. Segundo Casentini *et al.* (2019), cerca de 95% desses materiais são dispostos em pilhas. Tal estrutura apresenta as seguintes vantagens: método bastante difundido, rapidez do alteamento, não requer equipamentos específicos para compactação. Todavia, estas estruturas exigem uma avaliação complexa que, segundo Amos *et al.* (2014), requer um entendimento dos processos físicos, químicos e microbianos. A Figura 2.1 ilustra as interações da pilha com o meio.

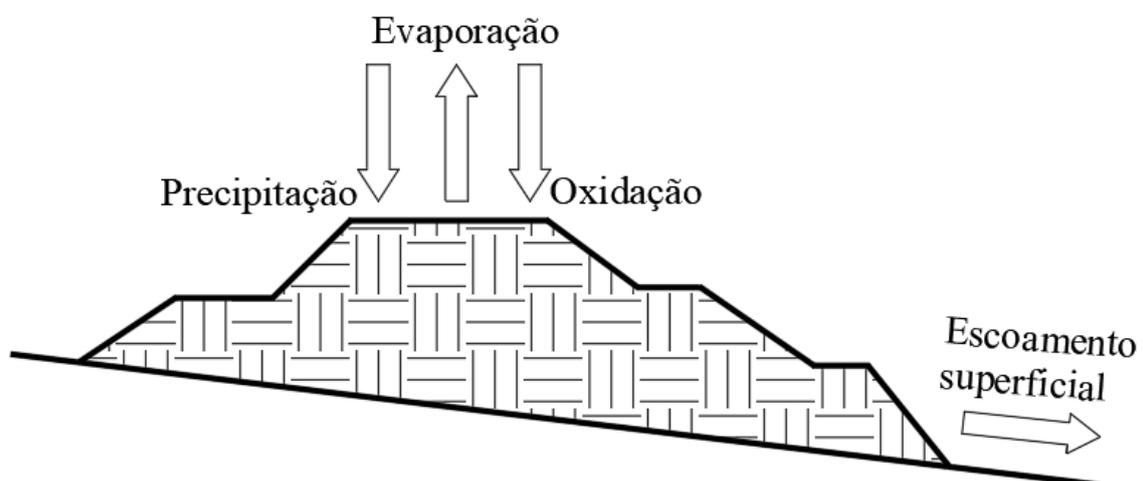


Figura 2.1 - Interações possíveis com o meio em uma pilha.

Um dos processos mais evidenciados neste tipo de estrutura é a drenagem ácida das rochas, que é ocasionado pela oxidação de minerais ferrosos e sulfúricos, como a pirita e pirrotita, resultando na mobilização destes elementos devido a lixiviação (Amos *et al.*, 2014).

Este fenômeno é resultado da estrutura tipicamente porosa do estéril, permitindo um fluxo de oxigênio e água (Wickland *et al.*, 2006).

Fox & Carraro (2010) apresentaram na Figura 2.2 outro problema típico de pilhas de estéril: a quebra de grãos com o aumento de tensão. Nota-se que o estéril pode ter valores de atrito comparáveis com as areias de Ottawa e angulares, dependendo da tensão normal aplicada. Todo tipo de rocha tem problemas relacionados a isso, sendo mais evidente em pilhas com alturas elevadas.

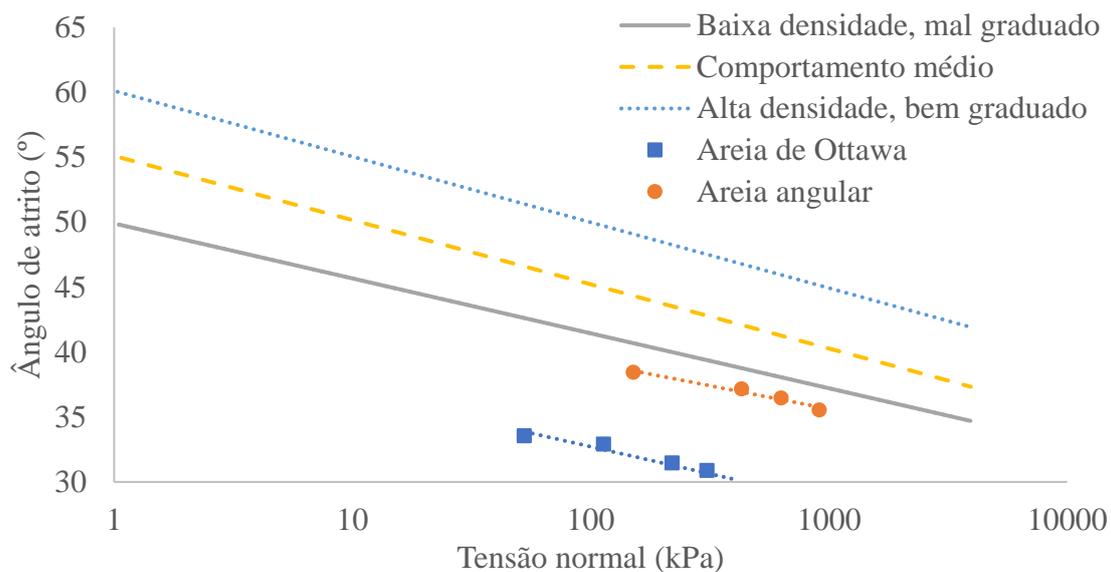


Figura 2.2 – Relação entre ângulo de atrito e tensão normal aplicada (Modificado Leps, 1970).

Em relação aos ensaios de laboratório, existe uma dificuldade de obter parâmetros hidráulicos e mecânicos, devido ao estéril, normalmente, possuir blocos de rochas com tamanhos superiores a 1 m, sendo necessário equipamentos de grandes dimensões devido ao tamanho máximo dos grãos, o que na maioria das vezes tornam os ensaios nestes materiais inviáveis devido aos custos (Wickland *et al.*, 2006). Por causa disso, vários autores estudaram os efeitos da granulometria quando se utiliza ensaios convencionais. Um dos métodos estudados para avaliar a acurácia dos ensaios é a razão entre o diâmetro do cilindro do ensaio sobre diâmetro máximo da partícula (Indraratna, 1993). Foi descoberto que os erros devido a granulometria são mais perspectiveis quando essa relação é menor que 5 (Nitchiporovitch *et al.*, 1969 *apud* Fox & Carraro, 2010). Isso provoca equívocos durante a etapa de projeto em relação a resistência ao cisalhamento e parâmetros de rigidez do material (Fox e Carraro, 2010). Outros métodos presentes na literatura técnica são: o *scalping* ou a graduação paralela. Autores

da literatura técnica relatam que a graduação paralela tem problemas de permeabilidade para partículas muito finas.

A Figura 2.3 mostra o efeito do ângulo de atrito devido ao diâmetro máximo da partícula utilizando três triaxiais de diâmetro de 70 mm, 300 mm e 914 mm. De acordo com Fox & Carraro (2010), o erro entre diâmetros poderia ser reduzindo de 11% para 3% se utilizasse um triaxial de 150 mm. Diversos autores explicam também os problemas relacionados a membrana do ensaio que influência o adensamento e cisalhamento.

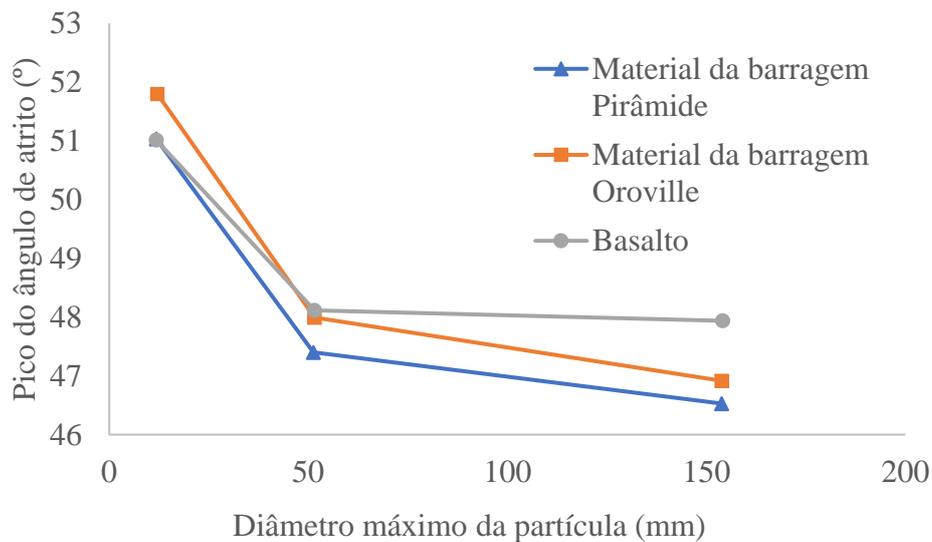


Figura 2.3 - Efeito do diâmetro máximo de partícula no ângulo de atrito de pico de três solos diferentes com graduações paralelas (Marachi et al., 1972 apud. Fox & Carraro, 2010)

## 2.2 - Rejeito

O processo de beneficiamento do minério gera um rejeito que se consiste em solo, minério não aproveitado e água. O volume entre o produto final e a geração de rejeito depende do minério a ser extraído. A Tabela 2.1 é apresentada por Ulrich (2019) em que se divide o rejeito em quatro categorias em função de uma tensão em campo e uma faixa de teor de sólidos. Isso tem como princípio determinar a mudança entre os comportamentos do rejeito de acordo com a umidade presente. A tensão em campo é definida como a aquela requerida para iniciar o movimento do material (Ulrich & Kerr, 2011). Já o teor de sólidos, é a relação entre a massa de sólidos sobre a massa total.

Tabela 2.1 - Tipos de rejeito de acordo com Ulrich (2019)

	Tensão em campo (Pa)	Faixa de teor de sólidos (%)
Rejeito convencional	<5 até 20	<50
Rejeito espessado	20 até 100	50 até 70
Rejeito em pasta	100 até 800	70 até 85
Rejeito filtrado	>800	>85

### 2.2.1- Rejeito convencional

O rejeito tradicional em várias indústrias de processamento do minério tem um teor de sólidos por volta de 35% (Shukla *et al.*, 2018). Os teores de umidade variam de acordo com a mineralogia, mas normalmente são saturados, se comportando como um líquido (KCB, 2017). Essa enorme quantidade de água no processamento é devido ao beneficiamento úmido, necessário para o aumentar da eficiência do processo. Um dos principais problemas relacionados o rejeito convencional é o problema da liquefação, definida como sendo o fenômeno da perda elevada da resistência de um material, induzida por acréscimos de poropressões, sob carregamentos não drenados (Ferreira, 2018). Dentre dos aspectos desse fenômeno, Ferreira (2018) cita que o mais difícil é identificar os gatilhos associados a esse evento.

Esse tipo de rejeito pode ser disposto pelo método a montante, o método linha de centro e o método a jusante. O método mais econômico é o de montante, contudo, é o menos seguro. Roche *et al.* (2017) citam 20 falhas de barragem nos últimos 30 anos. Isso tem como princípio determinar a mudança entre os comportamentos do rejeito de acordo com a umidade presente. A literatura técnica apresenta diversos trabalhos sobre o comportamento destas estruturas (Cavalcante, 2004; Cordão Neto, 2005; Pereira, 2015; entre outros).

### 2.2.2- Rejeito filtrado

Devido a diversos fatores, como a escassez de água, segurança e regulamentações impostas pelo meio ambiente, as empresas buscaram alternativas para dispor o rejeito (Davies, 2011; Ulrich, 2019). O rejeito filtrado é uma nova abordagem que apareceu promissora tendo característica de não precisar de barramento, sendo atualmente comercialmente viável para as operações nas minas e com diversas aplicações ao redor do mundo (Wickland & Longo, 2017).

Ulrich (2019) afirma que já ocorre adoção deste sistema para minas com alta produção de rejeito (excedendo 50.000 toneladas por dia). Crystal *et al.* (2018) relata que há estudos que são da ordem de 100.000 toneladas por dia. Contudo, há algumas dificuldades citadas pela KCB (2017), onde existem limitações em relação a pluviometria e regularidade do terreno da instalação.

O rejeito filtrado consiste em um material de descarte resultante da lavra do qual se retira água por meio de filtração mecânica ou a vácuo, com o objetivo de acelerar a consolidação desse material (Lupo & J. Hall, 2010). Essa filtragem aplica uma força sobre as partículas, que pode ser obtida pela força da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação (Boccamino, 2017). Ao se retirar água, diversas vantagens são notadas como por exemplo, a redução dos deslocamentos devido ao adensamento e reaproveitamento da água para o processo de extração do minério (KCB, 2017). Além disto, Ulrich (2019) afirma que o processo de filtração induz uma melhora das propriedades de engenharia deste material, atendendo melhor às condições locais e limitações.

Esse processo tem sua eficiência é função do tipo de maquinário utilizado e rejeito a ser processado. Boccamino (2017) cita que as variáveis de controle são: a mineralogia da polpa, teor de umidade da torta e taxa de unidade de filtração. Boccamino (2017) exhibe que os principais fatores que afetam a taxa de filtragem são:

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

Em relação a viabilidade, Guimarães (2011) mostra que a disposição de rejeito em pilha, sendo a melhor opção técnico-econômica para filtragem do rejeito pastoso é com disco convencional ou cerâmico e para filtragem da lama convencional é com filtro prensa horizontal.

A mecânica dos solos não saturado tem grande importância na estabilidade estrutural das pilhas de rejeito filtrado. Lupo & Hall (2010) mostram que a resistência desse material é dependente do teor de umidade, densidade, granulometria e condições de drenagem em campo. Além disso, deve-se lembrar que o comportamento não saturado do rejeito em campo depende de mais variáveis, como a taxa de alteamento da pilha, índice de vazios, compressibilidade e permeabilidade do material. Robertson *et al.* (2017) mostram que em média, o grau de saturação

do rejeito filtrado em uma pilha está entre 10 a 20%, com sucções variando entre 50 a 100 kPa. O comportamento não saturado pode atingir até 100 m de profundidade (Robertson *et al.*, 2017). Sobre o valor da entrada de ar, Gorakhki *et al.* (2019) observam variações entre 20 e 56 kPa no rejeito filtrado, sendo dependente também da granulometria do material.

Contudo, a sucção é uma variável dependente das condições do campo e da eficiência da filtração. Crystal *et al.* (2018) citam que nem os engenheiros e operadores tem controle sobre a variabilidade do minério, podendo ocorrer problemas em relação a umidade pós filtragem quando existe uma alta porcentagem de partículas do tamanho de argila. Tendo em vista esses problemas, Crystal *et al.* (2018) citam que materiais que não atingem determinada umidade são considerados fora de especificação e precisam ser depositados em métodos convencionais.

O processo para obtenção do rejeito filtrado apareceu na década de 90 onde, a princípio, parecia promissor, contudo, os custos de implantação e operacionais não eram competitivos em relação aos métodos convencionais. Crystal *et al.* (2018) comentam que o processo em si não se desenvolveu nos últimos vinte anos, onde os avanços foram focados na redução dos gastos de implantação. A Figura 2.4 mostra as etapas deste processo em uma mina. O processo de deságue é usualmente dividido em sedimentação e filtração, visto que, o tamanho das partículas, teor de sólidos e a natureza do material definem os equipamentos necessários. (Mular *et al.*, 2002). O rejeito com características de lama e comportamento de líquido vai para o espessador, onde se diminui o teor de água para o processo de filtração. O bombeamento para essa etapa é realizado por bombas, como características de pasta (KCB, 2017). A filtração pode ser realizada como diversos tipos de filtração, sendo os mais conhecidos a filtração a vácuo e os filtros-

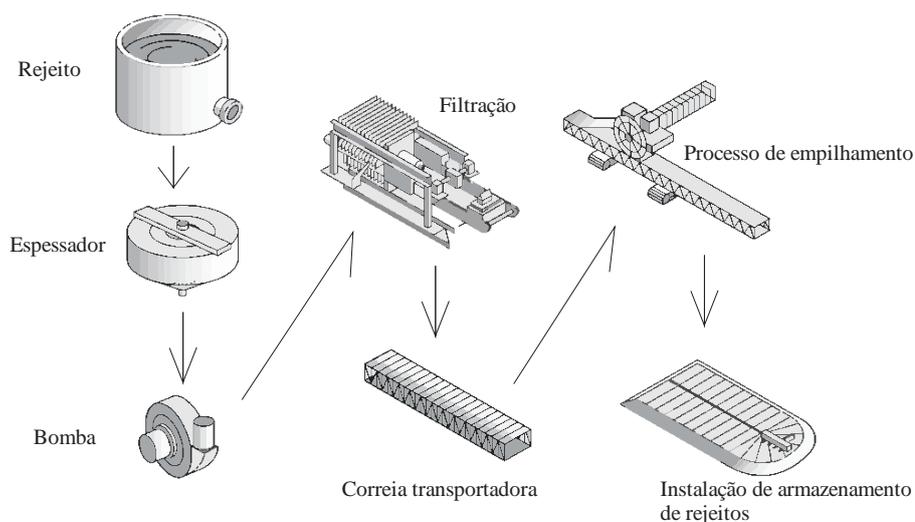


Figura 2.4 - Etapas dos processos necessárias em uma mina que se utiliza da tecnologia da rejeito filtrado (Goldcorp, 2019).

prensa. Em seguida, é destinado a instalação de rejeitos, onde o transporte é realizado por correias transportadoras quando a produção é de larga escala, ou caminhões, quando a produção é de escala menor.

### 2.3 - Co-disposição

A mistura entre o rejeito e o estéril é definido como co-disposição, onde se obtém um material com baixa compressibilidade e alta resistência ao cisalhamento. Esse método veio para solucionar problemas de drenagem ácida nas minas de carvão na década de 90, devido a diminuição de permeabilidade, conseqüentemente, a diminuição da oxidação do estéril e percolação da lixiviação. Desde então, implantaram a co-disposição em minas de pequeno porte. Devido à redução de custos da tecnologia de rejeito filtrado, a co-disposição tem sido uma solução para as minas de grande porte. Alguns vantagens e desvantagens estão citadas na Tabela 2.2 pelos autores Brawner em 1978 citado por Wickland (2006) e Wickland *et al.* (2006).

Tabela 2.2. Vantagens e desvantagens da co-disposição

Vantagens	Redução do potencial de drenagem ácida
	Redução do potencial de liquefação
	Sem necessidade de barragens de rejeito
	Menor volume total requerido para dispor
	Redução da poeira nos depósitos
	Aumento da resistência e estabilidade ao longo prazo
	Redução da erosão do rejeito
	Retardar a lixiviação e a quebra de partículas da rocha
Desvantagens	Redução da área de disposição
	Custo alto de operação da mina
	Dificuldade de determinação dos parâmetros hidráulicos e mecânicos

As propriedades mecânicas deste material se assemelham às propriedades do estéril e as propriedades hidráulicas às do rejeito, caso esteja na proporção correta. A co-disposição possui algumas divisões que podem ser de acordo com o grau de mistura e método de disposição. Wickland *et al.* (2006) mencionam os grupos dispostos na Tabela 2.3, que começa com a mistura passiva entre o estéril e rejeito até a mistura ativa, onde não se diferencia os dois materiais. Nos últimos anos, algumas empresas encontraram uma solução economicamente

viável para a mistura homogênea entre estéril e rejeito filtrado, se destacando a *paste rock* da Golder Associates e *Eco-tails* da Goldcorp.

Tabela 2.3 - Classes de co-disposição de acordo com Wickland *et al.* (2006)

Tipos de co-disposição
Mistura homogênea entre estéril e rejeito
Co-disposição por bombeamento
Co-disposição em camadas
Rejeito em células de estéril
Estéril adicionado em área de rejeito
Rejeito adicionado em pilha de estéril
Estéril e rejeito adicionados no mesmo local

### 2.3.1- Estéril e rejeito adicionados no mesmo local

A forma mais simples de descarte é a deposição de resíduos de rocha e rejeitos em extremos opostos da mesma bacia, como na mina de ouro de Kidston, na Austrália. Contudo, a implementação deste tipo de co-disposição requer um espaço disponível em formato de cava. (Hawley & Cunning ,2017). A Figura 2.5 mostra esse tipo de co-disposição.

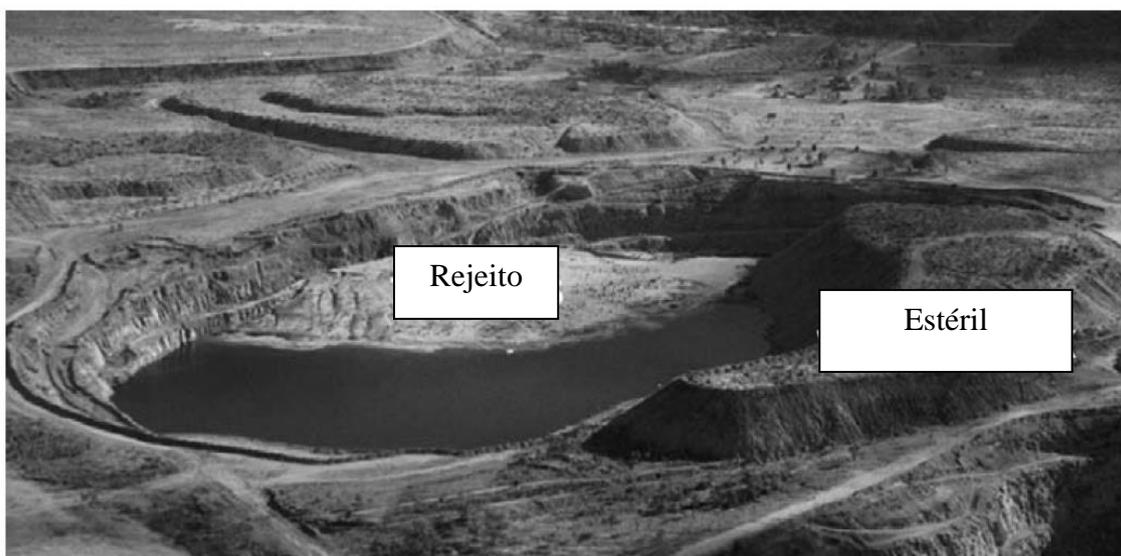


Figura 2.5 – Estéril e rejeito adicionados no mesmo local na mina de ouro de Kidston (Gowan *et al.*, 2010).

### 2.3.2- Rejeito adicionado em pilha de estéril e Estéril adicionado em área de rejeito.

Hawley & Cuning (2017) apresentam algumas características desses tipos de co-disposição, sendo elas:

- Requer um rejeito não segregado;
- Diminui a drenagem ácida das rochas;
- Armazenamento adicional nos vazios do estéril;
- A mistura de maneira passiva, sendo a mistura disposta no local.

O nível de mistura e vantagens entre os dois métodos são similares. A diferença esses métodos com o anterior é que uma das estruturas já foi construída. A Figura 2.6a apresenta o rejeito aplicado em uma pilha de estéril e a Figura 2.6b, o estéril aplicado em uma barragem de rejeito.



