UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE PILHA DE REJEITO FILTRADO CONSTRUÍDA EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL

FELIPE HENRIQUE FONSECA RODRIGUES

ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA AMBIENTAL 2

BRASÍLIA/DF: FEVEREIRO/2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ANÁLISE DE PILHA DE REJEITO FILTRADO CONSTRUÍDA EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL

FELIPE HENRIQUE FONSECA RODRIGUES

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

APROVADA POR:

_____

PROF. MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)
(ORIENTADOR)

_____

ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

ANA CAROLINA LOYOLA, DOUTORA (École des Ponts ParisTech)
(EXAMINADORA EXTERNA)

DATA: BRASÍLIA/DF, 17 DE FEVEREIRO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

RODRIGUES, FELIPE
Análise de Pilha de Rejeito Filtrado Construída em Regiões de Clima Tropical
[Distrito Federal] 2023
ix, 85 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2017)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. PILHA DE REJEITOS	2. PRECIPITAÇÃO
3. MODELAGEM COMPUTACIONAL	4. LIQUEFAÇÃO
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RODRIGUES, F. H. F. (2023). *ANÁLISE DE PILHA DE REJEITO FILTRADO CONSTRUÍDA EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, NÚMERO DE PÁGINAS p. 51

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe Henrique Fonseca Rodrigues
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise de Pilha de Rejeito Filtrado Construída em Regiões de Clima Tropical
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2023

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

_____

Felipe H. F. Rodrigues
felipe.henrique.fr@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me criou e, pela sua infinita graça, me fez chegar onde cheguei, independente dos percalços e desafios que a vida me impôs. É por sua misericórdia que vivo e por seu amor que alcancei cada conquista até aqui.

Agradeço a meus pais, Clauber e Cristina, por sempre estarem comigo, me orientarem e por serem meus maiores exemplos do que quero ser como pessoa e cidadão. Obrigado ao meu irmão Gabriel por sempre me dar apoio e por sua amizade, e às minhas avós que estiveram por perto e me ajudaram sempre que podiam.

Agradeço a Leticia Santiago por estar do meu lado sempre e me apoiar em cada momento, pelo seu companheirismo e por partilhar os desafios comigo. Obrigado às minhas amizades, de modo especial a Michelle, Stefanny e Rayssa, por todos os trabalhos e desafios que superamos juntos nesse período de faculdade. Também agradeço à Sara pelo apoio e pelo companheirismo no seu período de estágio no Confea.

Gostaria de agradecer aos professores que inspiraram e me apresentaram ao modelo que quero seguir como profissional, de modo especial a professora Yovanka Perez, Ricardo Minoti, Conceição Albuquerque e professora Lenora Gomes. Agradeço também à professora Izabel Zaneti por sua orientação que me ajudou a optar pela Engenharia Ambiental.

Agradeço, por fim, ao meu orientador, Manoel Neto, por ter confiado em mim a responsabilidade pelo presente trabalho, pela orientação, por todo o aprendizado adquirido, pela paciência e por ser um modelo de profissional que me inspira a continuar progredindo.

RESUMO

A indústria de mineração é atualmente uma das atividades extrativistas mais importantes do mundo, gerando milhares de toneladas de rejeito como consequência do beneficiamento do minério. Em face dos recentes acidentes com barragens, é necessário estudar formas mais seguras de se dispor de um volume crescente de rejeitos. Neste sentido, as pilhas de rejeito filtrado se mostram como uma opção interessante ao setor, ao acomodá-los em forma inerte e estável. Embora este método esteja ganhando espaço na indústria, ainda há receios sobre sua segurança em ambientes tropicais e subtropicais, como em grande parte do Brasil, marcados por alta umidade e pluviosidade. O presente estudo pretendeu esclarecer o comportamento de um modelo computacional, desenhado no software GeoStudio®, de uma pilha sob fatores climáticos da região de Minas Gerais, marcada pela exploração de minérios, observando as tensões em seu interior ao longo da construção e a estabilidade do talude. Os cálculos de tensões foram feitos pelo Método dos Elementos Finitos, enquanto a estabilidade foi verificada pelo Método do Equilíbrio Limite; comparou-se um modelo que acrescentava o Método de Penman-Wilson para a interação com o clima com outro que considerava apenas os valores de precipitação. Os resultados hidráulicos mostram um cenário estável, com poropressões negativas em quase toda a pilha e durante boa parte de sua construção, e com tensões efetivas relativamente baixas. Os cálculos de estabilidade, por sua vez, evidenciaram um fator de segurança que se reduz drasticamente ao longo dos anos de construção, como possível resultado da inclinação do talude, e foram ainda mais baixos quando se considerou outras variáveis climáticas. De modo geral, o modelo demonstrou que a pilha pode ser construída em ambientes tropicais e subtropicais, uma vez que não se apresentam as condições para a ocorrência da liquefação.

Palavras-chave: Pilha de rejeitos filtrado, estabilidade de talude, liquefação, tensões do solo, interação terra-clima

ABSTRACT

The mining industry is currently one of the world's most important extractive activities, generating thousands of tons of tailings as a consequence of the ore processing. In the face of the recent accidents with dams, it's necessary to study safer manners of disposing a growing volume of tailings. In this sense, the filtered dry stacked tailings show's itself as an interesting option to this sector, when it's accommodated in an inert and stable form. Although this method is gaining space in the industry, there is still suspicions about its safety in tropical and subtropical environments, as in the most of Brazil's land, marked by high moisture and rainfall. The present work pretended to enlighten a computational model behavior, design in the software GeoStudio®, of a dry stack under the climatic factors of Minas Gerais region, marked by mineral exploration, observing the stresses inside it over its construction and the slope stability. The stress calculations were made by Finite Elements Method, while the stability was verified by the Limit Equilibrium Method; we compared a model that added the Penman-Wilson Method for climate-earth interaction to another that has considered only the rainfall amounts. The hydraulic results show a stable scenario, with negative pore water pressures in almost all the dry stack and during most of its construction period, with relatively low effective stresses. The stability analyses, in the other hand, evidenced a drastic reduction of the safety factor over the construction years, as a possible result of the steep slope, and was even lower when other climate variables were considered. On the whole, the model has demonstrated that the dry stack may be built in tropical and subtropical environments, since it doesn't present the conditions for the liquefaction occurs.

Key-words: filtered dry stacked tailings, slope stability, liquefaction, soil stresses, earth-climate interaction

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. CONTEXTO GERAL 1

1.2. MOTIVAÇÃO 8

1.3. OBJETIVOS 11

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11

2.1. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO 11

2.2. AVANÇO E DISSEMINAÇÃO DOS REJEITOS FILTRADOS 13

2.3. CARACTERIZAÇÃO DA PILHA DE REJEITOS 16

2.4. CONSIDERAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO DAS PILHAS 18

2.5. O FENÔMENO DA LIQUEFAÇÃO 21

2.6. MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS AO ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES 23