Figura 2.6 - Rejeito aplicado em uma pilha de estéril (a) e estéril aplicado em uma barragem de rejeito (b) (Hawley & Cuning, 2017).

### 2.3.3- Rejeito em células de estéril e rejeito em camadas

De acordo com Hawley & Cunning (2017), esses métodos não permitem o rejeito no estado de lama devido um critério de projeto, tendo as principais vantagens sendo evitar a drenagem ácida, diminuindo o contato do estéril com o oxigênio. Além disso, há uma estrutura construída para ter esse rejeito, uma em célula e outra em camadas horizontais. A Figura 2.7 mostra um exemplo da aplicação de rejeito e células. Esses materiais ainda não apresentam uma mistura ativa entre eles. Boccamino (2017) cita um caso de co-disposição em camadas na mina do Pico para melhorar a estabilidade de pilhas de rejeito filtrado.



Figura 2.7 - Rejeito em células de estéril (Hawley & Cunning, 2017).

### 2.3.4- Co-disposição por bombeamento

A co-disposição por bombeamento foi introduzida para as minas de carvão no início dos anos 90, sendo altamente utilizada em minas de pequeno e médio porte. (Williams *et al.* 1995 *apud* Wickland *et al.*, 2010). Tem como vantagens de ser bombeado, evitando caminhões para a tarefa de disposição. Esse método normalmente tem problemas de segregação e, conseqüentemente, aumento da porosidade, sendo a solução para isto é modificar a granulometria dos materiais para eliminar o *gap grading*. (Morris & Williams, 1999). Além disso, outro problema apresentado por Wickland (2006) seria que os diâmetros das partículas máximas que podem ser bombeadas que são da ordem de 10 cm. Burden *et al.* (2019) mostram que os rejeitos filtrados não podem ser bombeados. A Figura 2.8 mostra a praia de co-disposição que é onde está localizado os materiais mais pesados, e o rejeito, devido a problemas de segregação.



Figura 2.8 - Co-disposição por bombeamento. (Gowan, s.d.)

### 2.3.5- Mistura homogênea entre estéril e rejeito

Esse método vem ganhando espaço devido o aumento de eficiência das técnicas de rejeito filtrado e disposição de método de mistura mais eficientes. Wickland & Longo (2017) mostram pela Figura 2.9 como uma mistura entre estéril e rejeito se comporta por este método de co-disposição. As vantagens apresentadas por Wickland & Longo (2017) são:

- Resistência de estéril;
- Condutividade hidráulica de rejeito;
- Sem drenagem ácida;
- Não se liquefaz;
- Máxima densidade;
- Mínimo volume;
- Baixos deslocamentos; e
- Permite o tráfego.



Figura 2.9 - Mistura homogênea entre rejeito e estéril (Wilson *et al.*, 2003).

### **2.3.6- Propriedades mecânica, hidráulicas e comportamento não saturado**

Burden *et al.* (2019) mostram que a adição de rejeito filtrado aumenta a resistência ao cisalhamento do material e reduz a resposta da poropressão durante os alteamentos, permitindo taxas de alteamentos mais levadas. Além disso, as propriedades mecânicas são estáveis a várias proporções de mistura entre o rejeito e o estéril, tornando-se ainda mais viável para as minas que implantarem esta tecnologia. Sobre a compressibilidade, Bareither *et al.* (2018) citam dois possíveis mecanismos que reduzem essa característica na co-disposição: a inclusão de estéril e o contato entre partículas de estéril previne a compressão do rejeito entre os vazios. Wickland *et al.* (2006) reportam que a co-disposição tem valores de índice de compressibilidade primário aproximadamente dez vezes menor do que o rejeito.

Já em relação as propriedades hidráulicas, a co-disposição tem permeabilidade similar do rejeito. Wilson *et al.* (2003) realizaram uma série de ensaios de permeabilidade com diversas proporções de rejeito e estéril e o que se mostrou que mesmo quando a quantidade de estéril era vinte vezes superior à do rejeito, esta propriedade estava na ordem de grandeza do rejeito quando o material estava consolidado. Gorakhki *et al.* (2019) apresentaram ensaios de permeabilidade no rejeito filtrado e co-disposição, constaram que a co-disposição apresenta duas ordens de grandeza maior que o rejeito filtrado quando está abaixo de 100 kPa de

confinamento. Entretanto, esses valores se equiparam para tensões confiantes superiores a 100 kPa.

O comportamento não saturado tem suas peculiaridades quando comparado com o rejeito filtrado. As principais mudanças são em relação ao valor de entrada de ar e o teor de umidade volumétrico saturado ( $\theta_s$ ). Gorakhki *et al.* (2019) citam que a redução do  $\theta_s$  na co-disposição é devido a substituição do rejeito por estéril. Enquanto os valores de entrada de ar, Wilson *et al.* (2003) citam que podem chegar a 100 kPa, ou seja, 10 m acima da linha freática, e a co-disposição se comportaria com características de material saturado. Essa característica específica é uma vantagem para o combate da drenagem ácida. Gorakhki *et al.* (2019) citam que a mudança de comportamento é devido ao aumento da densidade devido a inclusão do estéril que reduz o volume de poros disponível. A granulometria típica do material é apresentada na Figura 2.10.

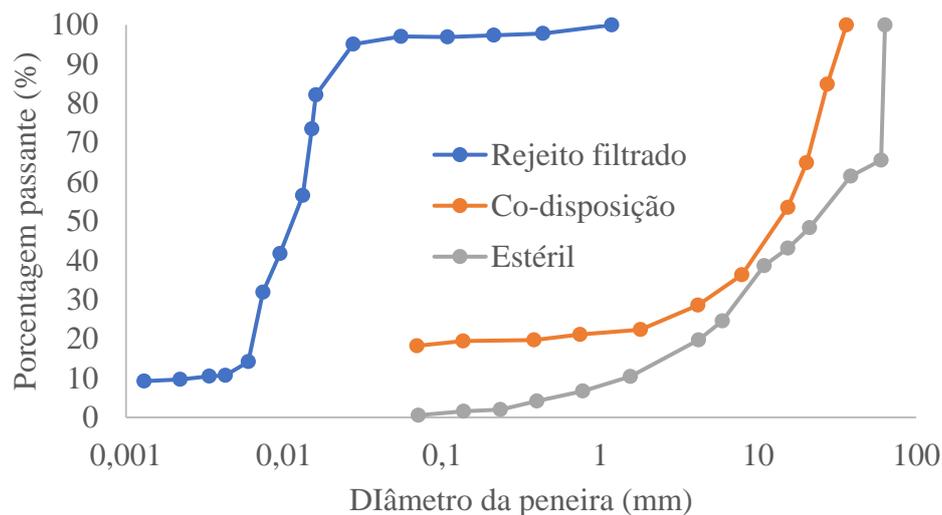


Figura 2.10 - Granulometria do rejeito filtrado, co-disposição e estéril (Gorakhki *et al.*, 2019).

Outras características foram observadas em relação a curva de retenção da co-disposição. Gorakhki *et al.* (2019) mostram que o aumento da densidade faz com que decresça o  $\theta_s$  e aumente o valor da entrada de ar. Neste mesmo estudo, Gorakhki *et al.* (2019) afirmam que esse comportamento depende da proporção da mistura entre rejeito filtrado e estéril, sendo as misturas com maiores quantidades de rejeitos assemelhando-se com rejeito puro.

Vários autores da literatura técnica citam suas experiências com o comportamento não saturado da co-disposição. Wickland *et al.* (2006) realizaram ensaios em uma coluna de 1 m de

diâmetro por 6 m de comprimento durante 2 anos e constataram que a sucção mátrica medida foi entre 15 e 57kPa em 125 dias, dependendo da razão da mistura. Gorakhki *et al.* (2019) citam que o valor de entrada de ar pode variar entre 10 até 100 kPa e teor de umidade volumétrico saturado entre 0,2 a 0,4  $\frac{m^3}{m^3}$ .

Em relação ao processo em uma mina, ele se assemelha com o do rejeito filtrado praticamente em todos os aspectos. As mudanças são em relação a adição do estéril, que se deve ser dosado corretamente. Wisdom *et al.* (2019) comentam um processo realizado com estéril de 40 cm de diâmetro e uma série de correias transportadora para gerar a mistura entre os materiais. Silva (2014) explica que a adequação do sistema de co-disposição deve ser elaborado e exigir um programa específico com gestão contínua do sistema. A Figura 2.11 mostra um esquema do processo de mistura realizada em uma mina que utiliza co-disposição. Deve-se salientar que esse *layout* pode ter alterações dependendo da mina onde é instalada.

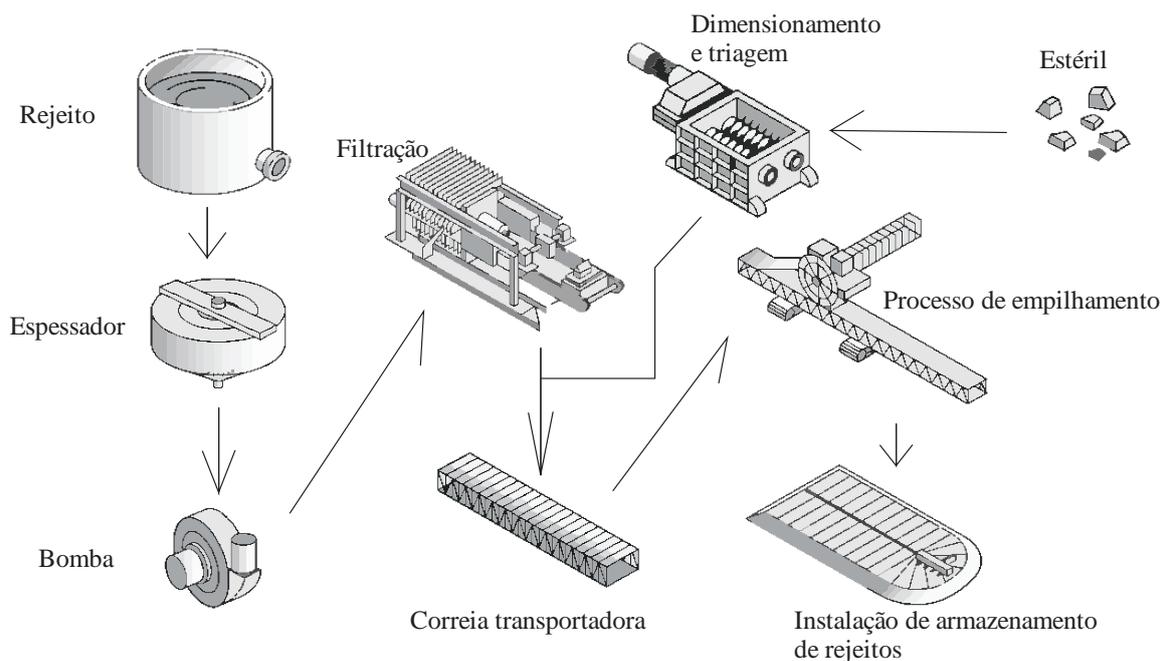


Figura 2.11 - Etapas dos processos necessárias em uma mina que utiliza a tecnologia da co-disposição (Goldcorp, 2019).

Quanto a dosagem da co-disposição, Wickland (2006) apresenta três métodos, sendo o método empírico, o método similar ao concreto e o método pela teoria do empacotamento de partículas para misturas binárias. Entre os três, se destaca o último, pois possui fundamentação em um trabalho científico de Furnas (1928). O estado que se procura é com mínima porosidade e máxima densidade seca, denominado de *just-filled*, possível quando todos os vazios do estéril estão preenchidos por rejeito. Segundo Wickland (2006), a teoria facilita o processo de dosagem por reduzir os testes empíricos e prover a confiança no processo de estimar a mistura. A Figura 2.12 mostra todos os possíveis estados de uma mistura. Mesmo na condição flutuante, o estéril pode aumentar a resistência da mistura e apresentar o comportamento dilatante. (Jehring & Bareither, 2016; Hamade & Bareither, 2018).

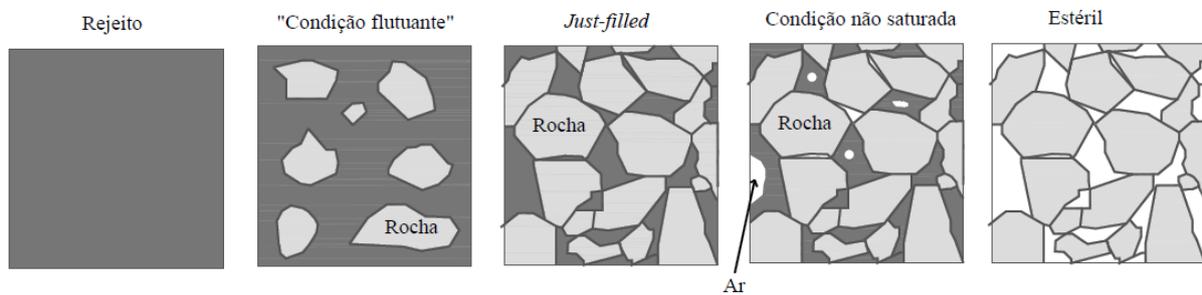


Figura 2.12 - Possíveis matriz da co-disposição de acordo com a dosagem.

Wickland *et al.* (2006) citam as cinco variáveis principais para o projeto de co-disposição, tais como massa específica dos sólidos e umidade inicial dos materiais e a mais importante, a razão da mistura. Essa razão de mistura é definida como a divisão entre o volume de estéril sobre o volume de rejeito, dada por:

$$\text{Razão da mistura} = \frac{V_{\text{estéril}}}{V_{\text{rejeito}}} \quad (2.1)$$

A explicação dessa importância é que a dosagem é a variável mais fácil de alterar quando se quer otimizar as propriedades de resistência e hidráulicas. A condição *just-filled* é atingida quando os vazios do estéril são preenchidos pelo rejeito e água, como mostra a seguinte relação:

$$V_{ar} = V_{rejeito} + V_{água} \quad (2.2)$$

A proposta de Wickland (2006) tem hipóteses neste processo de dosagem. São elas:

- As partículas de estéril, rejeito e água são incompressíveis.
- O rejeito é composto de partículas sólidas e água
- A mistura entre os materiais é homogênea.
- A mistura contém ar que pode não ser homogêneo
- A massa de ar é ignorada.

Uma maneira fácil de identificar o ponto ótimo é quando a massa específica seca atinge um máximo quando se muda a razão da mistura. Deve-se salientar que parâmetros de resistência não são aconselhados para definir o ponto ótimo da mistura (Williams e Kuganathan, 1992). As Figuras 2.13 e 2.14 mostram um exemplo em que um material atingiu o ponto ótimo (*just-filled*) na razão da mistura de 0,95.

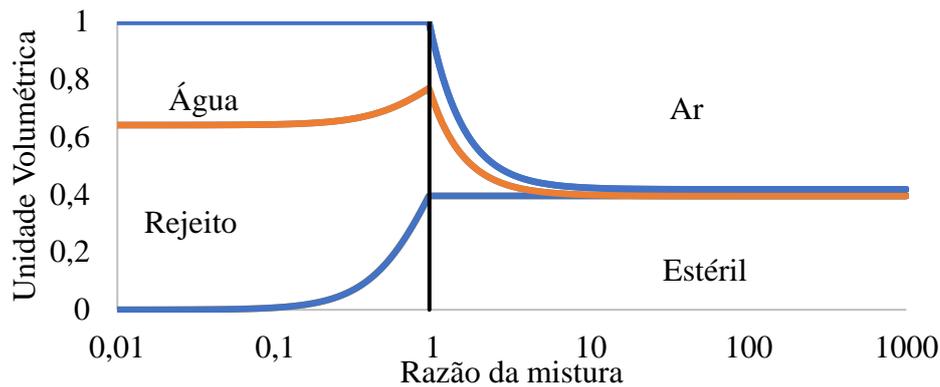


Figura 2.14 - Composição da parte volumétrica em função da razão da mistura.

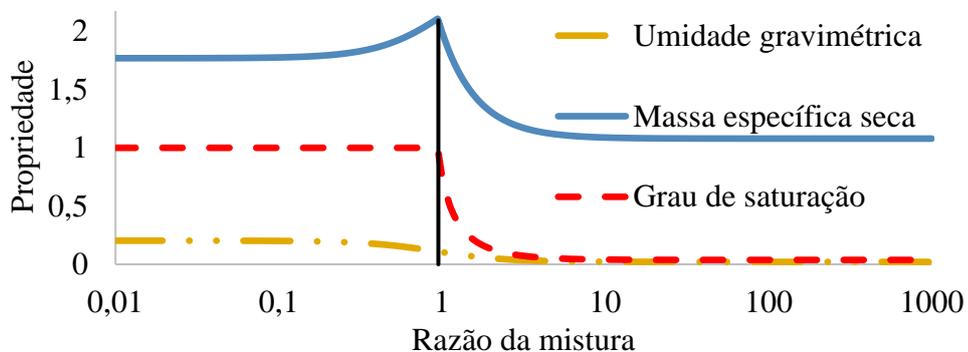


Figura 2.13 - Comportamento da umidade, massa específica seca e grau de saturação com a razão da mistura.

A variação das cinco variáveis pode definir diretrizes para o projeto e identificar o que fazer. A Tabela 2.4 mostra a tendência da razão da mistura e da densidade seca quando se aumenta as cinco variáveis de dimensionamento da dosagem. É possível notar que o aumento da umidade diminui a densidade seca máxima possível do material.

Tabela 2.4 – Tendência da razão da mistura e da densidade seca quando se aumenta os teores de umidade, índice de vazios ou densidades dos materiais.

	Razão da mistura $\left(\frac{V_{estéril}}{V_{rejeito}}\right)$	Densidade seca
Teor de umidade do rejeito ↑	↑	↓
Teor de umidade da rocha ↑	↑	↓
Índice de vazios do estéril ↑	↓	↓
Densidade da rocha ↑	↑	↑
Densidade do rejeito ↑	↓	↑

## 2.4 - Projetos de co-disposição encontrados na literatura

Alguns projetos utilizando co-disposição foram encontrados na literatura, como o projeto NICO e o projeto Penãsquito.

### 2.4.1- Projeto NICO

A empresa *Fortune Minerals Limited* está propondo construir o projeto NICO, que é uma mina de ouro, cobalto, bismuto e cobre na região de Tłıchų no Canadá. A mina irá produzir rejeito e estéril e foi proposto um sistema de co-disposição. A co-disposição que será de camadas alternadas de estéril e rejeito, ou seja, sem uma mistura homogênea dos materiais. Esta mina irá produzir uma taxa de 4.650 toneladas por dia durante 18 a 20 anos, dependendo das reservas.

O rejeito será floculado, mas deve ter comportamento líquido suficiente para ser transportado ao local de disposição por bombeamento. Como deve-se notar, esse projeto possui propriedades mecânicas diferentes, pois não considera a sucção. Além disso, não houve mistura ativa e nem compactação dos materiais. O estéril foi colocado em cima do rejeito por tratores. Devido a ser um rejeito espesso, as análises de estabilidade desconsideraram também a melhora

de resistência do estéril na mistura, utilizando as propriedades do rejeito. A empresa responsável pelo dimensionado é a *Golder Associates*. A Figura 2.15 mostra um esquema deste projeto.

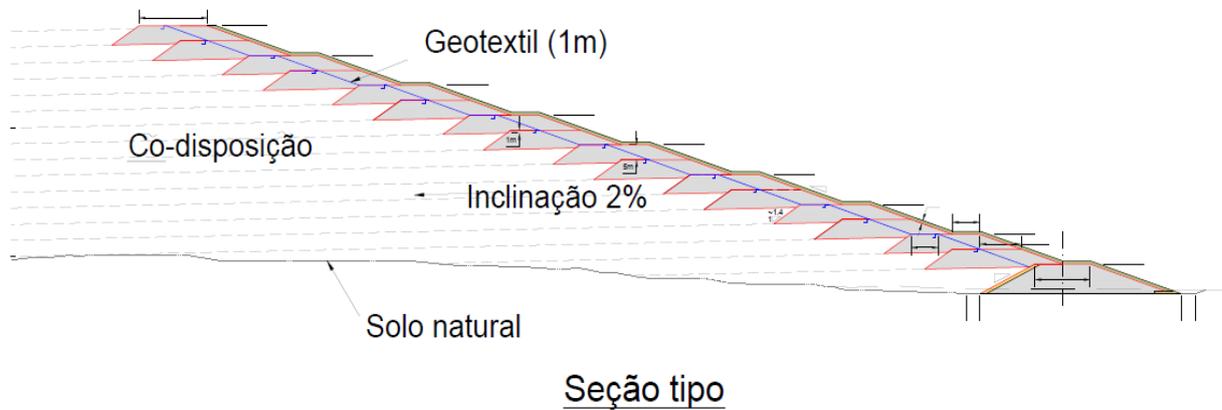


Figura 2.15 - Seção tipo de projeto NICO (Golder Associates, 2000).

#### 2.4.2- Projeto Penãsquito

A mina de Penãsquito foi a primeira do mundo a aplicar co-disposição (nome comercial é *Geowaste*) com produtividade de mais 100.000 t/dia de rejeito. O projeto da mina foi finalizado em 2018, onde desenvolveram processos para atender esse novo desafio, que é a alta geração de rejeito. A principal tecnologia desenvolvida foi a de Wisdom (2018) que aplicou um processo de misturar o rejeito e estéril durante o transporte por correias transportadoras, onde obteve um resultado satisfatório em campos experimentais. A Figura 2.16 mostra um dos testes realizados para comparar a drenagem ácida estéril a co-disposição. Todos os equipamentos foram desenvolvidos pela *FLSmidth*, desde da extração até o processo de alteamento. Nenhuma informação sobre a compactação foi encontrada na literatura técnica. A Figura 2.17 mostra o processo de alteamento realizado.



Figura 2.17 - Campos experimentais de co-disposição e estéril para comparar a drenagem ácida (Bareither, 2019).



Figura 2.16 – Processo de estaqueamento e compactação na mina de Penãsqito (Goldcorp, 2018).

## 2.5 - Comportamento da pilha

Há diversas incógnitas que existem durante a construção desta estrutura. Hawley & Cuning (2017) cita 22 fatores importantes para o dimensionamento de uma pilha de estéril. Nesta dissertação se prioriza quatro fatores: taxa de alteamento, altura da pilha, infiltração e geometria da pilha.

### **2.5.1- Taxa de alteamento**

A gestão da taxa de alteamento é necessária para possibilitar uma obra segura para todos os operários da mina. A consequência do alteamento é a compressão dos vazios e o aumento do grau de saturação de acordo com o incremento de carga, principalmente em camadas mais profundas da pilha. Essa saturação pode implicar em formação de excesso de poropressão positiva, resultando em riscos relacionados à estabilidade e a liquefação (Ulrich, 2019). Crystal *et al.* (2018) cita alteamento em torno de 0,2-0,3 m para evitar problemas de compactação, como a contração do material em tensões de campo, ou, susceptibilidade a liquefação. A AMEC (2012) apresenta um alteamento entre 0,3-0,5 m utilizada em uma obra, variando de acordo com zona estrutural e não estrutural da pilha.

Em relação a co-disposição, Bareither *et al.* (2018) realizou ensaios de taxa de deformação constante com uma velocidade de 3 mm/h e observou nenhuma poropressão até 1630 kPa. Burden *et al.* (2019) fez ensaios também no equipamento de taxa de deformação constante, simulando um alteamento de 460 kPa em 2 h. Foi observado que quanto mais estéril a mistura tiver, mais rápida será a dissipação de poropressão (Burden *et al.*, 2019). A experiência profissional relata que se pode alteamento de até 1 m/dia.

Crystal *et al.* (2018) defendem que a taxa de alteamento deve ser adequada a fim de garantir que as tensões mobilizadas sejam menores que a resistência do solo *in situ*. Além disso, devem ser realizados os processos de instrumentação e monitoramento para verificar a dissipação e mitigar o risco. Esta limitação pode ser gerenciada com o controle da infiltração, subsequente re-molhagem da camada superior ou instalação de um dreno basal (Crystal *et al.*, 2018).

### **2.5.2- Altura do alteamento**

Ulrich & Coffin (2013) afirmam que devem ser realizados ensaios *in situ*, principalmente quando as pilhas de rejeito são maiores de 100 m, com o objetivo de verificar se ocorre a quebra de partículas, pois isto acarretará na redução da permeabilidade, assim como no desenvolvimento da superfície freática. Crystal *et al.* (2018) defendem que o uso da mecânica dos solos críticos ajuda a entender as limitações de altura da pilha devido ao comportamento contráctil do material em elevadas tensões. Em relação à co-disposição, Burden *et al.* (2019) apresentam um estudo para determinar o comportamento deste material a altas tensões. Foi realizado um ensaio de cisalhamento 30x30 cm no rejeito filtrado, três razões de mistura diferentes e o estéril. A Figura 2.13 mostra esses ensaios. Como pode-se ver, o estéril

tem uma trajetória curvada, enquanto as misturas e rejeito apresentam-se retilíneas. Isto pode ser um indicativo que o rejeito aumenta os pontos de contato, reduzindo a quebra do estéril. Apesar de diminuir a razão de mistura para 0,4, a co-disposição apresentou valores melhores do que o rejeito filtrado.

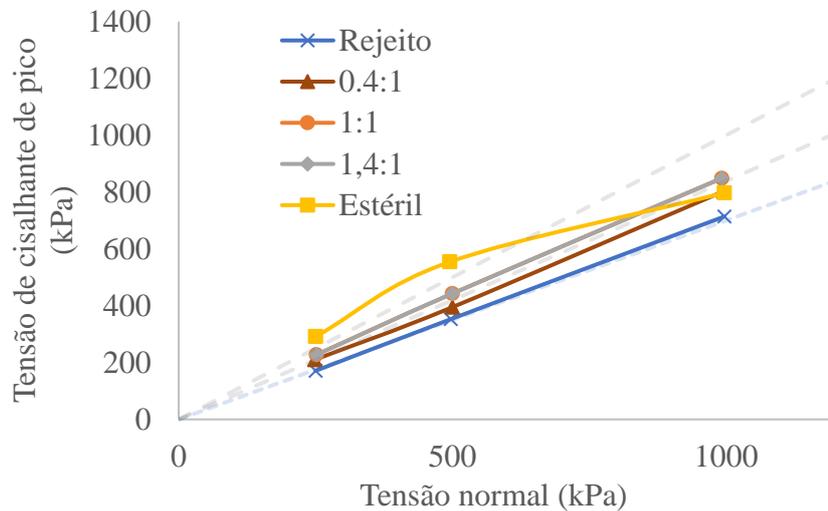


Figura 2.18 - Ensaio de cisalhamento direto realizado por Burden *et al.* (2019).

### 2.5.3- Infiltração

Um ponto principal no projeto de pilha para evitar a liquefação é manter a superfície freática longe das faces. Crystal *et al.* (2018) comentam que limitar o desenvolvimento de excesso de poropressão pode ser manejado limitando a infiltração na pilha ou a remolhagem de qualquer alteamento uma vez colocado.

As poropressões negativas mudam com o tempo e variam em diferentes pontos da pilha (Maknoon, 2016). A chuva em uma pilha reduz a sucção matricial, reduzindo a resistência do material. Normalmente, as análises de estabilidade tradicionais consideram o principal efeito da infiltração como aumento do lençol freático, contudo, existem relatos em que ocorram falhas sem esse aumento, isto é, apenas com o desenvolvimento da umidade superficial (Fredlund & Rahardjo, 1993). Em relação ao rejeito filtrado, Crystal *et al.* (2018) apontam que o rejeito é resistente a saturação e a infiltração devido à permeabilidade baixa.

### 2.5.4- Geometria

A geometria da pilha é uma variável também essencial, determinada pela topografia do local de disposição (Caldwell & Colleen, 2015). Como a estrutura em pilha de rejeito filtrado é

recente, a maior parte da literatura é de pilha de estéril. De acordo com Caldwell & Colleen, 2015 e Hawley & Cuning (2017), existem três tipos de geometrias de pilhas distintas, sendo elas:

- As pilhas em vale preenchem um local de um ponto da encosta até outro. Elas têm condições de lidar pelo fluxo de água descendente. Dependendo da qualidade da água captada pelos drenos, pode ser tratada ou despejada. As superfícies dessas pilhas são inclinadas para evitar que a água represada em cima dessas estruturas ou canais para desvio dessas águas na superfície. Esses vales são comuns nas minas de carvão no sudeste do Estados Unidos. A Figura 2.19a apresenta essa configuração. As pilhas transversais a um vale são uma variação das pilhas em vale, onde a estrutura abrange o vale, mas não o preenche. Geralmente, estradas, vias de acesso a veículos ou trilhos ferroviários passam em cima desse tipo de estrutura. A principal desvantagem desse tipo de estrutura é de requerer uma drenagem eficiente para evitar o acúmulo de água a montante. A Figura 2.19b mostra a representação gráfica desse tipo de estrutura.
- As pilhas em encostas são colocadas contra as encostas, sendo o processo de alteamento começando no fundo do vale. Essas pilhas envolvem maiores quantidade de canais de desvios, dependendo da altura da estrutura, pois o formato desse tipo de estrutura favorece o maior acúmulo de água nesses canais, sendo apresentado na Figura 2.19c. As pilhas de crista é uma variação das pilhas de encostas no qual os declives da pilha são de acordo pelos ambos lados do cume. A Figura 2.19d mostra um exemplo desse tipo de configuração.
- O formato em pirâmide tem uma base quase quadrada ou um dos lados alongado. A base da pirâmide a ser construída deve ter, preferencialmente, plano ou ligeiramente inclinado. As vantagens são que esse formato recebe somente precipitação diretamente sobre essa estrutura, assim diminuindo a quantidade de água a ser tratada. As desvantagens são a menor quantidade de rejeito por área impactada em relação as duas outras soluções. A Figura 2.19e mostra uma configuração de pirâmide possível, também chamada no Brasil de “bolo de noiva”.

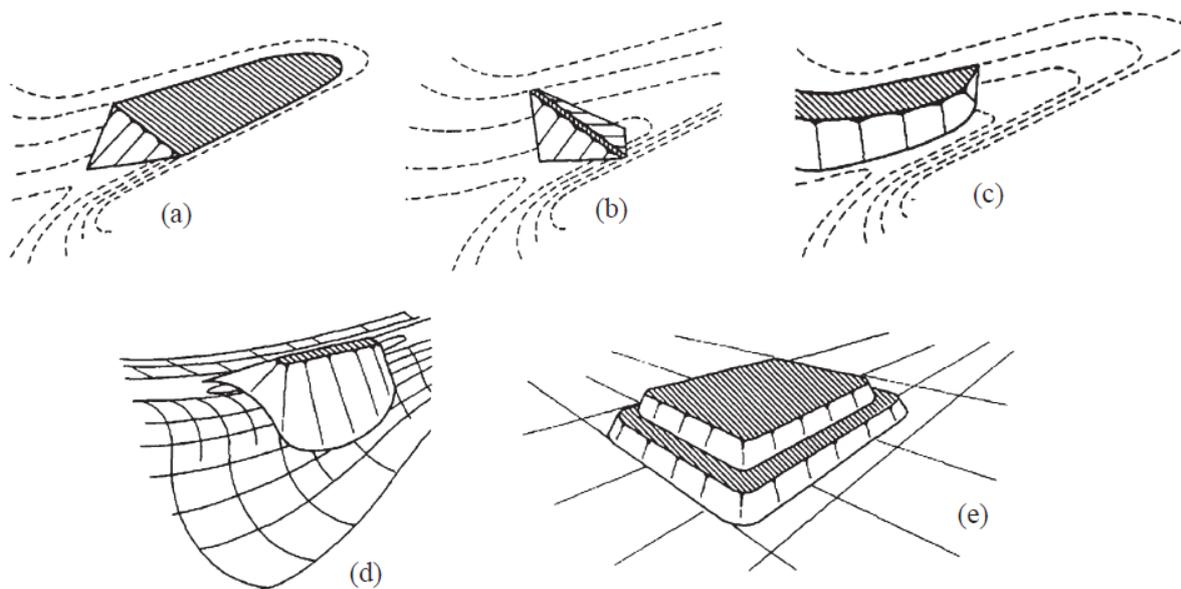


Figura 2.19 - Formatos de pilhas mais comuns: pilha em vale (a), pilha transversal a um vale (b), pilha de encosta (c), pilha de crista (d) pilha “bolo de noiva” (e) - Wahler (1979, *apud*. Hawley & Cuning, 2017).

### 2.5.5- Diferenças entre rejeito filtrado e co-disposição

Comparando os critérios de dimensionamento semi-quantitativo de Hawley & Cuning (2017), existem algumas diferenças entre as pilhas de rejeito filtrado e co-disposição. A primeira é em relação ao potencial de ruptura não drenada. O rejeito filtrado possui alta possibilidade de liquefação comparado com um material onde tem estéril na sua estrutura. Outro fator importante é a distribuição granulométrica. A co-disposição é um material denso, bem graduado enquanto o rejeito filtrado, normalmente, não tem essas características.

## 2.6 - Simulação numérica

O rejeito filtrado e a co-disposição são materiais que apresentação comportamento não saturado e baixa condutividade hidráulica. Dito isto, exige-se uma avaliação acoplada entre comportamento hidráulico e mecânico, pois necessita avaliar o adensamento em conjunto com o aumento de poropressão devido a mudança de volume e acréscimo de carga.

### 2.6.1- Análise acoplada em solos não saturados

Biot (1941) propôs uma análise transiente para problemas não saturados com duas relações constitutiva para explicar a deformações teoria do adensamento, sendo uma em relação

a estrutura dos solos e outra relação para a água. É notado que o modelo apresenta bolhas oclusas de ar, contudo, sem movimentação. Vários autores da literatura técnica publicaram melhorias como a equação da fase do ar, sendo seco e rígido (Blight, 1961 *apud.* Fredlund *et al.*, 2012), a incorporação da mudança dos índices de vazios e do grau de saturação na formulação (Scott, 1963), a modificação do coeficiente de consolidação na equação de Terzaghi para problemas não saturados (Larmour, 1966; Hill, 1967; Olson em 1986, citado por Fredlund, H. & Rahardjo, 1993). A análise não acoplada de adensamento unidirecional com semelhanças com a equação de Terzaghi foi a de Fredlund e Hasan (1979).

Uma análise não acoplada tem a solução de uma equação de derivada parcial resolvida, independente da maneira e da informação de outra equação de derivada parcial. O sistema acoplado ganhou notoriedade quando Mandel em 1957, citado por Fredlund *et al.* (2012) e Cryer em 1963, citado por Fredlund *et al.* (2012) notaram que o excesso de poropressão pode ser maior que a tensão aplicada. Fredlund *et al.* (2012) apresentam as hipóteses, que são:

- Material isotrópico;
- Reversibilidade da relação tensão-deformação;
- Linearidade na relação tensão deformação;
- Deformações pequenas;
- Água incompressível;
- Os coeficientes de permeabilidade da fase da água e do ar são funções das propriedades de massa e volume do solo, durante o processo de consolidação; e
- Os efeitos difusivos do ar na água, dissolução na fase aquosa e movimentação do vapor d'água são ignorados.

A análise acoplada tem esse nome devido a realizar tensão deformação e dissipação da poropressão simultaneamente. Nesta simulação, três equações são criadas em cada nó do elemento finito: duas de equilíbrio (deslocamentos) e a terceira de continuidade do fluido. A equação abaixo exhibe uma visão simples da equação da análise acoplada utilizadas pelo SIGMA/W:

$$\begin{bmatrix} [K]_s & [L] \\ [L]^t & [K]_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ \Delta u \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F' \\ Q \end{Bmatrix} \quad (2.3)$$

## 2.6.2- Modelos constitutivos

O modelo linear elástico é o modelo constitutivo mais simples do SIGMA/W em que mostra as tensões são diretamente proporcionais as deformações, onde se utiliza somente do módulo de Young (E) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Wickland (2006) utilizou esse modelo na co-disposição e comparou com dados reais e obteve alguma similaridade. Brinkgreve *et al.* (2013) comentam que o modelo pode ser utilizado para estruturas massivas sobre rochas. Um dos principais problemas é que o material desenvolve uma resistência infinita, ou seja, não contempla envoltória de resistência dos materiais.

O Cam-clay é um modelo elastoplástico desenvolvido em Cambrige, conseguindo simular três comportamentos diferentes do solo: resistência, compressão e dilatância durante o cisalhamento (McDonald & Lane, 2010). Um modelo elastoplástico tem como componentes: propriedades elásticas, superfície de plastificação, potencial plástico e regra de enrijecimento. Este modelo tem deformações elasto-plásticas com base na teoria dos estados críticos e na premissa de relações lineares entre o logaritmo da deformação média com as deformações plástica e elástica. Essas relações são descritas nas equações abaixo:

$$v = N - \lambda \cdot \ln(-p) \quad (2.4)$$

$$v = v_s - \kappa \cdot \ln(-p) \quad (2.5)$$

As variáveis  $\lambda$  e  $\kappa$  podem ser correlacionadas por propriedades obtidas com ensaios odométricos que são o coeficiente de compressão primário e coeficiente de compressão secundário. Essas equações são apresentadas a seguir:

$$\lambda = \frac{C_c}{2,303} \quad (2.6)$$

$$\kappa = \frac{C_\alpha}{2,303} \quad (2.7)$$

A superfície de plastificação tem o intuito de limitar as deformações plásticas das deformações elásticas. A equação que determina esse espaço tem formato de uma elipse, dada por:

$$F = \frac{q}{p'} + M^2 P' - 2M^2 p'_x \quad (2.8)$$

Outra relação que define a linha dos estados críticos que dá a relação entre  $p'$  e  $q$  no estado de ruptura está apresentada a seguir:

$$q = M \cdot p' \quad (2.9)$$

Por fim, o  $M$  determina o formato da superfície de plastificação (Brinkgreve *et al*, 2013). Caso o problema seja compressão triaxial, o  $M$  pode ser definidos de acordo com a equação abaixo:

$$M = \frac{6 \cdot \text{sen } \phi'}{3 - \text{sen } \phi'} \quad (2.10)$$

As equações 2.4, 2.5 e 2.9 são apresentadas graficamente na Figura 2.20, apresentando as cinco variáveis do solo necessárias para realizar o modelo constitutivo.

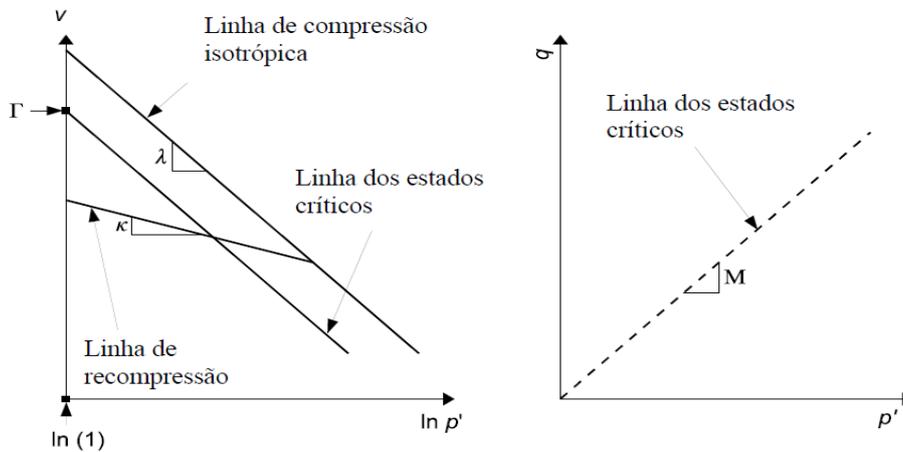


Figura 2.20 - Linha de estados críticos, linha de compressão isotrópica e as variáveis do modelo Cam-Clay (Geoslope, 2012).

### 2.6.3- Método do equilíbrio limite

A análise de estabilidades de obras de terra é a mais antiga e a mais utilizada análise da geotecnia, introduzida no começo do século 20 (Geoslope, 2012). Definido as propriedades geométricas e do solo, são realizados cálculos para analisar se os esforços de resistência são

maiores do que os que fazem o talude romper. As limitações do método são que baseados em uma análise estática, onde se supõe tensões uniformemente distribuídas.

Os cálculos consistem em calcular um fator de segurança (FS) definido como a razão entre a somatória dos esforços atuantes sobre a somatória dos resistentes. Em casos onde não há coesão, nem poropressão, a relação pode ser descrita por:

$$FS = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha'} \quad (2.11)$$

Sobre os esforços resistentes, o SLOPE/W utiliza a formulação de resistência não saturada. A sucção no solo provoca um efeito de aumento na resistência no solo. Neste sentido, esse efeito faz com que aja poropressão negativa, aumentando a tensão efetiva, conseqüentemente, aumentando a resistência. Vanapalli *et al.* (1996) implementaram parâmetros da curva característica do solo para melhor quantificar a resistência devido a sucção. Zhang *et al.* (2014) citaram que quando os solos com entrada de ar entre 20 a 100 kPa, utilizar  $\phi^b=15^\circ$  pode ser estimativa razoável dos efeitos do solo não saturado. A resistência não saturada pode ser escrita como:

$$s = c' + \sigma_n \tan \phi' + (u_a - u_w) \left[ \left( \frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi^b \right] \quad (2.12)$$

A superfície crítica de uma análise é quando apresentar o menor FS das potenciais superfície de ruptura analisadas. Para se ter estabilidade, esse valor tem que ser maior do que 1. Sobre as rupturas em cavas/pilhas, Hustruld *et al.* (2001) comentam que movimentos de massa na ordem de 4 m/ano não representam falha. Hustruld *et al.* (2001) expõem que se não houver nenhuma ruptura de talude em cavas ou pilhas, o projeto está superdimensionado. KCB (2017) comentam que as conseqüências de ruptura de uma pilha de rejeito filtrado podem atingir uma área em torno de dez vezes a altura dessa estrutura.

Existem diversos métodos de análises de estabilidade, dos mais simples (Fellenius), métodos avançados (Jambu e Bishop), até métodos interativos, onde ganharam notoriedade devido ao auxílio do computador (Morgenstern-Price e Spencer). Um dos métodos mais rigorosos e utilizados é o de Morgenstern-Price.

O método de Morgenstern-Price é similar ao Spencer, contudo permite especificar as funções de força entre lamelas. Morgenstern e Price (1965) desenvolveram um procedimento

em que relacionam as forças de cisalhamento com as forças normais, satisfazendo o equilíbrio entre elas por meio de um processo iterativo. Com isso é possível solucionar o sistema e achar todas as variáveis. As forças atuantes no método Morgenstern-Price estão especificadas na Figura 2.21. A força entre lamelas deste método é dada por:

$$X = E_c \lambda' f(x) \quad (2.13)$$

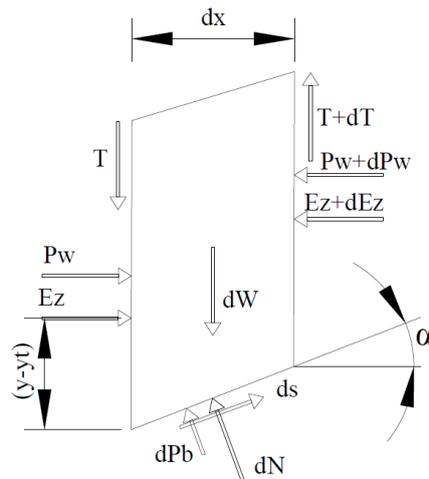


Figura 2.21 - Variáveis consideradas no método Morgenstern-Price.

Existem diversos formatos de ruptura na literatura, contudo, somente alguns podem ser reproduzidos em uma simulação numérica. Geoslope (2012) relatam diversos tipos de ruptura como as rupturas circulares, planares, combinadas e em bloco.

A ruptura circular se caracteriza com o momento independente das forças de cisalhamento interfaces, indicado por um momento constante no gráfico FS vs  $\lambda$ . O equilíbrio de momento não é influenciado pelas forças de cisalhamento pois a massa deslizante se comporta como corpo livre podendo girar sem qualquer deslizamento entre as fatias. A Figura 2.22 mostra um exemplo deste comportamento.

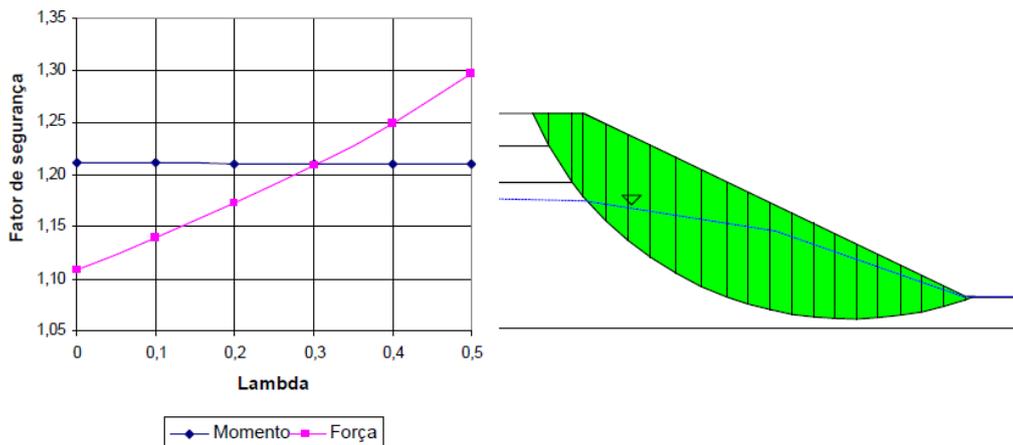


Figura 2.22 - Cunha de ruptura circular (Geoslope, 2012).