2.6.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS (MEF) 24

2.6.2. MÉTODO DO EQUILÍBRIO LIMITE (MEL) 26

2.7. INTERAÇÃO COM AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS 28

2.7.1. MÉTODO DE PENMAN-WILSON 33

2.8. GEOSTÚDIO 34

3. METODOLOGIA 35

3.1. FERRAMENTAS 35

3.1.1. SIGMA/W 36

3.1.2. SEEP/W 36

3.1.3. SLOPE/W 37

3.1.4. DADOS ATMOSFÉRICOS – INMET 37

3.2. ETAPAS DA MODELAGEM 38

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 48

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS 59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1 Gráfico com as principais empresas de mineração do mundo, com capital acumulado e principais minerais explorados. Adaptado de: Venditti, 2021. 3
Figura 1.1.2 Fluxograma do processo de beneficiamento do minério, com destinações do rejeito. Fonte: Cristaljr, 2020. 5
Figura 1.1.3 Tipos de barragem de deposição de rejeitos. Fonte: AESBE, 2019. 6
Figura 1.2.1 Barragens de rejeito no Brasil, diferenciadas por área alagada e minério explorado. Fonte: Carmo et al, 2020. 10
Figura 2.1.1 Contorno das linhas de incremento das tensões cisalhantes da barragem I do Córrego do Feijão, Brumadinho, MG, apontando a superfície onde ocorreu a liquefação. Fonte: CNME, 2021 12
Tabela 2.1.1 Tipos de rejeitos por teor de umidade, de acordo com Ulrich (2019). Fonte: Souza, 2020 13
Figura 2.2.1 Número cumulativo de instalações de rejeitos desidratados. Fonte: Davies, 2011. . 15
Figura 2.3.1 Percentual de finos por massa pelo tamanho dos grãos dos rejeitos. Fonte: Lupo e Hall, 2010. 17
Figura 2.3.2 Altura da coluna de rejeito pela saturação, para seis tipos de rejeitos distintos. Fonte: Lupo e Hall, 2010. 18
$wm = mwmT$; Equação 2.4.1 20
$wG = mwms$; Equação 2.4.2 20
Figura 2.5.1 Resposta não drenada a contração, à esquerda considerando a deformação e à direita a força normal. Fonte: Robertson, 2017. 22
$ic = \gamma'\gamma w$; Equação 2.5.1 22
$\sigma' o \sigma' cs = 10(\Psi \text{ì})$; Equação 2.5.2 23
Figura 2.5.2 Relação entre índice de vazios e tensões efetivas. Fonte: Robertson, 2017. 23
Figura 2.6.1 Comparação entre os resultados do modelo laboratorial em escala de Rulon (à esquerda) e do modelo computacional para o mesmo problema (à direita). Fonte: Geoslope International Ltd., 2012. 24
$V[B]TCBdV\ a = bcV\{N\}TdV + pA\{N\}TdA + \{Fn\}$; Equação 2.6.1 25
Figura 2.6.2 Discretização de um talude por fatiamento e forças atuantes em uma fatia. Fonte: Geoslope International Ltd., 2020. 26

$Fs = \tau cis\tau m = ScisSm$; Equação 2.6.2 27
$\Phi Srt, t = Rt - It - \varphi[Srt, t]$; Equação 2.7.1 28
$\chi Srt = ETSrt + L[Srt]$; Equação 2.7.2 29
Figura 2.7.1 Percentual de infiltração da água da chuva pelo volume de precipitação. Fonte: Rahardjo et al., 2013. 30
$fTT = \lambda e - \lambda T$, para $T \geq 0$; Equação 2.7.3 30
$fHRhR = 1\alpha e - 1\alpha hR$, para $hR \geq 0$; Equação 2.7.4 30
Figura 2.7.2 Distribuição da probabilidade (a) do tempo entre eventos de chuva e (b) da altura dos eventos de chuva. Fonte: Hoyos, 2014. 31
$kySr = ksSrd$; Equação 2.7.5 31
Figura 2.7.3 Relação entre conteúdo volumétrico de água e sucção mátrica para fase de hidratação (Layer 1) e secagem (Layer 2). Fonte: Rahardjo et al., 2013. 32
$ER = \Gamma RadL + kpirEakpirUsolo + \Gamma$; Equação 2.7.6 34
$Ea = f(var)Pa(Uar - Usolo)$; Equação 2.7.7 34
Figura 3.2.1 Dados do projeto, com análise parental em Sigma/W e Slope/W, com tempo de duração de 365 dias por camada. 38
Figura 3.2.2 Desenho geométrico 2D da pilha de rejeitos (em verde), separada por 10 camadas e sustentada sobre um solo de fundação (em amarelo). 39
Tabela 3.2.1 Propriedades de tensão da fundação e do rejeito. 39
Tabela 3.2.2 Propriedades hidráulicas da fundação e do rejeito. 40
Figura 3.2.3 Relação entre o teor de umidade volumétrico e a poropressão para a fundação e o rejeito 40
Figura 3.2.4 Relação entre a condutividade vertical de água e a sucção mátrica. 41
Figura 3.2.5 Tela de entrada para as condições de contorno, com destaque para a interação Terra-Clima. 42
Figura 3.2.6 Temperatura diária média entre janeiro de 2011 e janeiro de 2022, com base nos dados do INMET. 43
Figura 3.2.7 Precipitação total diária entre janeiro de 2011 e janeiro de 2022, com base em dados do INMET. 44
Figura 3.2.8 Variação da umidade relativa do ar entre os anos de 2011 e 2022, obtida por dados do INMET. 45