Ao contrário do observado na ruptura circular, o equilíbrio de forças é independente das forças de cisalhamento entre lamelas. A massa de solo observada na Figura 2.23 pode se movimentar sem qualquer deslizamento entre fatias.

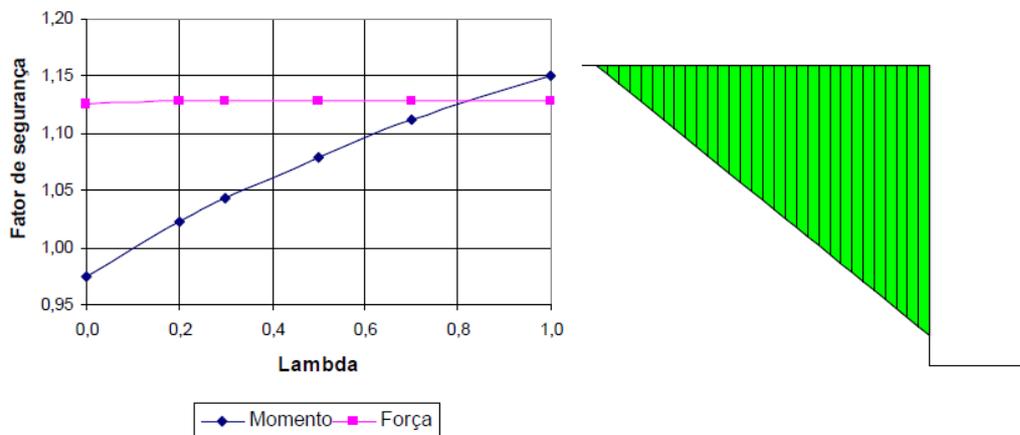


Figura 2.23 - Cunha de ruptura plana (Geoslope, 2012).

#### 2.6.4- Tipos de ruptura

Saber qual ensaio utilizar para cada situação é importante para definir as premissas de projeto utilizados durante o dimensionamento. Vários autores citam modos de avaliar o rejeito. Contudo, deve-se ter em consideração a falta de análises de materiais com sucção na literatura

técnica sobre rejeito filtrado e co-disposição (materiais com sucção). Brown & Gillani (2016) mostram três tipos de ruptura que podem acontecer em uma barragem de rejeito.

- Ruptura não consolidada e não drenada: Este modo de falha é tipicamente associado com carregamentos aplicados durante a construção em curto tempo, onde assume que o excesso de poropressão desenvolvida durante a construção é igual a tensão imposta, sem ganho de tensão efetiva e resistência ao cisalhamento. O comportamento desse tipo de ruptura é mais comum para materiais saturados.
- Ruptura consolidada e não drenada: Este tipo de falha é aplicável para carregamentos rápidos e de longa duração. Materiais contrácteis e saturados geram excesso de poropressão positiva, diminuindo a tensão efetiva durante o cisalhamento, fenômeno conhecido como liquefação estática. Deve-se notar que a compactação dos materiais em campo serve para tentar evitar esse tipo de comportamento. Contudo, quando a pilha atinge determinadas alturas, esse material pode se comportar como contráctil.
- Ruptura drenada: A principal premissa para esse tipo de falha é quando o carregamento acontece em pequenas velocidades ou os materiais são considerados dilatantes, qual não existe desenvolvimento de excesso de poropressão positiva durante o cisalhamento. Brown & Gillani (2016) citam que nos locais de disposição de rejeitos geralmente envolvem materiais não compactados e/ou argilas normalmente adensadas na fundação, que implica em comportamento contráctil.

#### **2.6.5- Exemplos numéricos encontrados na literatura técnica**

Ademais, a literatura técnica aborda simulações numéricas em pilhas de estéril, rejeito filtrado e co-disposição. Os trabalhos encontrados são:

- Wickland (2006) realizou uma simulação numérica de uma coluna de co-disposição utilizando o modelo constitutivo elástico linear. O autor obteve uma boa correlação do modelo com os dados coletados.
- Brett *et al.* (2011) citam uma obra de co-disposição em uma mina no clima árido. Eles fazem uma análise numérica para determinar se a co-disposição permanecerá saturada depois de um período de estiagem.
- Jaouhar *et al.* (2011) utilizaram o SIGMA/W para avaliar a estabilidade com intrusões de estéril. Fez-se uma análise estática, dinâmica e *post-shaking*. Os gráficos que os autores apresentaram foi a poropressão, deslocamentos horizontais antes e depois das intrusões.
- Ferdosi *et al.* (2015) fizeram a análise parecida com a de Jaouhar *et al.* (2011), contudo utilizando o FLAC. O autor avalia as distâncias entre intrusões na variação de poropressão.

- Botha (2016) fez uma análise de uma mina de carvão aplicando um modelo numérico. A avaliação tem intuito de avaliar o impacto hidrogeológico entre o método convencional e o método de co-disposição.
- Wu (2019) apresentou uma simulação numérica de uma mistura entre rejeito filtrado e cimento em uma cava.

### 3 - METODOLOGIA

A metodologia proposta neste trabalho está apresentada em formato de fluxograma na Figura 3.1, onde se dividiu em três grandes etapas: calibração dos materiais, simulação numérica e alteração na geometria. Os materiais utilizados foram dois tipos de rejeito filtrado, onde se mudou a umidade, e a co-disposição. Deve-se salientar que as análises de sensibilidade se utilizaram modelo geométrico 1D, enquanto as demais análises foram modelo geométrico 2D.

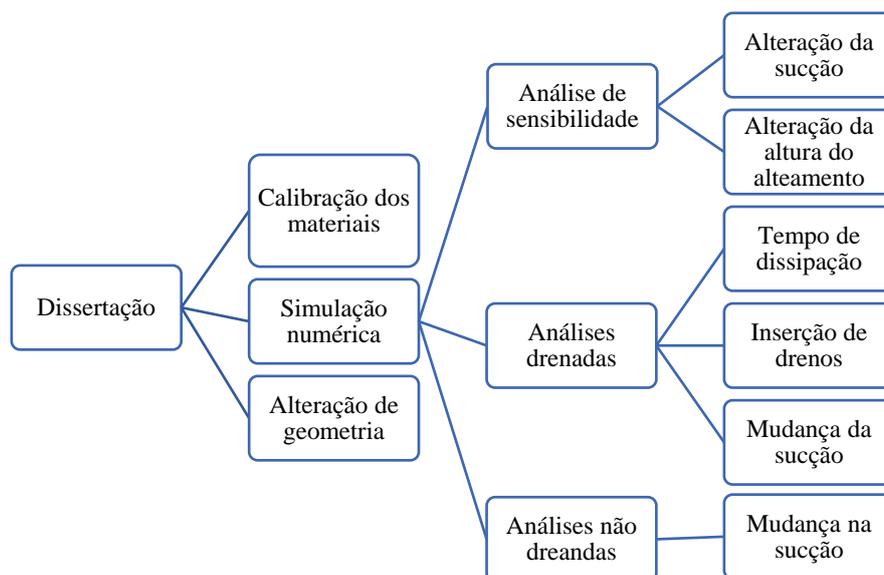


Figura 3.1 - Fluxograma da metodologia desse trabalho.

#### 3.1 - Material

Os dados do rejeito filtrado com umidade ótima (14%), rejeito filtrado pós filtragem rápida (20%) e co-disposição utilizados nas análises dessa dissertação foram retirados de ensaios triaxiais, ensaios odométrico e ensaios de compactação de Bareither *et al.* (2018), Borja (2019) e Gorakhki *et al.* (2019). Um resumo desses dados está na Tabela 3.1, onde mostra os parâmetros hidráulicos, mecânicos utilizados, umidade e peso específicos dos materiais.

Sobre esses dados, notou-se que o teor de umidade do rejeito filtrado é 3% maior do que encontrado na literatura, pois esse material passou por um processo de filtragem rápida. O alcance do coeficiente de compressibilidade primária ( $C_c$ ) está dentro dos intervalos definidos por Wickland *et al.* (2006). Considerou também um grau de compactação do material de 100%

para os dois materiais. A razão de mistura utilizada foi de 1,2. A Figura 3.2 mostra o aspecto visual do rejeito filtrado e co-disposição, respectivamente.

Tabela 3.1. Propriedades do rejeito filtrado e co-disposição utilizados.

	Rejeito filtrado (20% - 14%)	Co-disposição
Cc	0,2 - 0,27	0,06 - 0,11
e	0,47	0,34
k (cm/s)	$10^{-7}$	$10^{-7}$
$\phi'$ (°)	33	40
$\phi$ (°)	18	22
Teor de umidade inicial (%)	20,3	2,2
Teor de umidade de compactação (%)	14,2	6,0
Massa específica dos sólidos (g/cm <sup>3</sup> )	2,76	2,74
Massa específica seca máxima (g/cm <sup>3</sup> )	1,71/1,82	2,09
Peso específico (kN/m <sup>3</sup> )	19,5	22,2

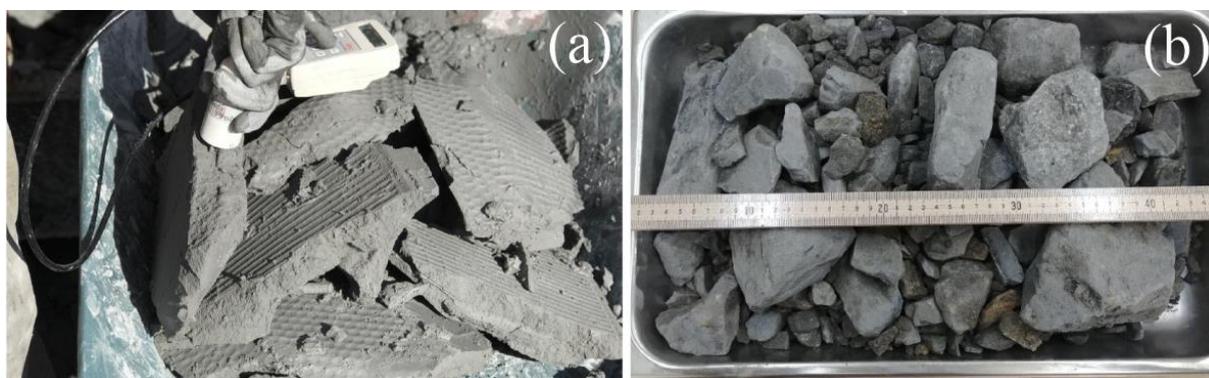


Figura 3.2 – Aspectos visuais dos materiais utilizados nessa pesquisa: a) Rejeito filtrado; b) co-disposição (Gorakhti *et al.* 2018).

A Figura 3.3 mostra o rejeito em diferentes umidades e a mistura entre estéril e o rejeito em um gráfico de grau de saturação versus massa específica seca máxima. Com isso estimou-se a sucção com base da curva de retenção (Fig. 3.4) apresentada por Gorakhki *et al.* (2019). As sucções encontradas no rejeito filtrado com umidade de 14 %, rejeito filtrado com umidade de 20% e a co-disposição foram de 10, 28 e 56 kPa, respectivamente. Para ter uma abordagem mais conservadora, se utilizou na co-disposição a sucção do rejeito (20%) na mistura. Em

relação à fundação, ela foi modelada de modo a não desenvolver poropressão e ser considerada indeslocável.

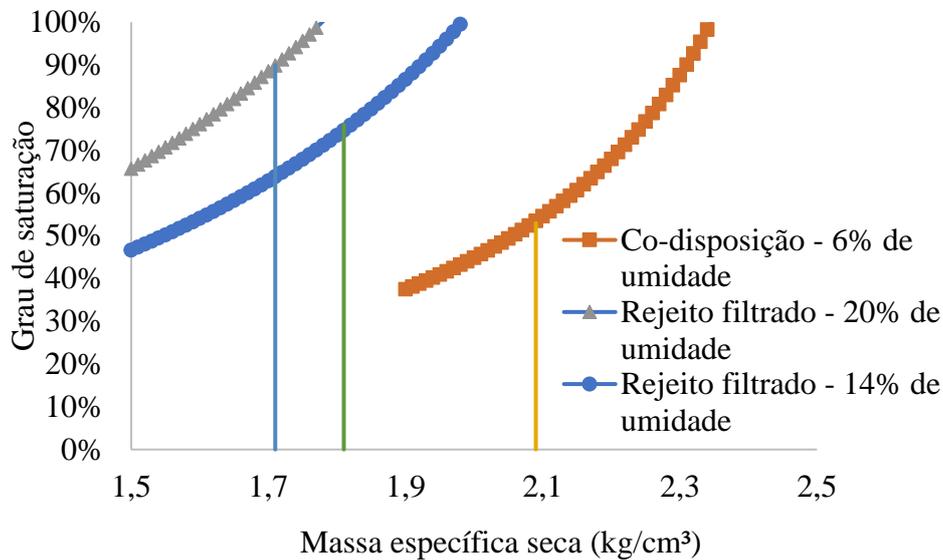


Figura 3.3 – Variação do grau de saturação com a massa específica para os materiais estudados.

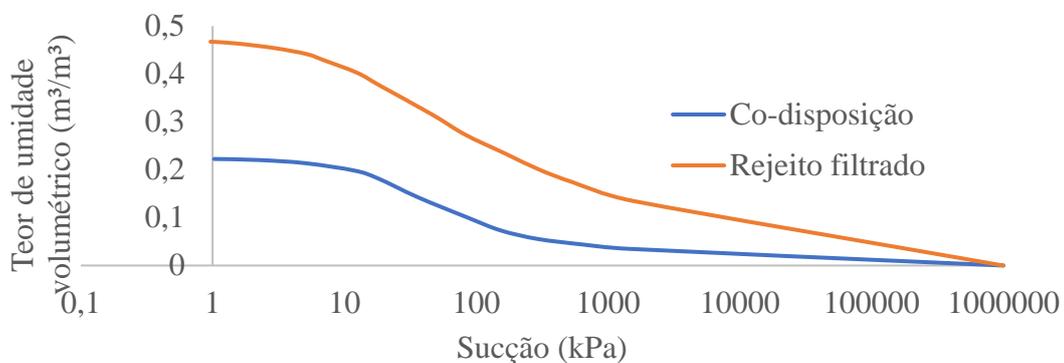


Figura 3.4 - Curva de retenção dos materiais estudados.

### 3.2 - Calibração dos modelos

Para a calibração dos modelos, foi utilizada o software Plaxis com o auxílio do subprograma *SoilTest* para simular as trajetórias do modelo Cam-Clay modificado (CCM) e Linear-Elastico. Em relação ao CCM, variou-se os parâmetros do modelo ( $\lambda$  e  $k$ ) entre os limites dessas variáveis, sendo a média  $\bar{x}$  três vezes o desvio padrão. Devido à ausência de uma quantidade significativa de ensaios odométricos, utilizou-se um coeficiente de variação de 37%

para o índice de compressão primária ( $C_c$ ), como relatado por Harr (1984). Em relação ao coeficiente de recompressão, teve seu valor estimado a partir do coeficiente de adensamento secundário, sendo de 5% do  $C_c$  (Mesri & Castro, 1987). O ajuste é pausado quando a tensão desviadora e a poropressão se aproximam do ensaio real realizado.

Por causa de problemas de convergência do modelo Cam-Clay modificado para tensões iniciais, foi utilizado o modelo linear-elástico para cada fase de alteamento de uma camada. O valor dos módulos de Young e o coeficientes de Poisson foi definida tendo os intervalos de 100 a 10.000 kPa, 0,1 a 0,3, respectivamente. Devido à falta de valores de deformação no campo, optou-se de considerar todo o alcance do ensaio (deformação axial até 20%).

### 3.3 - Simulação numérica

As análises numéricas de tensão-deformação-adensamento do rejeito filtrado e co-disposição foram modeladas utilizando o método dos elementos finitos (MEF) por meio do programa *Geostudio*. Isso foi possível devido ao acoplamento dos módulos SEEP/W, SIGMA/W e SLOPE/W em que se permite simular o adensamento do material durante o alteamento de uma estrutura, utilizando a teoria de Biot (1941) com formulações modificadas da mecânica dos solos não saturados, além de analisar os métodos de equilíbrio-limite. Para isso, foi necessário definir um modelo geométrico, condições de contorno para avaliar a estabilidade dos materiais estudados.

#### 3.3.1- Modelo geométrico

Esse trabalho teve um modelo 1D para avaliar a sensibilidade da sucção e da altura de alteamento na pilha. Esse modelo unidirecional teve alteamentos constantes de 10 cm/dia até atingir 300 m de altura. Além disto, também foi realizado um modelo 2D que teve dimensões de uma pilha com 300 m de altura com inclinação de 3H:1V e base de 1820 m nas condições drenadas. A Figura 3.5 mostra a configuração da pilha. A inclinação da pilha variou para 3,5H:1V e 2120 m de base quando se teve as análises não drenadas.

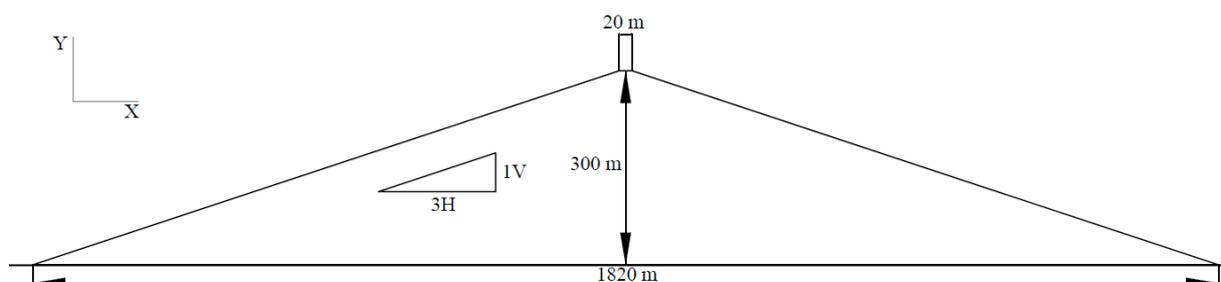


Figura 3.5 – Geometria 2D da pilha considerada para análise drenada.

As quantidades de rejeito filtrado e co-disposição foram as mesmas para ter a possibilidade de comparar as duas pilhas, para ter taxas de alteamento das duas pilhas iguais. As taxas de alteamento para a pilha com condições drenada (3H:1V) e não drenada (3.5H:1V) são mostradas na Figura 3.6.

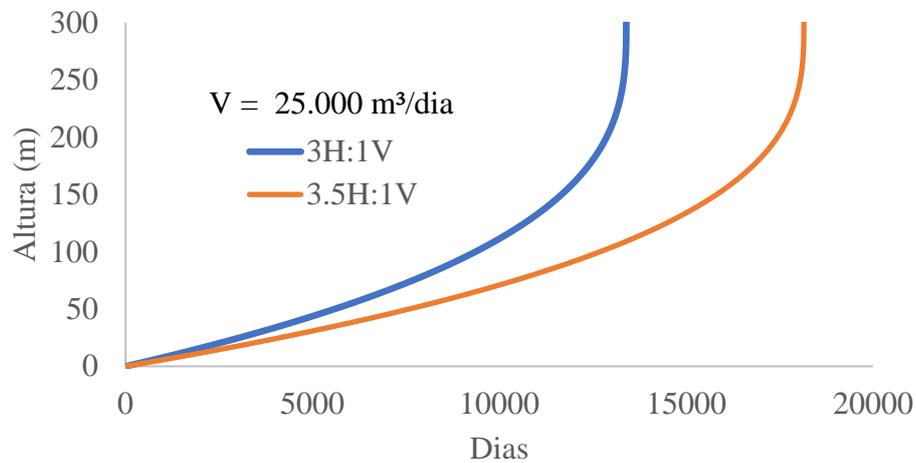


Figura 3.6 - Taxas de alteamento para as pilhas de rejeito filtrado e co-disposição para duas inclinações diferentes.

### 3.3.2- Condições de contorno, carregamentos e geração de malha.

As condições de contorno foram definidas como restrição de deslocamento no X/Y (horizontal e vertical) na parte inferior da fundação e no X nas laterais, considerando o eixo de coordenadas apresentado na Figura 3.5 Uma condição de contorno superior em cada alteamento

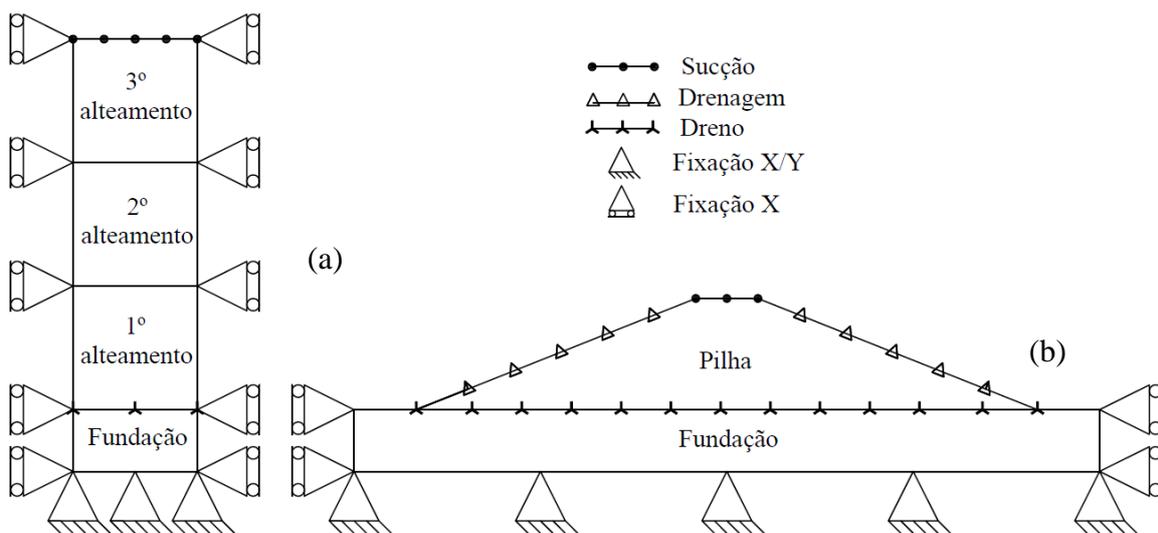


Figura 3.7 - Condições de contorno aplicadas: a) Modelo 1D; b) Modelo 2D.

foi determinada para definir a sucção do material. Foi considerado um dreno basal nas pilhas. Somente no modelo 2D aplicou-se uma condição de drenagem nos espaldares com uma verificação de possibilidade de surgência. A Figura 3.7 mostra a configuração das condições de contorno dos modelos 1D e 2D, respectivamente.

Sobre os carregamentos, foi analisada somente o peso próprio do material e distribuídos de maneira uniforme na camada. Devido a limitação computacional, as etapas de carregamento da pilha foram divididas em 60 alteamentos uniformes de 5 m com diferentes durações de tempo para o alteamento. A Figura 3.8 mostra a taxa de alteamento real e taxa de alteamento estimada (média) de 5 dias. O processo de alteamento foi de forma alternada entre os modelos linear-elástico e Cam-Clay modificado. Primeiramente, a camada que está sendo alteada é imposta o modelo linear elástico. Quando foi para o próximo alteamento, a camada finalizada da etapa anterior com linear elástico é substituída pelo modelo Cam-Clay modificado e a novo alteamento será colocada o modelo linear elástico.