Figura 3.2.9 Médias diárias das velocidades do vento entre os anos de 2011 e 2022, obtidas por dados do INMET. 45
Figura 3.2.10 Fluxo líquido diário de radiação em período de 365 dias, estimado a partir dos valores mensais de radiação líquida. Com base em pesquisa de Funari e Tarifa, 2017. 46
Figura 3.2.11 Tela de entrada para a superfície de pesquisa, com atribuição dos pontos de entrada e saída para análise de estabilidade. 47
Figura 3.2.12 Tela para a definição da malha, com tamanho de elementos de 5 metros. 47
Figure 4.1 Primeira camada da pilha de rejeitos. 49
Figure 4.2 Modelo de pilha de rejeitos com duas camadas. 49
Figure 4.3 Modelo de pilha de rejeitos com três camadas. 50
Figure 4.4 Modelo de pilha de rejeitos com quatro camadas. 50
Figure 4.5 Modelo de pilha de rejeitos com cinco camadas. 51
Figure 4.6 Modelo de pilha de rejeitos com seis camadas. 51
Figure 4.7 Modelo de pilha de rejeitos com sete camadas. 52
Figure 4.8 Modelo de pilha de rejeitos com oito camadas. 52
Figure 4.9 Modelo de pilha de rejeitos com nove camadas. 53
Figure 4.10 Pilha de rejeitos completa, com dez camadas. 53
Figure 4.11 Poropressões na pilha após os dez anos de construção, considerando o cálculo de interação climática de Penman-Wilson. 54
Figure 4.12 Representação das tensões efetivas na pilha após dez anos. 55
Figure 4.13 Isocurvas das tensões efetivas atuantes sobre a pilha, considerando-se as variáveis climáticas no cálculo de Penman-Wilson. 56
Figure 4.14 Superfície de ruptura da pilha após dez anos, com Fator de segurança de 1,209. 57
Figure 4.15 Fatores de segurança ao longo dos anos de construção: (em azul) considerando-se apenas a precipitação percolando o solo; (em laranja) considerando-se as variáveis climáticas pelo cálculo de Penman-Wilson. 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1 Tipos de rejeitos por teor de umidade, de acordo com Ulrich (2019). Fonte: Souza, 2020..... 13
Tabela 3.2.1 Propriedades de tensão da fundação e do rejeito..... 39
Tabela 3.2.2 Propriedades hidráulicas da fundação e do rejeito. 40

LISTA DE ABREVIAÇÕES

SÍMBOLOS

Gregos

Γ – pressão de vapor de saturação do talude pela curva da temperatura média do ar

Φ[S_R(t), t] – quantidade de precipitação que penetra o interior do solo

T – Tempo entre os eventos de chuva

Ψ – parâmetro de estado

γ’ – peso específico submerso

γ_w – peso específico da água

λ – quantidade de eventos que ocorrem em um intervalo de tempo

σ'_0 – tensão efetiva inicial *in situ*

σ'_{cs} – tensão efetiva no estado crítico

φ – taxa de escoamento superficial

τ_m – tensão cisalhante mobilizada ou tensão atuante

τ_{cis} – tensão cisalhante de ruptura ou tensão disponível

Latinos

A – área de contorno do elemento

[B] – matriz das tensões

[C] – matriz construtiva

D_{50} – 50% da distribuição granulométrica

E_R – fluxo real de evaporação

ET – taxa de evapotranspiração

FEM – *Finit Elements Method*

$\{F_n\}$ – concentração do incremento nodal dos carregamentos

F_p – força de percolação

In – quantidade de água interceptada pelas folhas

Pa – pressão de vapor do ar

PE – precipitação efetiva

L – taxa de percolação

{N} – vetor de linha das funções de interpolação

R – taxa de precipitação

Rad_L – radiação líquida

S_{cis} – Resistência ao cisalhamento

S_m – Força atuante sobre uma fatia

S_r – grau de saturação

Uar – inversa da umidade relativa do ar

Usolo – inversa da umidade relativa do solo

V – volume do elemento

W' – peso submerso

X[S_R(t)] – perda de água no solo

{a} – vetor coluna do incremento nodal dos deslocamentos x e y

b – expoente empírico relativo ao solo

b_c – unidade da intensidade de força sobre o corpo

d – função de b para o cálculo da condutividade hidráulica em solos não saturados

e – erro na modelagem

f(var) – função da velocidade do vento, rugosidade da superfície e difusão do vapor

f_T(T) – distribuição da probabilidade de eventos de chuva

$f_{h_R}(h_R)$ – altura dos eventos de chuva

ì – inclinação da linha de estado crítico no intervalo entre σ'_0 e σ'_{cs}

i_c – gradiente hidráulico

k_{pir} – constante piométrica

k_S – Condutividade hidráulica saturada

k_y – condutividade hidráulica não saturada

m_s – massa de sólidos

m_T – massa total

m_w – massa de água

p – incremento da pressão sobre a superfície

t – tempo

w_G – umidade geotécnica

w_m – umidade metalúrgica

SIGLAS

AEV – *air entry value*

Fs – Fator de Segurança

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

LL – Limite de Liquidez

LP – Limite Plástico

MEF – Método dos Elementos Finitos

MEL – Método do Equilíbrio Limite

MPF – Ministério Público Federal

MG – Minas Gerais

MPMG – Ministério Público do Estado de Minas Gerais

PDR – Pilha de disposição de rejeitos

PNSB – Política Nacional de Segurança de Barragens

USFS – *United States Forest Service*

ABREVIAÇÕES

d – dias

m – metros

s – segundos

ton – toneladas

1. INTRODUÇÃO

A indústria da mineração é atualmente uma das mais importantes e rentáveis do mundo, movendo bilhões de dólares anualmente, empregando milhares de trabalhadores e oferecendo matéria prima para diversas outras indústrias. Com a expansão da economia e o crescimento da população global, sua tendência é de aumentar a exploração sobre os minérios. Devido ao seu tamanho, é um setor com enorme geração de rejeitos, especialmente devido aos métodos de beneficiamento tradicionalmente utilizados.

O método mais utilizado hoje para dispor dos rejeitos de mineração é o barramento, que os retém na forma de lama. Foi visto que este é um método que apresenta grandes riscos ambientais e sociais, uma vez que erros no projeto podem facilmente levar à aumentos de poropressão no interior das pilhas, e resultar na liquefação, como ocorreu em Brumadinho, MG. Além disso, os métodos de alteamento à montante das barragens, apesar de reduzirem os custos de sua construção, devem ser muito bem planejados, pois reduzem drasticamente a estabilidade da estrutura.

Na busca por formas mais seguras e interessantes ao mercado de se dispor os resíduos de mineração, as Pilhas de Rejeito Filtrado surgem como uma opção a princípio simples e estável. Entretanto, essa tecnologia era usualmente utilizada em pequena escala e em regiões com pouca disponibilidade hídrica, de modo que se geram questionamentos sobre a segurança das pilhas quando construídas em regiões de clima tropical, para atender a grandes volumes de rejeito.

1.1. CONTEXTO GERAL

A atividade mineradora esteve presente na sociedade humana desde as origens das civilizações, e vêm desempenhando um importante papel no desenvolvimento e avanço desde então, fornecendo materiais e matérias primas para diversas indústrias e ajudando a moldar o estilo de vida das pessoas. Os primeiros esforços na prospecção de materiais minerais datam do período pré-histórico, onde antes mesmo da origem do *homo sapiens* já se têm registro de ferramentas feitas de pedras lascadas; esses materiais eram selecionados na natureza e tinham seu formato alterado para realizar tarefas naquele período, já a 2,6 milhões de anos atrás (Earth Systems, 2006).