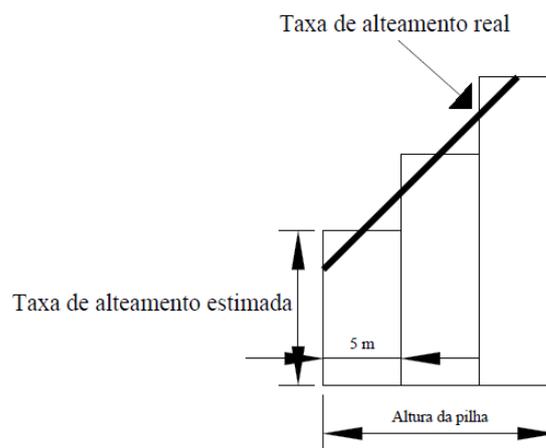


Figura 3.8 – Diferenças entre o alteamento real e o alteamento estimado médio considerado.

### 3.3.3- Análise de sensibilidade

As inúmeras variáveis presentes no processo de construção de pilha fazem com que a taxa de alteamento seja um valor complexo. Por isso, foi realizada uma análise de sensibilidade, em que se alterou duas dessas variáveis: a sucção do material depositado e altura do alteamento em uma pilha. Em relação a variação de sucção, o alteamento se deu com espessura de

alteamento de 10 cm/dia até 300 m, enquanto a avaliação da altura de alteamento se deu em condições saturadas.

### 3.3.4- Análises de estabilidade

A partir dos parâmetros obtidos na calibração, as análises de estabilidade realizadas para avaliar os fatores de segurança durante o processo de alteamento. Este dado é essencial para definir a segurança e cronograma da obra. As avaliações dos fatores de segurança se davam da seguinte forma: a cada 5 m, realizou-se análises de estabilidade pelo método de Morgenstern-Price para definir fatores de segurança (FS) da pilha. Se em uma análise apareceu FS menores ou igual a 1,3, é definida a taxa de alteamento limite, como sendo a taxa em que ocorreu a primeira pausa no processo de alteamento.

Tendo em vista a taxa de alteamento variada por causa da estrutura, poderia haver uma mudança entre uma condição drenada para não drenada. Assim, as análises de estabilidade foram utilizadas nessas duas condições. As condições drenadas foram consideradas em uma pilha com inclinação dos taludes de 3H:1V, como dito. Nenhum acréscimo na resistência devido a sucção foi considerado, devido a obter fatores de segurança não realísticos. Já na condição não drenada, foi computado o acréscimo da resistência devido a sucção, sendo representado como  $\phi^b = 15^\circ$ , além de uma mudança na geometria para 3,5H:1V. Isto se deve a obter valores igual ou inferiores a 1,3 mesmo para taxas de alteamentos baixas (3 cm/dia) e poropressão negativa.

Além disso, foram determinadas formas de dissipação de poropressão para aumentar a vida útil da pilha, por exemplo, a inclusão de drenos e tempo de pausa no processo de alteamento, mesmo que isto acarrete custos adicionais à mina. Os tempos de dissipação foram

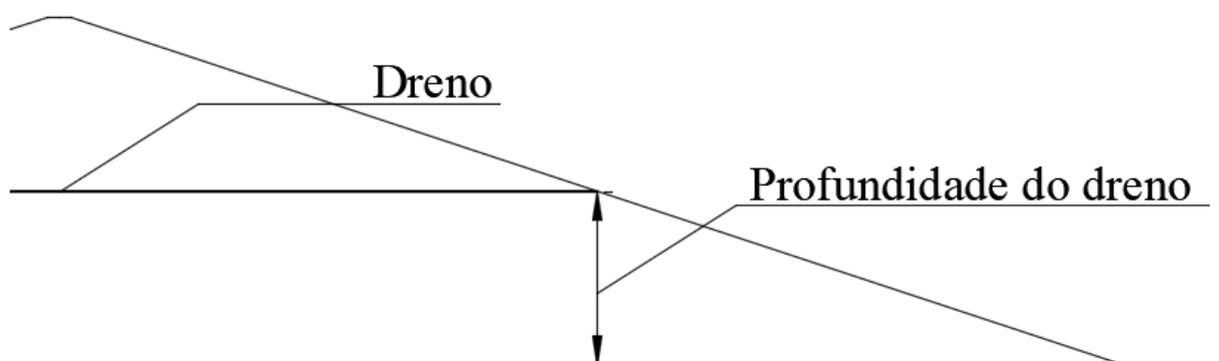


Figura 3.9 – Determinação da posição do dreno na pilha.

considerados de modo iterativo para obter os melhores resultados. A localização dos drenos foi variada para avaliar qual é a melhor posição. A Figura 3.9 mostra como é determinada a profundidade do dreno. A referência da profundidade foi de acordo com a base da pilha.

### **3.3.5- Alteração na geometria**

Com uma proposta de avaliar a influência da geometria na taxa de alteamento das pilhas de rejeito filtrado e co-disposição, alterou-se o comprimento da pilha para identificar qual é a configuração entre comprimento e largura que possibilita o alteamento sem interrupções até atingir a altura desejada. Com essa avaliação, foi possível observar quando a geometria proporciona taxas de alteamento compatível com as taxas limites encontrados dos materiais. Além disso, essa análise tem a possibilidade de comparar custos do terreno com os custos de implantação e operação da nova tecnologia, ponderando a melhor solução para cada mina.

# 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

O capítulo de resultado e as discussões desse capítulo foi dividido em: calibração dos modelos linear-elástico e CCM, análise de sensibilidade e as análises de estabilidade drenada e não drenada do rejeito filtrado e co-disposição.

## 4.1 - Calibração dos modelos

A calibração dos modelos para os materiais foi realizada para o modelo Cam-Clay modificado e o modelo linear elástico.

### 4.1.1- Modelo Cam-Clay Modificado (CCM)

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram as curvas do ensaio real e o ajuste do CCM de tensão desviadora e poropressão para o rejeito filtrado, respectivamente. Notou-se que o modelo conseguiu simular a tensão desviadora até 6% de deformação axial, enquanto a poropressão foi superestimada. Outro fato observado foi o endurecimento do material com a deformação que não foi simulado.

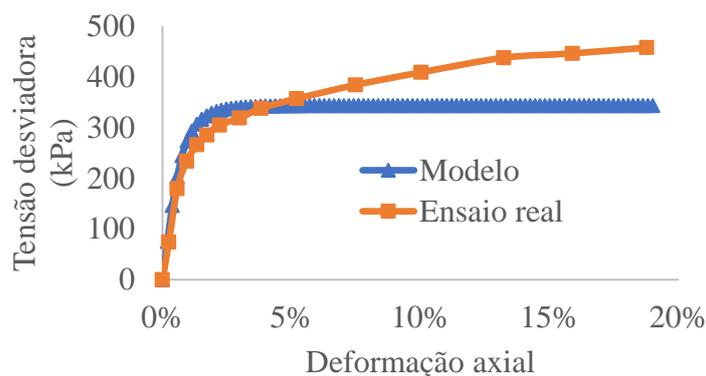


Figura 4.2 - Tensão desviadora do ensaio real e do modelo CCM para o rejeito filtrado

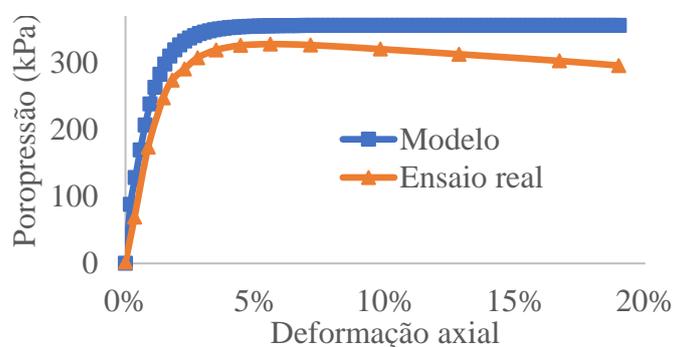


Figura 4.1 - Poropressão do ensaio real e do modelo CCM para o rejeito filtrado

Em relação a co-disposição, o modelo não conseguiu simular o trecho da tensão desviadora inicial e o desenvolvimento de poropressão, como pode ser ver nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. Observou-se uma discrepância entre o modelo e o ensaio maior na co-disposição do que o rejeito filtrado. Uma qualidade maior do ajuste pode ser resolvida com mais ensaios odométricos ou mudança para modelos constitutivos mais sofisticados.

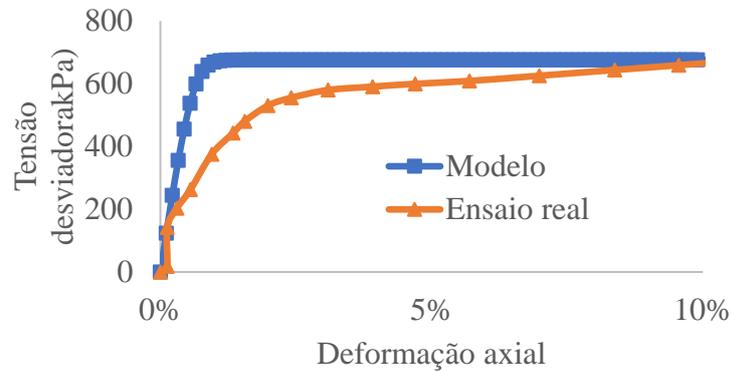


Figura 4.4 – Tensão desviadora do ensaio real e do modelo CCM para a co-disposição

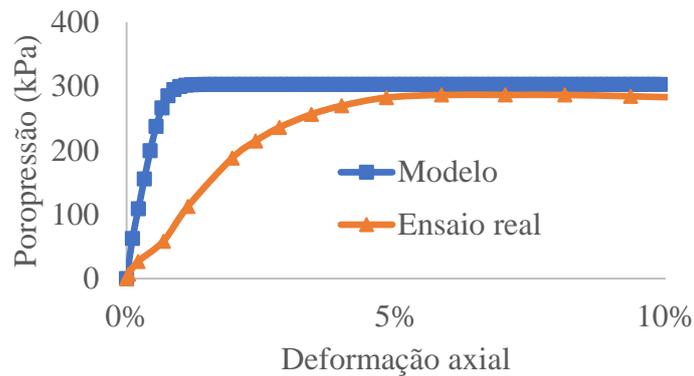


Figura 4.3 - Tensão poropressão do ensaio real e do modelo CCM para a co-disposição

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos dos modelos apresentados nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4. O valor de  $\lambda$  da co-disposição foi 10 vezes menor que o encontrado no rejeito filtrado e o  $\kappa$  obtido 2,75 vezes menor. O coeficiente de Poisson se manteve constante durante as análises.

Tabela 4.1 - Parâmetros do CCM encontrados da calibração do modelo para os materiais estudados.

	$\lambda$	$\kappa$	$V'$
Rejeito filtrado	0,1	0,022	0,3
Co-disposição	0,01	0,008	0,3

#### 4.1.2- Linear elástico

De modo geral, o rejeito filtrado não apresentou um ajuste no modelo linear elástico, tanto na tensão desviadora, como na poropressão. As curvas de tensão desviadora compensaram o baixo valor na deformação axial abaixo de 10%, superestimando o trecho entre 10 e 20% (Figura 4.5a). Já na Figura 4.5b, a poropressão desenvolvida no ensaio foi subestimada do início da deformação axial até a final.

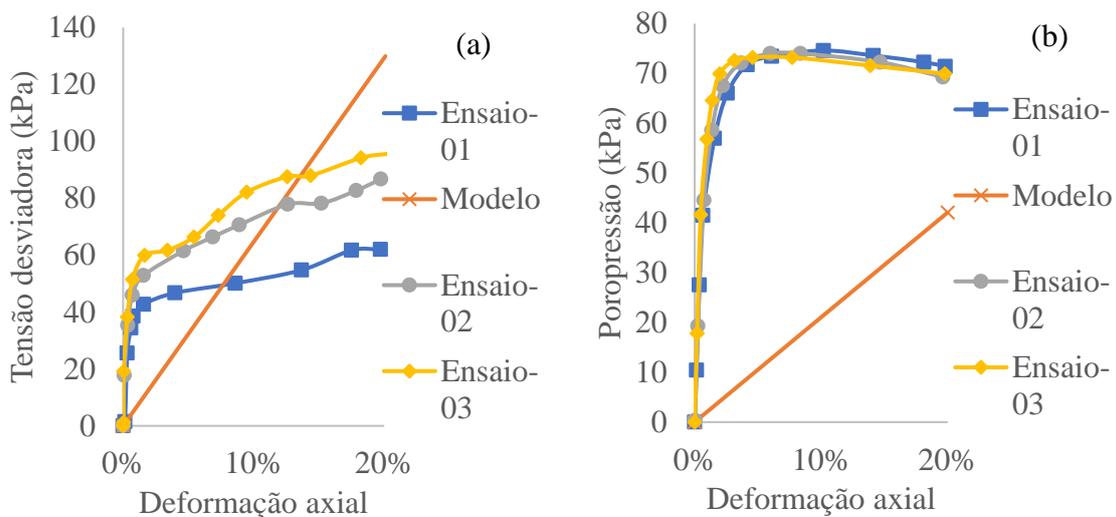


Figura 4.5 - Resultados da análise de sensibilidade do modelo e dos ensaios do rejeito filtrado: a) Tensão desviadora; b) Poropressão.

A co-disposição teve problemas semelhantes do rejeito filtrado, tanto em relação a tensão desviadora (Fig. 4.6a), como no desenvolvimento de poropressão do ensaio (Fig. 4.6b). Contudo, o *Plaxis* tentou ponderar qual seria a melhor configuração, ponderando a tensão desviadora e a poropressão.

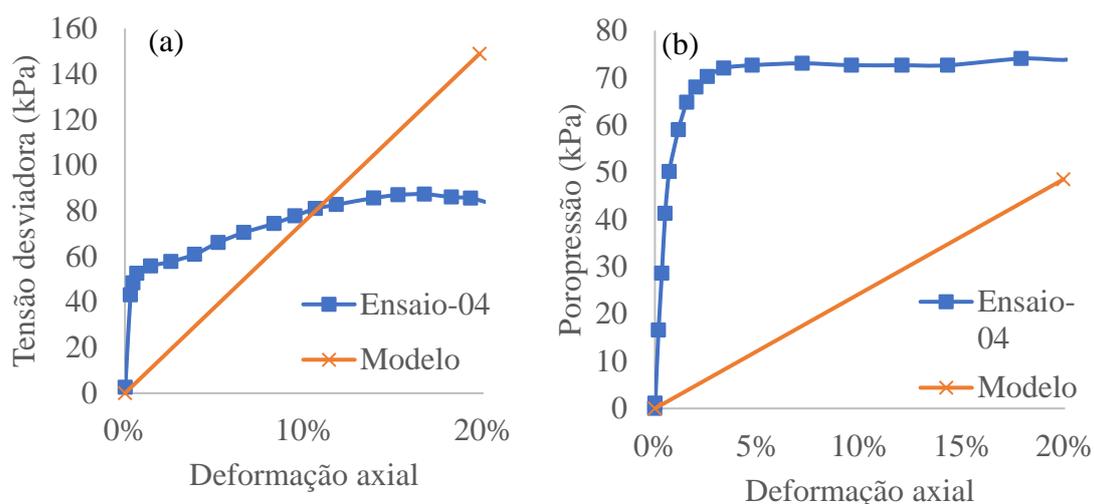


Figura 4.6 - Resultados da análise de sensibilidade da tensão desviadora (a) e poropressão (b) do modelo e dos ensaios da co-disposição.

A Tabela 4.2 mostra os módulos de Young e coeficientes de Poisson encontrados na calibração dos materiais no modelo linear elástico. Percebeu-se que os módulos de elasticidade entre a co-disposição e o rejeito filtrado tiveram a mesma ordem de grandeza. Isso pode implicar que o comportamento a baixas profundidades possa ser parecido. Contudo, esse comportamento se diverge, como observado nos ensaios de 500 kPa de Borja (2019), onde a co-disposição apresenta uma diferença significativa na tensão desviadora em relação ao rejeito filtrado. Isso sugere que o material se comporta melhor a altas tensões. Deve-se lembrar que essa é um tipo de abordagem onde se considera toda a deformação axial.

Tabela 4.2 - Parâmetros encontrados da calibração do modelo linear elástico para os materiais estudados.

	E (kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
Rejeito filtrado	496	0,1368
Co-disposição	565	0,1366

#### 4.2 - Análises de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada para duas variáveis: a sucção e a altura de alteamento. Essas análises tem como intuito de avaliar a influência na poropressão em um modelo 1D.

#### 4.2.1- Sucção

A Figura 4.7 mostra o desenvolvimento do valor máximo de poropressão em uma pilha com alteamento de 10 cm/dia para diferentes valores de sucção. Notou-se que a consideração de 10 kPa na análise fez com o excesso de poropressão desenvolvido na análise fosse, em média, 1/3 do valor na condição saturada no final do alteamento. As demais análises com 50 e 100 kPa, elas apresentaram uma poropressão 5 e 8 vezes menor do que a condição saturada.

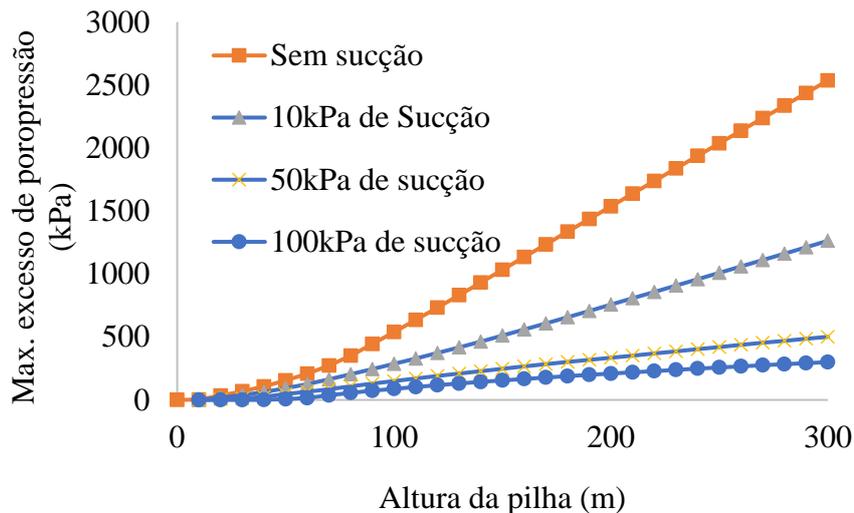


Figura 4.7 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes valores de sucção em uma pilha de rejeito filtrado.

Já para a co-disposição, ao aplicar 10 kPa de sucção, material obteve uma redução de 26% no excesso de poropressão máxima em relação a condição saturada (Fig. 4.8). Isso é um indício de que a sucção não é uma obrigatoriedade na estabilidade da pilha de co-disposição, o que já é fato nas pilhas de rejeito filtrado. Pode-se ver também que a sucção com valor de 5 kPa não teve diferença da condição saturada. A explicação disso está presente na curva de retenção do material, onde o valor da entrada de ar é mais elevado.

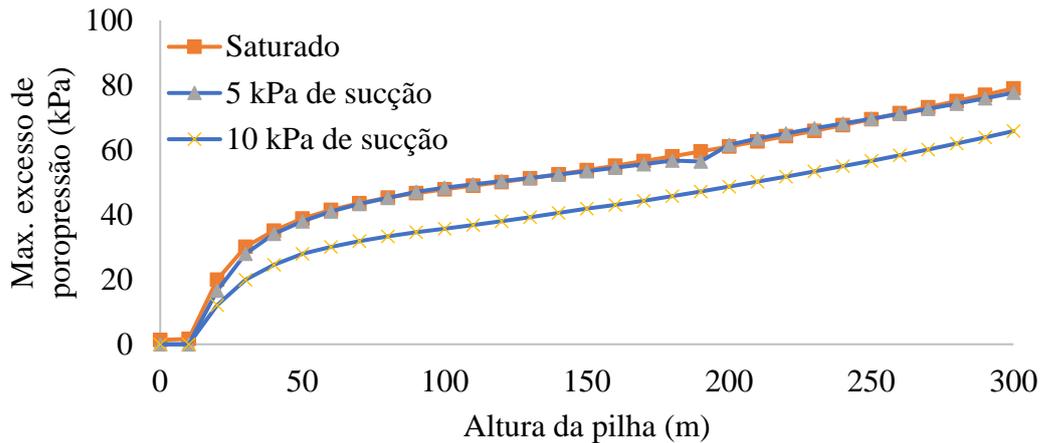


Figura 4.8 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes valores de sucção em uma pilha de co-disposição

#### 4.2.2- Altura de alteamento

A Figura 4.9 mostra o máximo de excesso de poropressão desenvolvido para várias alturas de alteamentos realizados até atingir a altura final da pilha. Primeiramente, observou-se que o excesso de poropressão desenvolvido de 10 cm/dia foi 4,85 vezes maior do que os alteamentos de 5 cm/dia. Esse comportamento não linear também foi visto entre as taxas de 10 e 20 cm/dia, onde o dobro da altura de alteamento provocou um aumento de 32% na poropressão gerada no fim do processo de alteamento. A explicação desse fato se deve a diminuição de dias para dissipação da poropressão devido ao aumento da altura de alteamento que acarretou, por exemplo, a mudança da fronteira drenante superior e o tempo de adensamento do material.

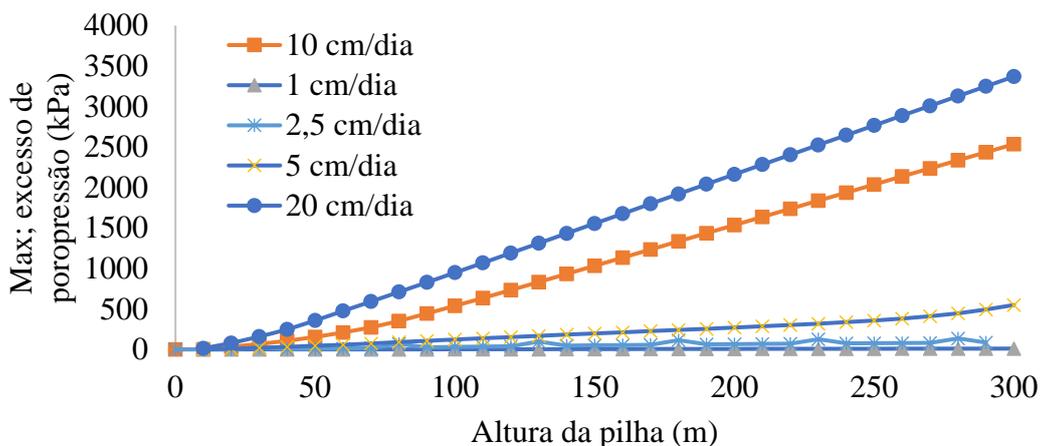


Figura 4.9 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes taxas de alteamento na pilha de rejeito filtrado (20%).