Com a transição do estilo de vida da nossa espécie, que foi deixando de ser predominantemente nômade para se estabelecer em territórios, ocorreu um destaque para o uso de recursos minerais. A primeira mina com exploração específica de um tipo de mineral foi encontrada na região sul do

continente africano e foi explorada entre 40.000 e 20.000 anos no passado, sendo o recurso explorado a hulha. Os recursos minerais permitiam às sociedades se estabelecerem em casas fixas, delimitar terrenos e alterar o espaço ao seu redor, para criar plantações e domesticar animais, além de se manterem aquecidos a noite; como efeito, entre os anos 8.000 e 5.000 a.C., o estabelecimento das primeiras grandes civilizações foi acompanhado do crescimento da exploração mineral. Até então, metais só eram usados se fossem encontrados na natureza já em forma metálica, como é o caso do cobre (Earth Systems, 2006).

O uso do fogo, por sua vez, foi essencial para o desenvolvimento da mineração. À medida que se avançavam as técnicas de manipulação de materiais minerais, como a argila, descobriu-se que o fogo pode alterar suas propriedades. Isso levou a avanços nas técnicas de olearia, que eventualmente levou à criação da fundição, ou seja, a extração de minerais metálicos de minérios rochosos; em 4.000 a.C. os egípcios e sumérios já fundiam ouro e prata. Com tais práticas, ocorreu a valorização dos metais como ferramentas de troca e adornos, também se criou uma nova variedade de tecnologias que facilitavam o trabalho e o estilo de vida, mais leves que as de pedra e com mais precisão. Paralelo a isso, o fogo pôde ser usado para fraturar rochas, facilitando o acesso da humanidade a veios profundos de minérios e a mineração subterrânea (Earth Systems, 2006).

No ocidente, os avanços e transformações das atividades de mineração estiveram sempre correlacionadas às mudanças civilizatórias e sociais. Com o crescimento dos povos mediterrâneos, como as cidades gregas e os grandes impérios macedônico e romano, o uso de metais e minérios ganha proporções monumentais, criando uma vasta rede de comércio para circular equipamentos militares, ferramentas de trabalho manual e de uso cotidiano. Durante a Alta Idade Medieval, onde se tem redução do comércio e retração da sociedade europeia a pequenas vilas, a exploração de minérios também se retrai; ela só tornaria a se valorizar a partir do declínio deste período histórico, onde governantes concediam direitos amplos aos exploradores de minerais, estimulando a atividade. Com as grandes navegações e a colonização de terras americanas e africanas, a indústria ganha um patamar internacional e passa a impulsionar a economia global (Earth Systems, 2006). Por fim, com a revolução industrial, novas tecnologias surgem, gerando tanto demanda quanto favorecendo a exploração mineral, que se mantém crescendo até os dias de hoje (General Kinematics®, web).

Atualmente a indústria de exploração mineral se adequou para atender uma ampla gama de demandas. Seus produtos estão presentes em quase todos os setores da sociedade, como construção civil, automóveis, rodovias e ferrovias, computadores, celulares, fertilizantes e mais. Existem diversos minérios que são explorados, processados e comercializados, como o ferro, cobre, carvão, alumínio, cobalto, diamante, lítio, ouro, prata, entre outros (Venditti, 2021).

Quanto à indústria global, esta é composta pela comercialização de commodities, que por sua vez servirão de matéria prima para outras indústrias. Em termos de capitalização, as duas maiores empresas no mundo são a BHP e a Rio Tinto, ambas australianas, com capitalização de mercado de US$179 bilhões e US$132 bilhões, respectivamente; A BHP explora primariamente ferro, cobre e carvão mineral, enquanto a Rio Tinto explora ferro, alumínio e cobre. Em terceiro lugar fica a Vale, com capitalização de US$112 bilhões, sendo a maior produtora de minério e pelotas de ferro do mundo. A Figura 1.1.1 ilustra as maiores mineradoras do mundo, por capital de mercado e seus principais produtos (Venditti, 2021).