Os alteamentos de 10 cm/dia de co-disposição geraram valores 32 vezes menores do que o rejeito filtrado no final do alteamento, como se compara as Figuras 4.9 e 4.10. Sabe-se que em uma análise realística, a taxa de alteamento é uma variável em função da produtividade da mina, contudo, isso é um indício de que a co-disposição pode atingir maiores alturas do que o rejeito filtrado.

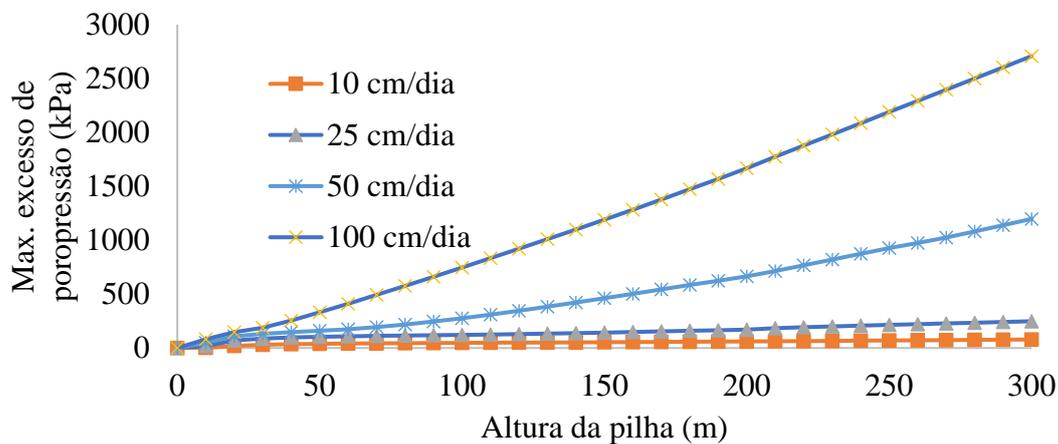


Figura 4.10 - Máximo de excesso de poropressão encontrado para diferentes taxas de alteamento na pilha de co-disposição.

A literatura apresenta valores comumente adotados para o rejeito em pasta, já que é uma tecnologia mais consolidada comparada com o rejeito filtrado. Considerando que os parâmetros de resistência e do modelo constitutivo permanecem os mesmos, pode-se fazer uma analogia da poropressão desenvolvida do rejeito filtrado com a co-disposição para determinar uma taxa de alteamento. Considerando a estimativa da taxa de alteamento de Zardari (2011) de 9 m/ano (2,5 cm/dia), a poropressão desenvolvida se assemelha a taxa de alteamento de 10 cm/dia da co-disposição, ou seja, 4 vezes maior que o rejeito filtrado. Deve-se atentar que essa perspectiva foi uma abordagem rudimentar pois considera somente o excesso de poropressão desenvolvido e uma análise unidirecional (sem fronteiras drenantes laterais).

### 4.3 - Análises drenadas

A Figura 4.11 mostra as curvas dos fatores de segurança durante o processo de alteamento realizado de acordo com a metodologia proposta. Os fatores de segurança anteriores a 100 m permaneceram constantes, por isso não são apresentados. O rejeito filtrado (20%) teve que ter a primeira parada no processo de alteamento quando a taxa foi de 10 cm/dia, o rejeito filtrado (14%) foi 18 cm/dia, enquanto a co-disposição teve sua primeira parada quando a taxa de alteamento foi de 1,55 m/dia. Essas taxas estão de acordo com as encontradas na literatura

técnica e na experiência profissional. Nestas análises se constatou em todas as análises que a cunha de ruptura foi quando a linha freática encostava na face do talude. A co-disposição teve uma pausa em 1,4 devido o próximo alteamento ter um FS de 1,1.

A diferença de altura entre as pilhas de rejeito filtrado (20%) e co-disposição foi em torno de 68 m, totalizando uma diferença total de volume de 8 milhões de metros cúbicos de material depositado ou uma diferença de 326 alteamentos diários. Em relação aos dois tipos rejeito com diferentes valores de umidade, notou-se uma diferença de 35 m entre as pilhas ou 258 dias/alteamentos. Como pode-se perceber, a diferença de 6% na umidade fez com que tivesse uma grande perda de produtividade.

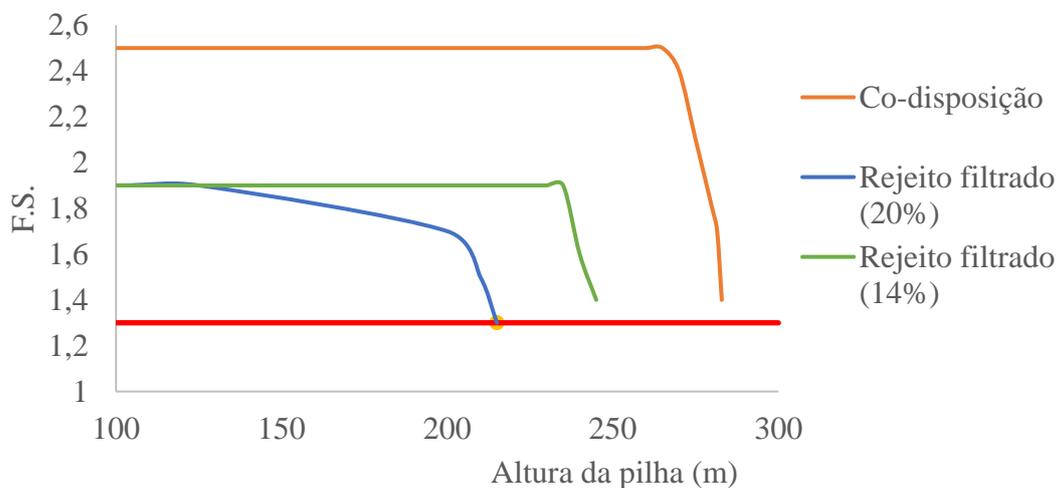


Figura 4.11 - Fatores de segurança encontrados durante o alteamento nas análises drenadas.

As Figuras 4.12a e 4.12b mostram o comportamento das linhas freática quando as pilhas de rejeito filtrado (20%) e co-disposição atingem a altura de 100 m, respectivamente. Notou-se que a linha freática já está a 5 m da crista, enquanto a co-disposição ainda está a 55 m. Esses comportamentos eram previstos, já que os materiais analisados estão com pouca sucção e/ou fora de especificação. A poropressão positiva apareceu quando a pilha de rejeito filtrado (20%) tem 25 m, enquanto na co-disposição, foi há 85 m. A implicação deste fato acarretaria que a taxa de alteamento seja dependente somente de questões construtivas, como por exemplo, a altura máxima de compactação requerida para um comportamento contráctil.

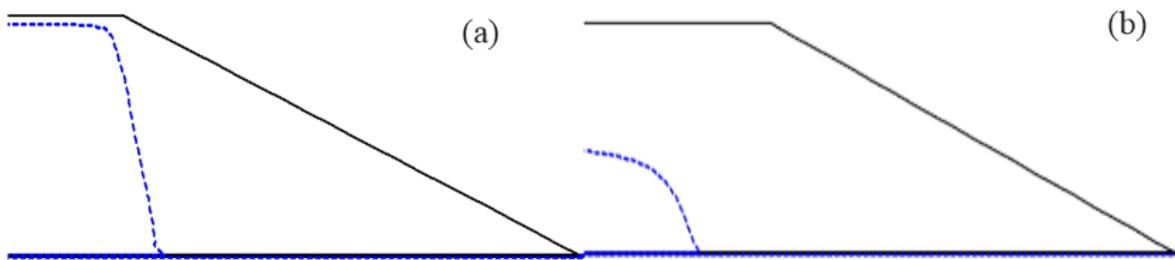


Figura 4.12 - Posição da linha freática à cem metros na pilha de rejeito filtrado (20%) (a) e co-disposição, com inclinação de 3H:1V.

As superfícies críticas encontradas nas análises de estabilidade do rejeito filtrado e co-disposição quando o FS atinge 1,3 estão presentes nas Figuras 4.13a e 4.13b, respectivamente. Observou-se que a linha freática que toca em uma das faces é a condição crítica de todas as pilhas estudadas. Esse de ruptura se caracteriza como circular.

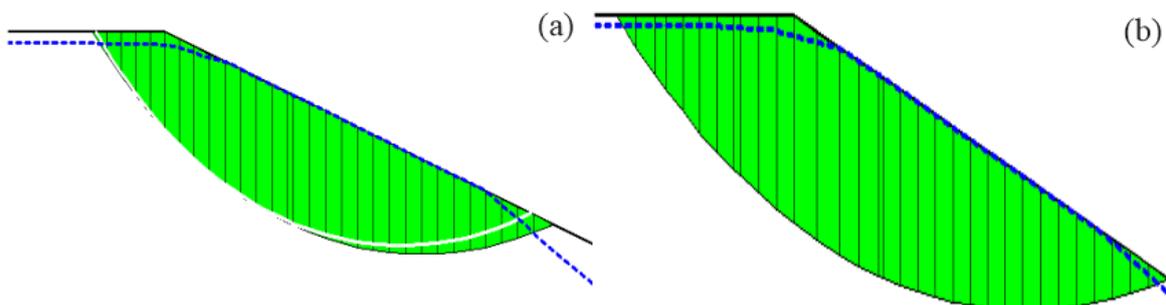


Figura 4.13 - Superfície de ruptura do rejeito filtrado (a) e co-disposição (b) quando o F.S. atinge 1,3.

A Figura 4.14 apresenta os valores de poropressão do último alteamento aceitável do rejeito filtrado (20%) comparando com a co-disposição. Observa-se uma diferença de até 230 kPa entre os materiais na altura em que a pilha de rejeito filtrado (20%) atinge um FS de 1,3. Além dessa comparação, a poropressão encontrada na co-disposição no seu último alteamento a 283 m foi 11% maior do que o último alteamento do rejeito filtrado (20%) a 215 m.

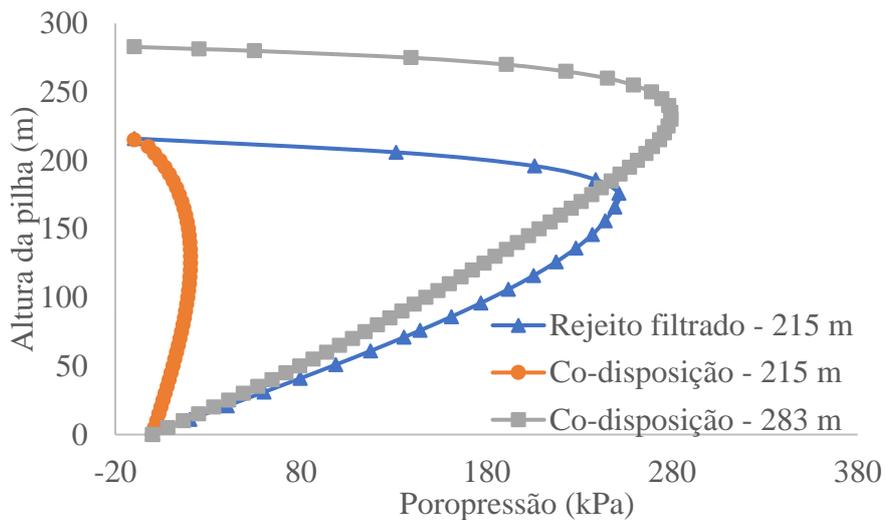


Figura 4.14 – Poropressões finais do rejeito filtrado (20%) e co-disposição em uma seção no meio da pilha.

Sobre os deslocamentos, foi possível também identificar que o rejeito filtrado (20%) apresentou deslocamentos cerca de 4 vezes maior do que a mistura. Enquanto a co-disposição atingiu 1,7 m, o rejeito filtrado (20%) teve um valor máximo de 7 m, como foi observado na Figura 4.15. Além disto, observou-se que na altura de 283 m, a co-disposição teve um acréscimo de 30 cm no deslocamento máximo comparando com relação de quando a pilha atingiu 215 m.

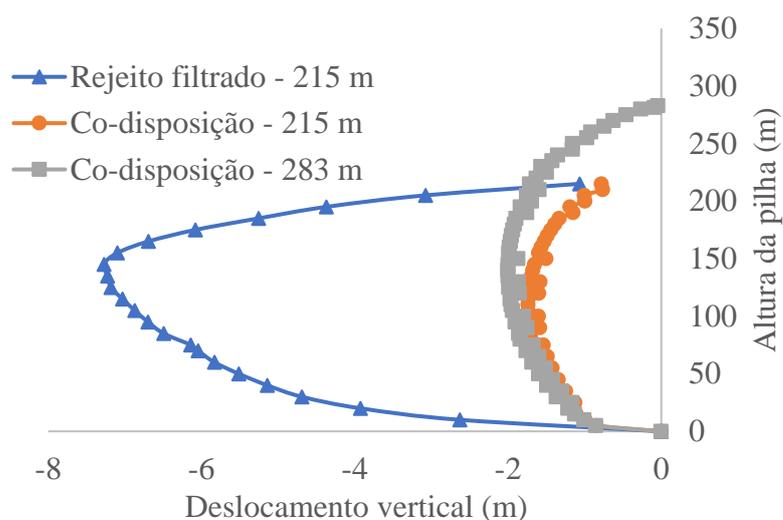


Figura 4.15 - Deslocamentos finais do rejeito filtrado (20%) e co-disposição em uma seção no meio da pilha.

Os deslocamentos, tanto do rejeito filtrado, como da co-disposição, estão adequados para a altura da pilha.

As Figuras 4.16a e 4.16b mostram os deslocamentos em toda a pilha de rejeito filtrado a 215 m e de co-disposição a 283 m, respectivamente. Um fato observado foi a magnitude dos deslocamentos observados do rejeito filtrado (20%) e a localização deles na pilha. Uma grande área da pilha de rejeito filtrado (20%) tem deslocamento no intervalo de 7,5 e 6,5 m, enquanto nesse intervalo de deslocamentos, foi observado praticamente todos os deslocamentos da co-disposição. Deve-se notar que perto da base da pilha se tem valores baixos devido a fundação ser considerada indeslocável.

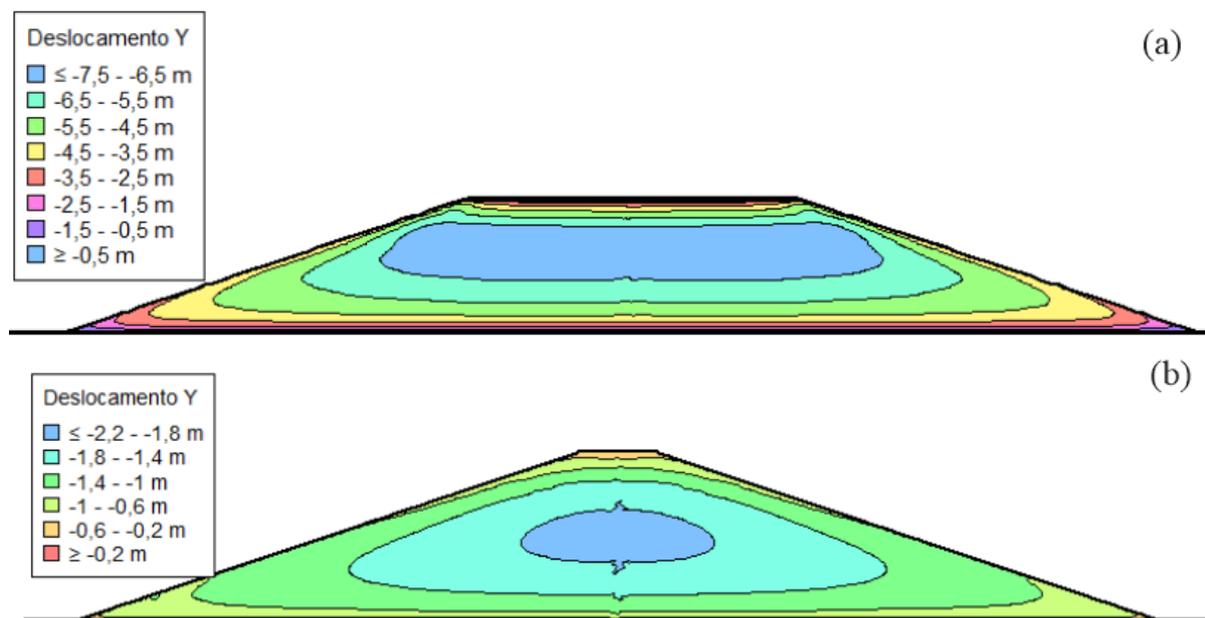


Figura 4.16 – Deslocamentos na pilha de rejeito filtrado (20%) a 215 m (a) e na pilha de co-disposição a 283 m (b).

Sobre os índices de vazios, foi possível observar nas Figuras 4.17a e 4.17b que variação do índice de vazios é mais alta no rejeito filtrado (20%) do que a co-disposição. Isso foi consequência dos parâmetros encontrados no modelo CCM. Mesmo em altas tensões, a estrutura rígida do estéril na co-disposição não teve redução significativas de no índice de vazios, como pode ser afirmado por diversos autores na literatura técnica. Comparadas as Figuras 4.17a e 4.17b, a base da pilha de rejeito filtrado (20%) teve uma redução de 88% do valor do índice de vazios inicial, enquanto houve uma redução de 17% na base da pilha da co-disposição.

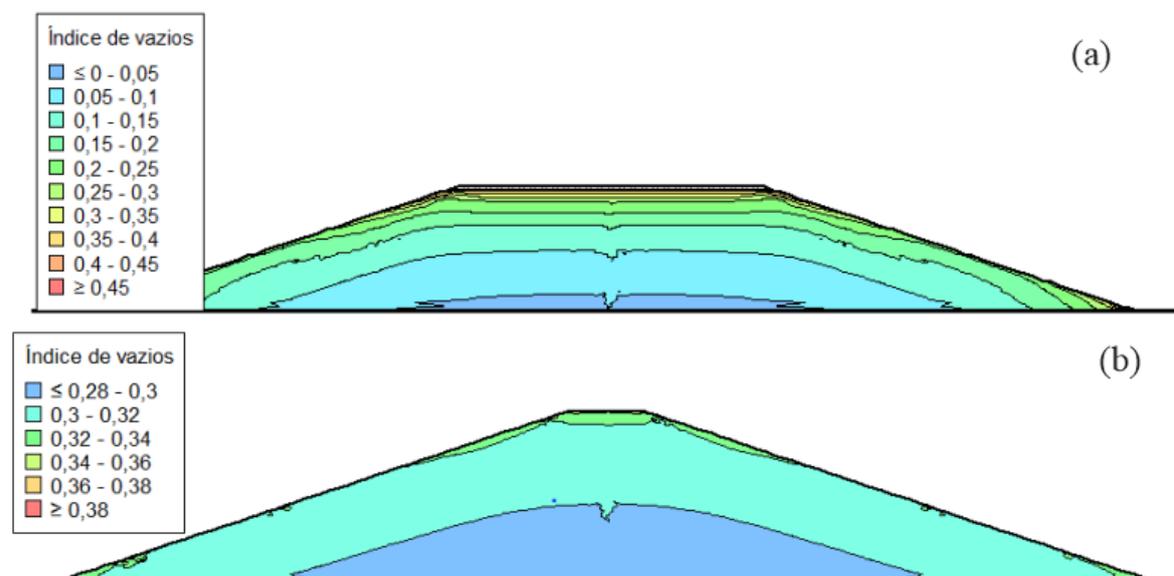


Figura 4.17 - Índices de vazios na pilha de rejeito filtrado (20%) a 215 m (a) e na pilha de co-disposição (b).

#### 4.3.1- Tempo de dissipação

Tendo em vista o exposto, a vida útil da pilha pode ser estendida caso seja permitido dissipar o excesso de poropressões. Então foram analisadas uma série de tempos de dissipação para avaliar qual a melhor alternativa. A Figura 4.18 mostra as curvas de FS por dia para quatro quantidades de dias diferentes onde houve uma pausa no processo de alteamento. A taxa de alteamento que obteve a melhor razão entre FS e dias foi o tempo de 50 dias, o qual possibilitou mais 100 alteamentos diários. Apesar da pausa de 200 dias obter um fator de segurança similar ao de quando a pilha tinha 100 m, o tempo necessário pausado em uma mina pode ser inviável. Se a proposta inicial é aumentar a vida útil da pilha ao máximo, esse tempo faz com que seja possível ter mais 178 alteamentos diários. Entretanto, deve-se lembrar que a mudança de comportamento drenado para não drenado pode ocorrer devido ao aumento repentino da taxa de alteamento.

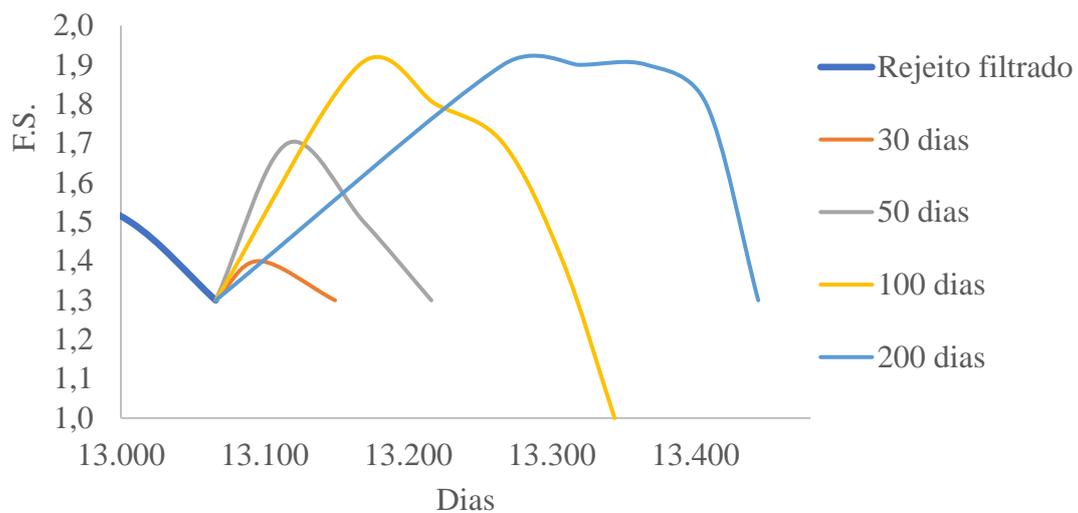


Figura 4.18 - Mudança do fator de segurança na pilha de rejeito filtrado (20%) para vários intervalos de dias.

Sobre a co-disposição, os tempos utilizados para dissipação da poropressão foram bem menores do que o rejeito filtrado. A Figura 4.19 mostra esses tempos para uma pilha com co-disposição. Devido a co-disposição atingir seu limite no final da altura preterida para o intervalo de 30 dias, não foi considerado valores maiores nessa avaliação. Observou-se que pausas de 5 e 10 dias no processo de alteamento tiveram a maior relação FS sobre dias. Entretanto, escolheu-se 5 dias por ter o menor valor. Essa pausa possibilitou mais três alteamentos diários. Apesar disso, a pausa de 30 dias fez com que a co-disposição estivesse estável até o alteamento diário de 3,38 m. O alteamento final de 9 m não foi realizado pois acarretou em problemas numéricos, além de não se aplicar em uma mina.

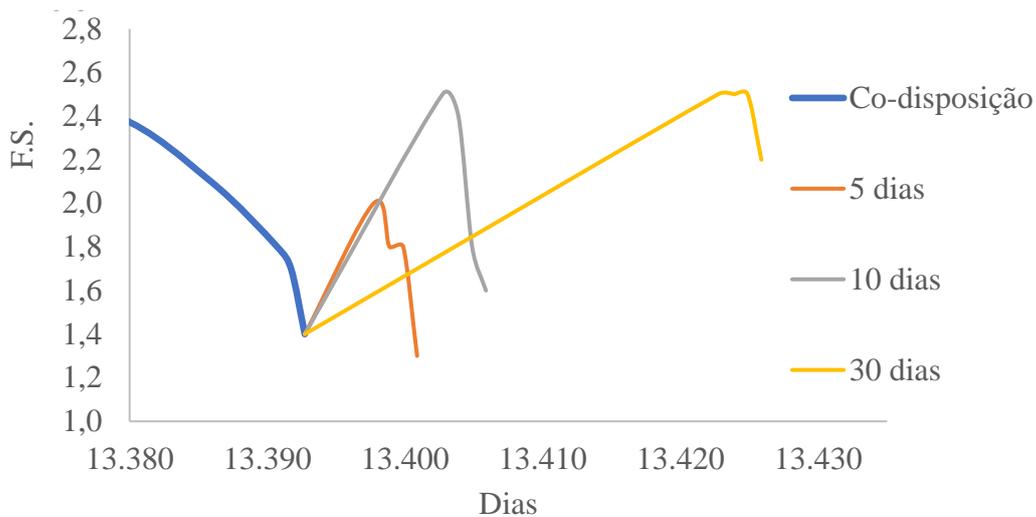


Figura 4.19 - Mudança do fator de segurança na pilha de co-disposição para vários intervalos de dias.

#### 4.3.2- Drenos

Outra solução proposta é a inserção de drenos para acelerar a dissipação de poropressão e permitir mais alteamentos. A Figura 4.20 mostra os fatores de segurança dos drenos localizados a 210, 205 e 200 m de altura, a partir da base da pilha. O dreno a 210 m do base da pilha foi o que possibilitou melhores resultados em relação ao fator de segurança em relação às demais profundidades, atingindo um FS de 1,3 com uma taxa de alteamento de 27 cm/dia e uma altura de 250 m. Os demais drenos à 205 e 200 m do topo da camada atingiram fatores de segurança de 1,2 e 1,0, nesse para essa altura de pilha.

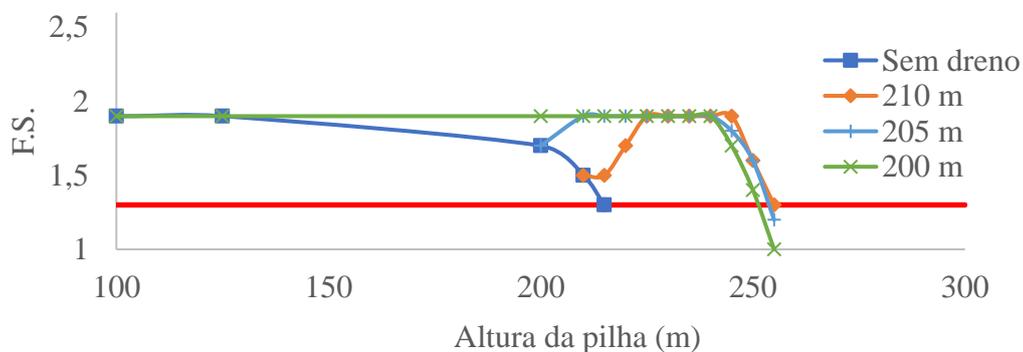


Figura 4.20 – Fatores de segurança para diversas localizações de dreno na pilha de rejeito filtrado.

As Figuras 4.21a, 4.21b e 4.21c mostram o comportamento da pilha do rejeito filtrado com as diferentes localizações das camadas drenantes. Notou-se que a poropressão quando o dreno fica a uma profundidade mais baixa em relação ao topo da camada, não dissipa poropressão nas camadas superiores com eficiência, implicando em FS menores do que os demais, como foi observado na Figura 4.20. O menor excesso de poropressão desenvolvido foi quando o dreno foi colocado a 210 m de altura.

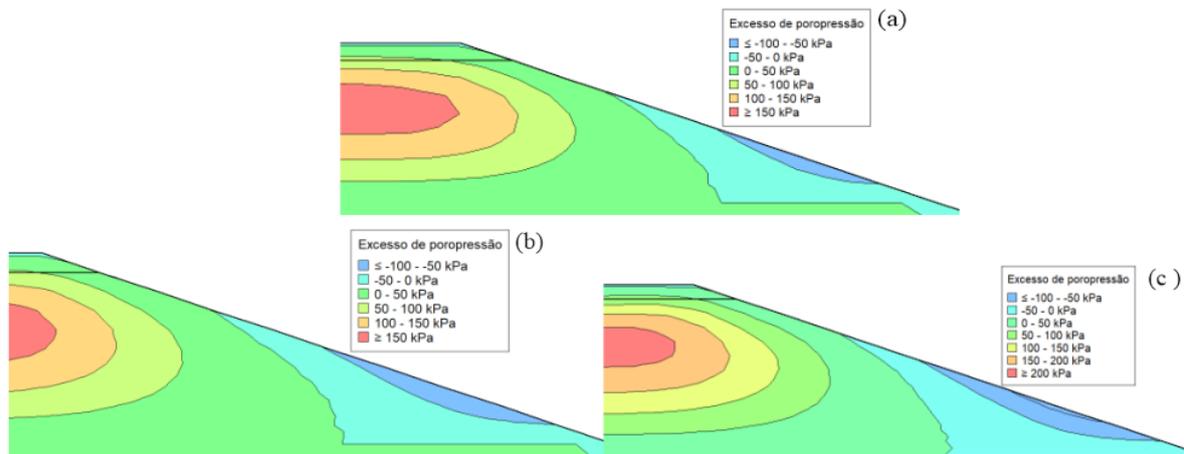


Figura 4.21 - Excesso de poropressão desenvolvido nas pilhas de rejeito filtrado para tapetes drenantes posicionado a uma altura: a) 210 m; b) 205 m; c) 200 m.

Já o comportamento da co-disposição foi o contrário do observado no rejeito filtrado. Tendo como referência o topo da camada, a inserção do dreno em camadas mais profundas ajudou mais no FS do que os drenos mais rasos (Fig. 4.22). Isso pode ser explicado pelo tempo de utilização do dreno. Quanto mais raso em relação ao topo da camada, menor o tempo que o dreno foi sendo utilizado. Neste caso, o tempo de utilização dos drenos a 281,5 m, 280 m e 275 m foram de 1, 2 e 7 dias, respectivamente.

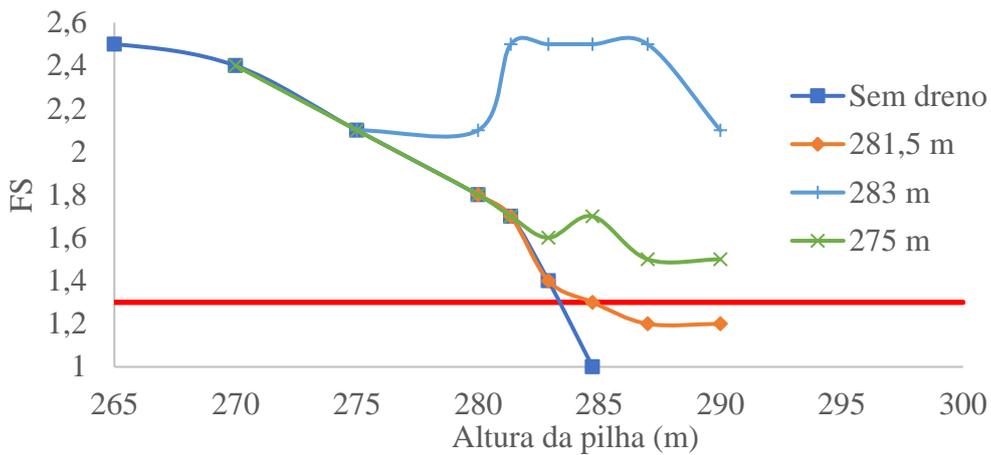


Figura 4.22 - Fatores de segurança para diversas localizações de dreno na pilha de co-disposição.

#### 4.3.3- Mudança na sucção

As Figuras 4.23a e 4.23b mostram a influência da sucção no FS das pilhas rejeito filtrado e co-disposição, respectivamente. Valores de sucção menores ou iguais a 28 kPa possibilitaram somente um aumento em torno de 3 m para a co-disposição, enquanto na pilha de rejeito filtrado (20%), 30 m. Deve-se notar que a pilha de co-disposição poderia ser finalizada com 300 m sem nenhuma pausa se esse material tivesse na umidade de compactação (57 kPa). Em relação aos dias, houve um acréscimo de 209 alteamentos/dias no rejeito filtrado quando se aumentou de 10 para 18kPa. Isso poderia ser um outro indício que a sucção é mais importante no rejeito filtrado do que na co-disposição, que foi observado também nas Figuras 4.7 e 4.8.

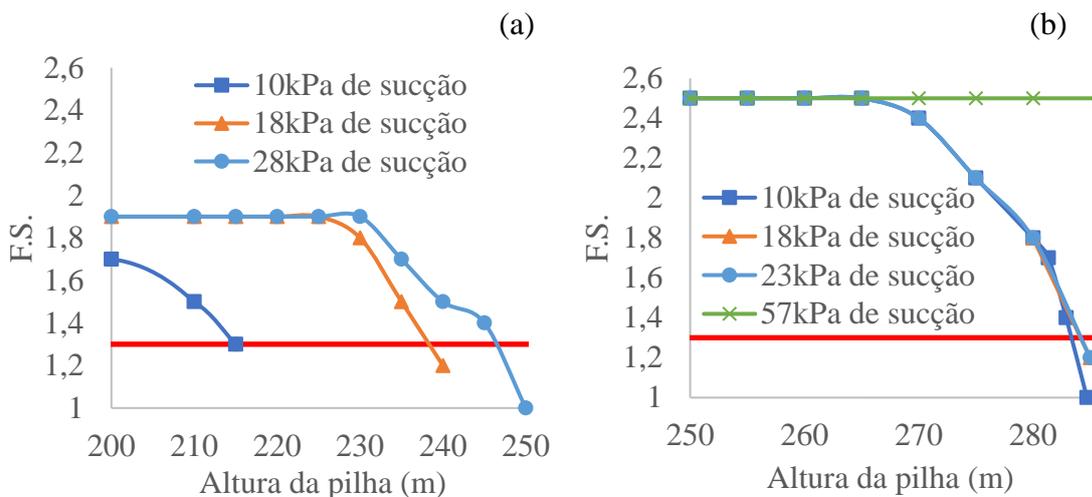


Figura 4.23 - Fatores de segurança para diversos valores de sucção para o rejeito filtrado e co-disposição na análise drenada.

As Figuras 4.24a e 4.24b mostram quando as pilhas atingem 100 m, utilizando uma sucção de 18 kPa no material depositado. Notou-se que houve uma diminuição de 5 m da linha freática para o rejeito filtrado, enquanto na co-disposição, essa superfície freática não apareceu. A linha freática na co-disposição apareceu somente quando a pilha atingiu 240 m. Esse comportamento da co-disposição se assemelhou melhor com o trabalho de Bareither *et al.* (2018), onde realizou um ensaio de CSR em que observou nenhuma formação de linha freática com uma velocidade de 3 mm/h. Deve-se atentar que a linha neutra não foi tão suave devido as condições de contorno utilizadas.

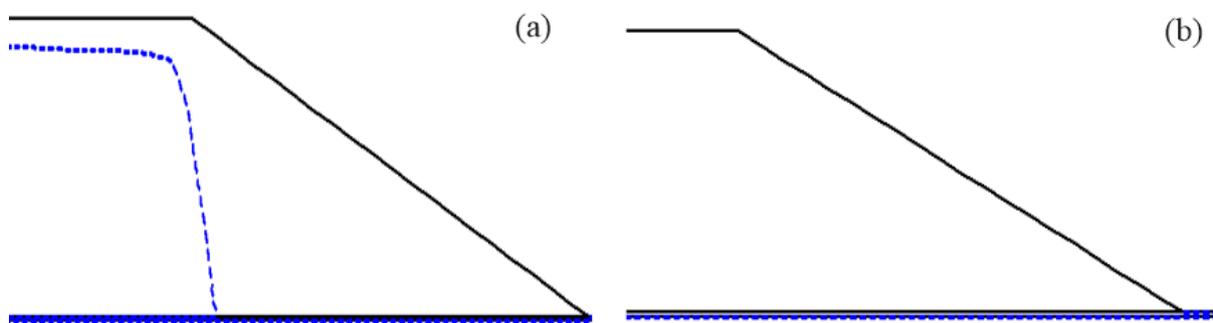


Figura 4.24 - Comportamento da linha freática a mudança da sucção para 18 kPa: a) Rejeito filtrado; b) Co-disposição.

#### 4.4 - Análises não drenadas

As análises não drenadas com a configuração 3H:1V não obtiveram valores acima de 1,3, mesmo com a consideração da sucção na análise de estabilidade. Devido a isto, foi necessário alterar a configuração da pilha para 3,5H:1V. A Figura 4.25 mostra o comportamento do rejeito filtrado (20%) com  $\phi^b$ , co-disposição considerando a sucção na parcela de resistência e sem considerar essa parcela. Notou-se que o rejeito filtrado (20%) atingiu uma taxa de alteamento de 5 cm/dia e a co-disposição de 80 cm/dia. Além disto, foi observado que a inserção do  $\phi^b$  alterou o fator de segurança inicial, mas não influenciou no aumento da taxa de

alteamento limite e da altura da pilha. A pilha de rejeito filtrado (14%) atingiu uma taxa de 17 cm/dia.

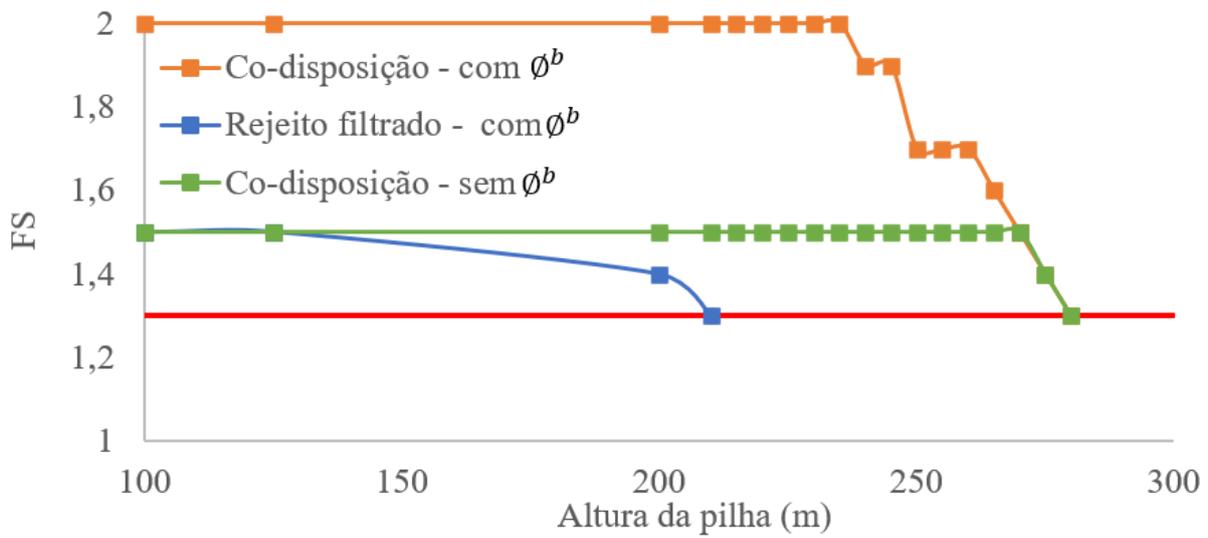


Figura 4.25 - Fatores de segurança encontrados durante o alteamento nas análises não drenadas para o rejeito filtrado (20%) e a co-disposição considerado e sem considerar a sucção.

As Figuras 4.26a e 4.26b mostram a posição da linha neutra na pilha quando se atinge 100 m. A taxa de alteamento dos últimos 5 m alteados atingiu 3,44 m/ano. Pode-se perceber que a linha freática do rejeito filtrado (20%) está comparada com apresentada na Figura 4.24, onde a inclinação é 3H:1V, enquanto a co-disposição não apresentou nenhuma poropressão positiva até 100 m. A diferença da superfície freática entre esse comportamento e da Figuras 4.24a e 4.24b mostra que a mudança de taxa de alteamento é mais benéfica para pilha do que o distanciamento das fronteiras drenantes laterais.

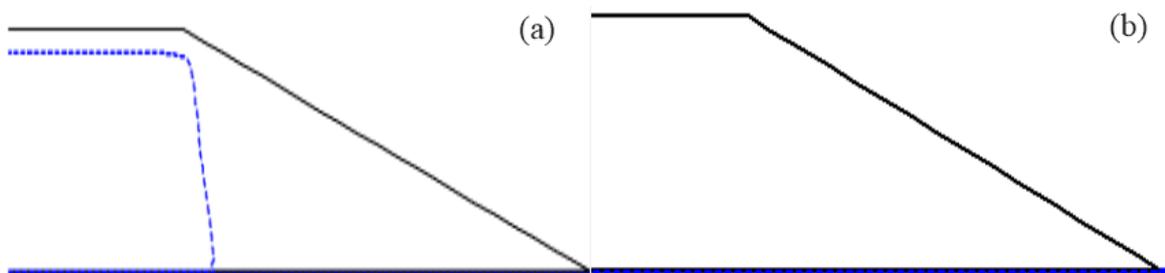


Figura 4.26 - Posição da linha freática à cem metros na pilha de rejeito filtrado (20%) (a) e co-disposição, com inclinação de 3,5H:1V.

#### 4.4.1- Mudança de sucção

A Figura 4.27 mostra a influência da sucção no processo de alteamento das pilhas de rejeito filtrado e co-disposição. Um fato a considerar é que as curvas de pilhas de rejeito filtrado com sucção de 28 kPa teve a primeira parada em 240 m, enquanto na análise drenadas, foi 245 m. Em geral, as duas pilhas tiveram comportamento similar do observado na condição drenada.

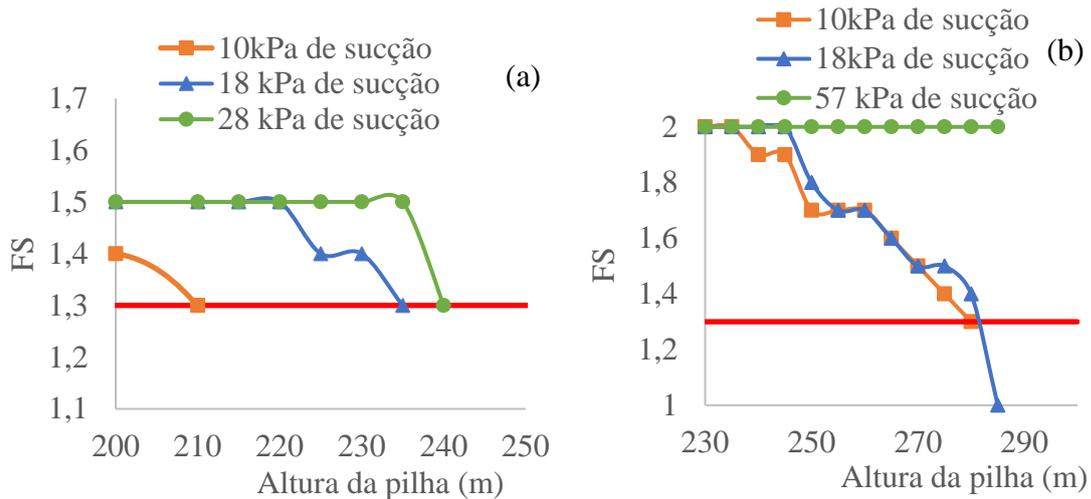


Figura 4.27 - Fatores de segurança para diversos valores de sucção para o rejeito filtrado e co-disposição na análise não drenada.

#### 4.5 - Alterações na geometria

A Tabela 4.3 mostra o resumo dos alteamentos encontrados nas análises drenadas e não drenadas. Por causa da estrutura da pilha proposta, os alteamentos ficam altos demais tanto para o rejeito filtrado, como para co-disposição. Uma das maneiras de possibilitar que as duas pilhas atinjam a determinada altura seria alterando a geometria (comprimento, largura e inclinação dos taludes).

Tabela 4.3 - Taxas de alteamento obtidas nas análises drenadas e não drenadas nos materiais estudados.

	Análises	
	Drenada (3H:1V)	Não drenada (3,5H:1V)
Rejeito filtrado (20%)	10 cm/dia	5 cm/dia
Rejeito filtrado (14%)	18 cm/dia	17 cm/dia
Co-disposição	155 cm/dia	80 cm/dia

Mantendo a largura e altura, a Figura 4.28 mostra diversas razões entre o comprimento e largura em relação a taxa de alteamento dos últimos 5 m. Nota-se que um aumento de 1,5 do comprimento da pilha, possibilita um alteamento de até 80 cm/dia nos últimos 5 m da pilha, compatível com os alteamentos alcançados da co-disposição. Em relação ao rejeito filtrado, essa pilha deve ter uma largura 5 vezes maior para possibilitar chegar a 300 m. Isso implica em um acréscimo de 11.593.400 m<sup>2</sup> para as duas pilhas conseguirem ter as alturas de projeto final iguais. Por isso, deve-se ponderar qual a solução financeiramente seria mais vantajosa: investir em áreas maiores de terrenos e ter a tecnologia de rejeito filtrado ou investir na tecnologia da co-disposição.