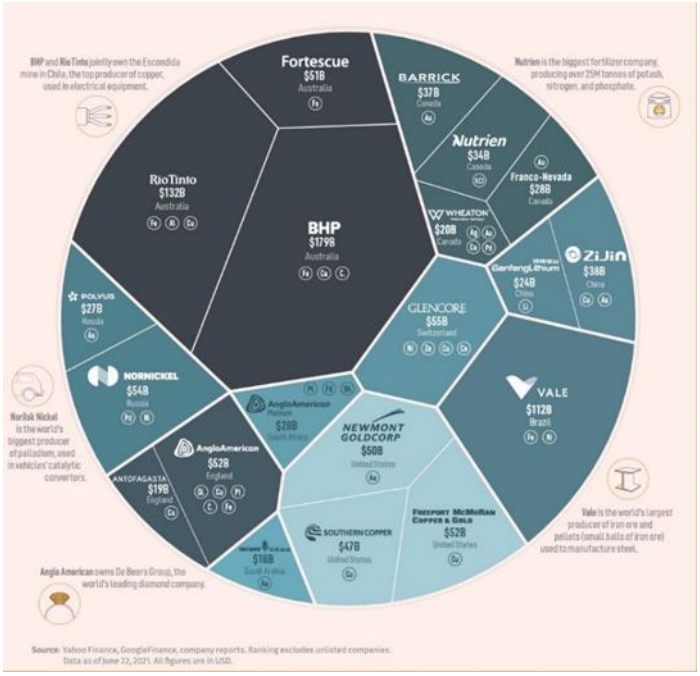


Figura 1.1.1 Gráfico com as principais empresas de mineração do mundo, com capital acumulado e principais minerais explorados. Adaptado de: Venditti, 2021.

Desde 2017, observou-se uma tendência de crescimento nas receitas da indústria de mineração, com aumento estimado em 12% ao ano dos gastos de capital. A pandemia de COVID-19, por sua

vez, retardou este processo: o número de empreendimentos impactados foi de 1.600, um prejuízo equivalente a US$212 bilhões (E&MJ, 2021). Ainda assim, devido às novas tecnologias e ao trabalho remoto, o setor não foi gravemente atingido pela crise global (Venditti, 2021).

A maioria dos projetos foi postergada, e em 2020 foram ativadas 240 novas minas; um número menor, mas esperado, pois, elas tendem a ser mais remotas e possuírem maior custo de operação (E&MJ, 2021). Para o ano de 2022, é esperado uma arrecadação de 1,86 trilhões de dólares; este valor se deve à maior busca por fontes renováveis de energia, que por sua vez dependem de mais recursos minerais, como lítio, cobre, estanho – para 2024, espera-se que 33% da energia mundial seja de origem renovável (Venditti, 2021).

Os minerais de uso comercial se apresentam, muitas vezes, na forma de minérios, isto é, um conjunto de minerais geralmente sem valor de mercado. Para que adquiram valor, passam por um processo que separa o mineral desejado do indesejado. A este processo denomina-se beneficiamento. Os minérios são extraídos de veios rochosos presentes na terra, e sua exploração pode ser tanto de superfície quanto subterrânea. Após sua escavação, é realizada a etapa de beneficiamento, ou seja, a extração do mineral desejado que integra o minério coletado, e sua separação dos materiais sem valor de mercado (Cristal Jr, 2020).