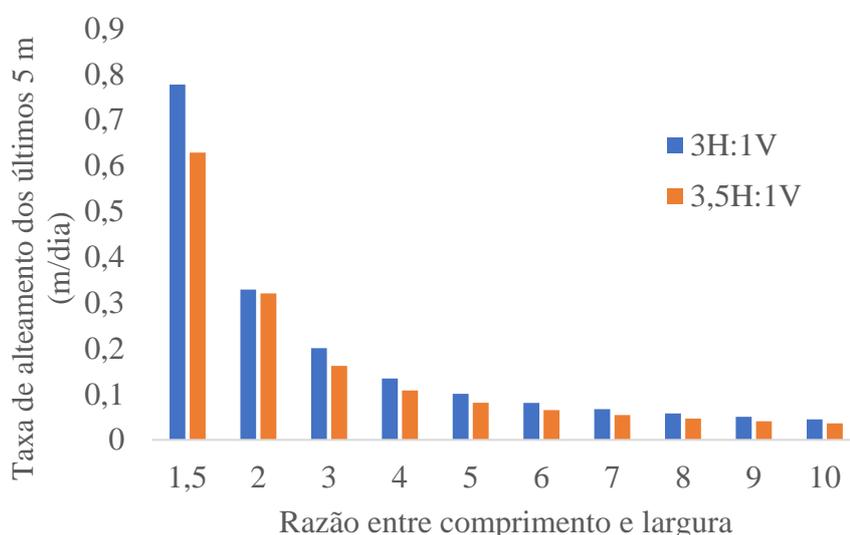


Figura 4.28 - Taxa de alteamento para vários comprimentos de pilhas diferentes nas inclinações estudadas.

## 5 - CONCLUSÕES

A presente dissertação estudou o comportamento das pilhas de rejeito filtrado e co-disposição ao se realiza sucessivos alteamento até o fim da vida útil. A obtenção dos parâmetros mecânicos dos materiais e as trajetórias de poropressão e tensão desviatória dos ensaios triaxiais foram retiradas do trabalho de Borja (2019). Esses ensaios foram realizados em diversas tensões confinantes, contudo se utilizou somente os ensaios com 100 e 500kPa. Sobre os  $C_c$ , eles foram retirados do trabalho de Bareither *et al.* (2018), sendo os  $C_\alpha$  estimados devido à falta de ensaios. Em relação a curva de retenção dos materiais utilizados, elas foram obtidas de Gorakhki *et al.* (2019). As principais conclusões desse estudo serão apresentadas a seguir.

A calibração dos materiais no modelo Cam-Clay modificado se mostrou eficiente tanto para os ensaios de rejeito filtrado, como para a co-disposição. Observou-se um ajuste bom de até 6% de deformação axial na tensão desviadora do rejeito filtrado, contudo, a poropressão foi superestimada na modelagem numérica. Já a co-disposição, o CCM não conseguiu simular com a mesma acurácia que o rejeito filtrado. Melhores resultados podem ser concluídos se existirem maiores informações sobre o  $C_c$  e  $C_\alpha$  ou testes com modelos constitutivos diferentes.

O modelo linear elástico, que foi utilizado devido a problemas de convergência e a especificação de tensões iniciais, não demonstrou um bom ajuste nos materiais, mesmo com maior quantidade de ensaios, como é visto no rejeito filtrado. Apesar disto, este modelo era utilizado durante o alteamento de cada camada, substituindo assim quando era finalizado. Tanto no rejeito filtrado, como na co-disposição, o desenvolvimento de poropressão foram subestimados.

As análises de sensibilidades quando se altera a sucção mostraram que o rejeito filtrado é bem mais sensível a mudança de sucção do que a co-disposição. Isto evidencia que a sucção é bem mais importante no rejeito. Este comportamento pode ser explicado pela curva de retenção dos materiais, onde o valor de entrada de ar tende a ser maior na co-disposição. Quando se alterou a altura dos alteamentos, foi possível perceber o quão foi diferente o comportamento dos materiais em relação ao desenvolvimento de poropressão. Notou-se que ao comparar os alteamentos de 10 cm/dia, a co-disposição gerou valores 32 vezes menores do que o rejeito filtrado no final do alteamento. Em uma estimativa conservadora com base no excesso de poropressão, a co-disposição possibilitou alturas 4 vezes maiores do que o rejeito.

Comparando os resultados nas análises drenadas entre co-disposição, rejeito filtrado (20%), rejeito filtrado (14%), observou-se que as taxas de alteamento foram de 155 cm/dia, 10 cm/dia e 18 cm/dia quando atingiu um valor de fator de segurança crítico. O desenvolvimento da linha freática quando a pilha atingiu uma altura de 100 m mostrou o quanto os dois materiais foram diferentes, apesar de terem a mesma permeabilidade. A cunha de ruptura circular foi observada para o rejeito e co-disposição. Outro ponto notado foi que o aumento de 10 para 28 kPa, fez com que o rejeito tivesse um aumento de 30 m para ter a primeira parada no alteamento. Esse acréscimo na co-disposição foi o suficiente para aumentar a vida útil da pilha de co-disposição em apenas 3 m.

Sobre os meios para aumentar a vida útil da pilha, foi observado que o rejeito filtrado precisou de uma maior quantidade de dias para aumentar a relação maior entre FS sobre dias do que a co-disposição. Essa pausa no rejeito filtrado foi de 50 dias no rejeito filtrado que possibilitou mais 100 alteamentos diários. Na co-disposição, a pausa de 5 dias na pilha de co-disposição promoveu mais três alteamentos diários.

Em relação aos drenos no rejeito filtrado, os drenos com a profundidade menores tiveram mais eficiência em aumentar o FS do que os drenos mais profundos. Os resultados obtidos foram que os drenos mais profundos foram mais eficientes. Isso pode ser explicado pelo tempo de utilização do dreno para dissipar as poropressões. Ao mudar a sucção, observou-se novamente a importância dessa variável no alteamento das pilhas de rejeito filtrado e co-disposição. Nessa análise se observou que a co-disposição na umidade de compactação teve o aparecimento da linha freática somente nos últimos alteamentos da pilha.

Devido a valores baixos de FS com a inclinação utilizada nas análises drenadas, mudou-se para 3,5H:1V e adotou o aumento da resistência devido a sucção ( $\phi^b$ ) nos cálculos de estabilidade nas análises não-drenadas. Essas análises obtidas do rejeito filtrado (20%), rejeito filtrado (14%) e co-disposição foram de 5, 17 e 80 cm/dia, respectivamente. A mudança de inclinação fez com que diminuísse a taxa de alteamento, conseqüentemente diminuindo a velocidade de desenvolvimento da linha freática, tendo mudanças mais significativas na co-disposição. Em relação a sucção, observou-se novamente que pequenas mudanças na sucção foram mais importantes no rejeito filtrado do que a co-disposição, mesmo com as mudanças nos parâmetros de resistência.

As alterações na geometria possibilitaram uma avaliação diferente em relação ao limite da taxa de alteamento, pois alterações na geometria possibilitam os materiais chegarem até 300

m. Um aumento de 1,5 vezes do comprimento das pilhas, foi possível a co-disposição atingir a altura desejada, enquanto o rejeito teve um aumento 5 vezes do tamanho normal.

Em suma, os resultados desta dissertação foram satisfatórios, quando se considera os objetivos geral e específicos desta dissertação, além de propor uma ideia inicial de metodologia de análises de pilhas para as pilhas de rejeito filtrado e, principalmente, as pilhas de co-disposição.

### **5.1 - Sugestões para pesquisa futuras**

Devido aos resultados e discussões reportados nestes trabalhos, é necessário ter análises mais profundas em diversos tópicos. São listadas algumas propostas de trabalhos futuros, tanto na parte experimental, como na parte numérica:

- Realizar mais ensaios com diferentes valores de diâmetro máximo utilizado nos ensaios triaxiais e determinar qual é a influência dessa simplificação ou utilizar a graduação paralela.
- Produzir ensaios com materiais intemperizado para avaliar quais são as vantagens e desvantagens.
- Realizar um modelo reduzido para determinar os possíveis comportamentos de uma pilha de 300 m.
- Avaliar quais são tensões desviadoras necessárias para cada material se comportar como dilatante ou contráctil.
- Avaliar da altura de compactação da co-disposição para o comportamento dilatante do material, além de determinar quais são os equipamentos e energia necessária para um dimensionamento seguro e econômico.
- Calibrar os materiais para outros modelos numéricos e determinar qual é o melhor para cada material.
- Realizar análises acopladas com pilhas em 3D para determinar o quão é diferente os fatores de segurança entre as análises 2D e 3D.
- Avaliar a infiltração na definição do fator de segurança das pilhas durante o alteamento.
- Avaliar a sensibilidade dos fatores de segurança quando se opta por uma seção mista onde se tem zonas estruturantes e não-estruturantes.
- Determinar a relação de custo de implantação e operação de uma planta tipo e avaliar quando deve ser utilizado cada material.

# REFERÊNCIAS

- AMEC (2012). National Instrument 43-101. Technical Report on Feasibility Study for Ollachea Gold Project. Disponível em: < [https://www.miningdataonline.com/reports/Ollachea\\_2012\\_FS.pdf](https://www.miningdataonline.com/reports/Ollachea_2012_FS.pdf) >. Acesso em: 20 set. 2019.
- AMOS, R. T., BLOWES, D. W., BAILEY, B. L., SEGO, D. C., SMITH, L., & RITCHIE, A. I. M. (2015). Waste-rock hydrogeology and geochemistry. *Applied Geochemistry*, v. 57, p. 140-156.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (2019). ANM publica nova norma para barragens de mineração. Disponível em: < <http://www.anm.gov.br/noticias/anm-publica-nova-norma-para-barragens-de-mineracao> >. Acesso em: 20 set. 2019.
- BAREITHER, C. A., GORAKHKI, M. H., SCALIA, J., & JACOBS, M. (2018). Compression behavior of filtered tailings and waste rock mixtures: GeoWaste. In *Tailings and Mine Waste Conference*.
- BAREITHER, C. A. (2018). Comportamiento Hidro-Mecánico de la Mezcla de Relave y Desmonte de Mina Formado Predominantemente por Relaves. 30 slides, color. Disponível em: <https://www.iccg.org.gt/index.php/component/phocadownload/category/3-cursos-y-seminarios?download=431:comportamiento-hidromecanico-de-la-mezcla-de-relave-y-desmonte-de-mina-formado-predominantemente-por-relaves>.
- BOTHA, H. J. (2016). Geohydrological impact of co-disposed coal material into an opencast pit (Tese de Doutorado).
- BRETT, D., O’KANE, M., SCOTT, P., TAYLOR, J., MCLEARY, M., & WILLIAMS, D. (2011). A water-covered waste dump in an arid climate? A remediation concept for Brukung Mine. In *Proceedings Mine Closure Conference*.
- BROWN, B.; GILLANI, I. (2016) Common errors in the slope stability analyses of tailings dams. In: *Proceedings of the First Asia Pacific Slope Stability in Mining Conference*. Australian Centre for Geomechanics, p. 545-556.
- BIOT, M. A. (1941) General theory of three-dimensional consolidation. *Journal of applied physics*, v. 12, n. 2, p. 155-164.
- BOCCAMINO, G. D. (2017) Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeito desaguados de minério de ferro: estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico. Dissertação (Mestrado). 130 p.
- BRINKGREVE, R. B. J.; ENGIN, E.; SWOLFS, W. M. PLAXIS 3D 2013 (2013) user manual. Plaxis, Delft, p. 256.

- BORJA, R. N. (2019). Undrained Shear Behavior and Critical State Analysis of Mixed Mine Waste Rock and Tailings (Tese de doutorado, Colorado State University. Libraries).
- BURDEN, R., WILLIAMS, D, JACOBS, M. (2019) The Geotechnical Properties of Filtered Tailings and Waste Rock Blends. In: 6th International Seminar on Tailings Management, Chile. Tailing 2019. p. 59 - 69.
- CASENTINI, B., LAZZAZZARA, M., AMALFITANO, S., SALVATORI, R., GUGLIETTA, D., PASSERI, D., BELARDI, G., TRAPASSO, F. (2019) Mining Rock Wastes for Water Treatment: Potential Reuse of Fe-and Mn-Rich Materials for Arsenic Removal. *Water*, v. 11, n. 9, p. 1897.
- CAVALCANTE, A. L. B. (2004). Modelagem e Simulação do Transporte por Arraste de Sedimentos Heterogêneos Acoplado ao Mecanismo de Tensão-deformação-poropressão Aplicado a Barragens de Rejeitos (Tese de Doutorado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 258p.
- CALDWELL, J. A. & CRYSTAL, C. (2015). Filter-pressed tailings facility design, construction, and operating guidelines. *Proceedings Tailings and Mine Waste 2015* Vancouver, BC, October 26 até 28, 9p.
- CORDÃO NETO, M. P. (2005). Análise hidro-mecânica de barragens de terra construídas com materiais colapsíveis (Tese de Doutorado, Departamento de Eng. Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 188p).
- CRYSTAL, C.; CHORE, C. & EZAMA, I. (2019) Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: *Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, 2018. Anais. Disponível em:* <[www.srk.ru.com/sites/default/files/file](http://www.srk.ru.com/sites/default/files/file)>. Acesso em, 1 de Agosto.
- DAVIES, M. (2011) Filtered dry stacked tailings—the fundamentals. In: *Proceedings tailings and mine waste.* p. 6-9.
- ESPÓSITO, T.J. (2000). Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 359 p.
- FERDOSI, B., JAMES, M., & AUBERTIN, M. (2015). Effect of waste rock inclusions on the seismic stability of an upstream raised tailings impoundment: a numerical investigation. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(12), 1930-1944.
- FERREIRA, D. B. (2018) Liquefação de rejeitos de minério de ferro—estudo de caso: sistema pontal em Itabira/MG.
- FREDLUND, D. G., & RAHARDJO, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils.* John Wiley & Sons.
- FREDLUND, D. G. (2006) Unsaturated soil mechanics in engineering practice. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, v. 132, n. 3, p. 286-321.

- FREDLUND, D. G.; HASAN, J. U. (1976). One-dimensional consolidation theory: unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 16, n. 3, p. 521-531.
- FOX, Z.; CARRARO, J. ANTONIO H. (2010) Peak and critical-state shear strength of mine waste rock. *Tailings and Mine Waste 2010*, p. 79-90.
- FURNAS, C. C. (1928). The Relations Between Specific Volume, Voids, and Size Composition in Systems of Broken Solids of Mixed Sized, Department of Commerce, Bureau of Mines. *Reports of Investigations*, 1-10.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2019). Stress-deformation modeling with SIGMA/W.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2012). Stability Modeling with SLOPE/W.
- GOWAN, M.; LEE, M.; WILLIAMS, D. J. (2011) Co-disposal techniques that may mitigate risks associated with storage and management of potentially acid generating wastes. In: *Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*. Australian Centre for Geomechanics, p. 389-404.
- GORAKHKI, M.H., BAREITHER, C.A., SCALIA, J., JACOBS, M. (2019). Hydraulic Conductivity and Soil Water Retention of Waste Rock and Tailings Mixtures. *Geo-Congress*, 41-50.
- GOLDCORP (2019). Tailings management Sustainable and complete dewatering solutions. 2019. Disponível em: <https://flsmidth-prod-cdn.azureedge.net/-/media/brochures/brochures-solutions/2019/fls-tailings-management-brochure-web-20190503.pdf?rev=41ef5655-6e4d-4cd3-b1a7-2ed9f59898da>. Acesso em: 1 jul. 2019.
- GOLDCORP (2018). Goldcorp and FLSmidth EcoTails™ filter technology. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=wr3HXU3-4yg>. Acesso em: 1 jul. 2020.
- GOLDER ASSOCIATES (2013). CDF Management Plan NICO Project. [S. l]. Disponível em: [http://registry.mvlwb.ca/Documents/W2008L2-0004/NICO%20Mine%20-%20CoDisposal%20Facility%20\(CDF\)%20Management%20Plan%20-%20Oct%2011\\_13.pdf](http://registry.mvlwb.ca/Documents/W2008L2-0004/NICO%20Mine%20-%20CoDisposal%20Facility%20(CDF)%20Management%20Plan%20-%20Oct%2011_13.pdf). Acesso em: 7 ago. 2020.
- GUIMARÃES, N.C. Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas. Dissertação (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011, 129 p.
- HAWLEY, M., & CUNNING, J. (2017). *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. CSIRO Publishing.
- HAMADE, M. M.P. & BAREITHER, C. A. (2018). Consolidated Undrained Shear Behavior of Synthetic Waste Rock and Synthetic Tailings Mixtures. *Geotechnical Testing Journal*, v. 42, n. 5, p. 1207-1232.
- HARR, M.E. (1984). Reliability-based design in civil engineering, Henry M. Shaw Lecture, Dept. of Civil Engineering, North Carolina State University, Raleigh, N.C.

- INDRARATNA, B.; WIJewardena, L. S. S.; BALASUBRAMANIAM, A. S. (1993) Large-scale triaxial testing of grey wacke rockfill. *Geotechnique*, v. 43, n. 1, p. 37-51.
- JAOUHAR, E.; AUBERTIN, M.; JAMES, M. (2011) Effect of mine waste rock inclusions on the consolidation of tailings.
- JEHRING, M. M. & BAREITHER, C. A. (2016) Tailings composition effects on shear strength behavior of co-mixed mine waste rock and tailings. *Acta Geotechnica*, v. 11, n. 5, p. 1147-1166.
- KLOHN CRIPPEN BERGER (2017). Study of Tailings Management Technologies. Disponível em: <[http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings\\_Management\\_TechnologiesL.pdf](http://mend-nedem.org/wp-content/uploads/2.50.1Tailings_Management_TechnologiesL.pdf)>. Acesso em: 20 set. 2019.
- KNAPMAN, D. (2001) A study on the costs of improving the management of mining waste. Final Report, Symonds Group Ltd, UK.
- LUPO, J., & HALL, J. (2010). Dry stack tailings—design considerations. In *Proceedings Fourteenth International Conference on Tailings and Mine Waste*, Vail, Colorado, USA, AA Balkema, The Netherlands (pp. 327-334).
- MAKNOON, M. (2016). Slope Stability Analyses of Waste Rock Piles Under Unsaturated Conditions Following Large Precipitations (Tese de Doutorado, École Polytechnique de Montréal).
- MCDONALD, L.; LANE, J. C. (2011) Consolidation of in-pit tailings. In: *Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*. Australian Centre for Geomechanics, p. 49-62.
- MESRI, G. & CASTRO, A. (1987)  $C\alpha/Cc$  concept and  $K_0$  during secondary compression. *Journal of geotechnical engineering*, v. 113, n. 3, p. 230-247,
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2019). MME estabelece eixos estruturantes para o setor mineral. 2019. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-estabelece-eixos-estruturantes-para-o-setor-mineral](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-estabelece-eixos-estruturantes-para-o-setor-mineral)>. Acesso em: 20 set. 2019.
- MORRIS, P.H. & WILLIAMS, D.J. (1999). Segregation of co-disposed coal mine washery wastes. *Canadian Institute of Mining Bulletin*, 92, 72-76.
- MULAR, A. L., HALBE, D. N., & BARRATT, D. J. (Eds.). (2002). *Mineral processing plant design, practice, and control: proceedings* (Vol. 1). SME.
- PEREIRA, D. A. (2005). Previsão de Poropressão Construtiva em Barragens via Simulação Numérica (Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133p).
- RAHARDJO, H.; CHANG, M. F.; & LIM, T. T. (1996). Stability of residual soil slopes as affected by rainfalls. In *Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides* (Vol. 1, pp. 33-56). Rotterdam, Netherlands: AA Balkema.

- ROBERTSON, P.K.; DA FONSECA, A.V.; ULRICH, B., & COFFIN, J. (2017). Characterization of unsaturated mine waste: a case history. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(12), 1752-1761.
- ROCHE, C.; THYGESEN, K. & BAKER, E. (2017). Mine tailings storage: safety is no accident. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal.
- SCOTT, R. F. (1963) Principles of soil mechanics. Addison-Wesley, p. 550.
- SOARES, L. in: Barragens de Rejeitos, CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, Ministério da Ciência e Tecnologia, Coordenação de Processos Minerários. Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. Rio de Janeiro, Agosto/2010, 5ª Ed. – Cap. 19 – pág. 831–896.
- SHUKLA, V., KUMAR, C.R., CHAKRABORTY, D.P. & KUMAR, A. (2018) Selection Criteria for Two Alternative Slime Disposable Technology - A Case Study. *Impc 2018, Moscou*, v. 170, n. 1, p. 10.
- SILVA, R. K. A. Co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida (2014). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Ouro Preto. 158 p.
- TIRUTA-BARNA, L.; BENETTO, E. & PERRODIN, Y. (2007). Environmental impact and risk assessment of mineral wastes reuse strategies: Review and critical analysis of approaches and applications. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 4, p. 351-379.
- ULRICH, B. (2019). Practical thoughts regarding filtered tailings, in AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds). *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings*. Australian Centre for Geomechanics, pp. 71-79.
- ULRICH, B., & COFFIN, J. (2013). Considerations for tailings facility design and operation using filtered tailings. In *The 16th international seminar on paste and thickened tailings*, Belo Horizonte (pp. 201-210).
- ULRICH, B. & KERR, T. (2011) Elko Roundtable 2011: high-density tailings, paste and filtered tailings. *Mining Engineering*, v. 63, n. 11, p. 66-70, 2011.
- USGS (org.). Iron Ore Statistics and Information. 2019. Disponível em: <https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/atoms/files/mcs-2019-feore.pdf>. Acesso em: 10 maio 2020.
- WICKLAND, B. E. (2006) Volume change and permeability of mixtures of waste rock and fine tailings (Tese de Doutorado). University of British Columbia.
- WICKLAND B.; LONGO S. (2017). Mine Waste Case Examples of Stacked Tailings and Co-Disposal. Banff. 17 slides, color.

- WICKLAND, B. E., WILSON, G. W., WIJEWICKREME, D., & KLEIN, B. (2006). Design and evaluation of mixtures of mine waste rock and tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 43(9), 928-945.
- WILLIAMS, D. J.; KUGANATHAN, V. (1992) Co-disposal of coal mine tailings and coarse reject. p. 50-55.
- WILSON, G. W., PLEWES, H. D., WILLIAMS, D. J., & ROBERTSON, J. (2003). Concepts of co-mixing of tailings and waste rock. p. 437-443
- WISDOM, T. (2019). Maintaining high availability and low operational costs for filtered tailings facilities, in AJC Paterson, AB Fourie & D Reid (eds). *Proceedings of the 22nd International Conference on Paste. Thickened and Filtered Tailings*. Australian Centre for Geomechanics, pp. 337-348.
- WISDOM, T.; JACOBS, M.; CHAPONNEL, J. (2018) GeoWaste™—continuous comingled tailings for large-scale mines. In: *Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Australian Centre for Geomechanics. p. 465-472.
- WU, D. (2019). Case Study of Cemented Coal Gangue-Fly Ash Backfill. In *Mine Waste Management in China: Recent Development* (pp. 195-204). Springer, Singapore.
- ZARDARI, M. A. (2011) Stability of tailings dams: focus on numerical modelling. Tese de Doutorado. Luleå tekniska universitet. p. 200.
- ZHANG, L. L., FREDLUND, D. G., FREDLUND, M. D., & WILSON, G. W. (2014). Modeling the unsaturated soil zone in slope stability analysis. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(12), 1384-1398.