A primeira etapa do beneficiamento é a cominuição, que passa pela britagem e a moagem, ou fragmentação fina. Esta é a etapa onde é feita a quebra física dos minerais, para facilitar sua separação posteriormente. O peneiramento vem entre a britagem e a moagem, e consiste em separar os fragmentos de minério em duas ou mais classificações, aplicando-se peneiras com diâmetros de orifícios específicos aos materiais selecionados. A classificação, por sua vez, se utiliza da diferença de propriedades das partículas para verificar sua precipitação em meio fluido, que pode ser a água ou o ar. Ao fim do processo, ocorrem os métodos de concentração de minerais, técnicas que visam agregar os minerais contidos em um minério; o objetivo é obter minérios com o máximo de concentração possível do mineral. Os métodos mais comuns são o densitário e a flotação, que se utilizam da diferença de propriedades dos materiais, no primeiro a densidade e no segundo a molhabilidade. Os métodos magnético e elétrico são recentes, e interessantes por reduzir a geração de resíduos, mas com a desvantagem de serem caros e consumirem muita energia. Ao fim, o minério de interesse é coletado, e a porção remanescente é disposta como rejeito (Cristal Jr., 2020). A Figura 1.1.2 apresenta o fluxograma com as etapas do beneficiamento do minério:

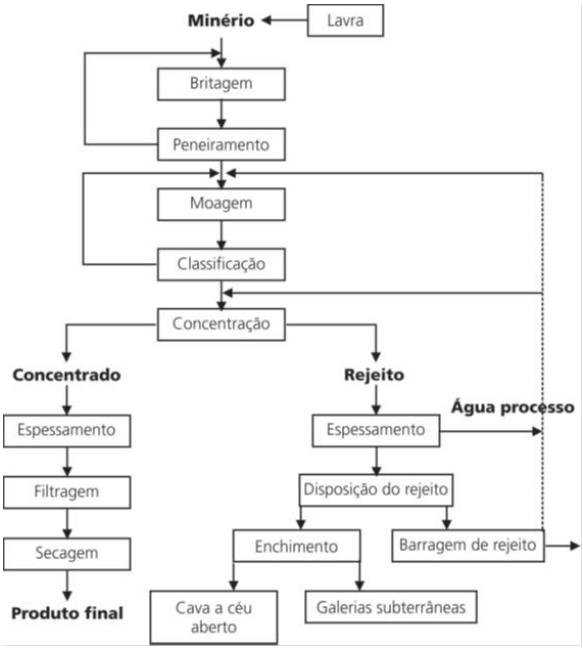


Figura 1.1.2 Fluxograma do processo de beneficiamento do minério, com destinações do rejeito. Fonte: Cristaljr, 2020.

A atividade mineradora gera dois tipos de resíduos em grande quantidade: os resíduos estéreis e os rejeitos. Resíduo estéreo é o nome dado ao material escavado, é composto basicamente pelas rochas removidas para se chegar aos veios de minério. Esse material, a princípio, não apresenta risco ambiental físico ao local de disposição ou à saúde humana, e pode ser despejado sem maiores preocupações (VGR, 2021). Ainda assim, incorre-se no risco de eventual acidificação da água, bem como a possibilidade de escorregamentos.

A maior problemática atual da atividade mineradora, no que diz respeito a resíduos, são os rejeitos. Eles são produto do processo de beneficiamento, compostos por minérios pobres – com pouca concentração de mineral – e de granulometria fina, areia e água; seu aspecto é de lama, sendo de difícil manipulação e, dependendo do tipo de rejeito, pode apresentar impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (Laminatus, 2019; VGR, 2021). Ainda que muitos dos rejeitos sejam inertes e não tóxicos, acidentes envolvendo o espalhamento deste no solo continuam sendo uma preocupação para populações humanas próximas e ambientes naturais.

Atualmente, o método mais usual de disposição de rejeitos de mineração é a construção de barragens de rejeitos. São obras de engenharia de grandes dimensões que alagam uma certa área com rejeitos de mineração e tem um tempo de operação específico. Com o tempo, espera-se que

estes rejeitos se depositem no fundo das barragens, favorecendo as operações de alteamento, isto é, o aumento vertical da barragem para comportar maiores volumes de rejeito. O alteamento atualmente pode ocorrer de três formas: à jusante, à montante e em linha de centro (Geoscan, 2020). A Figura 1.1.3 apresenta os modelos de construção de barragens atualmente realizados:

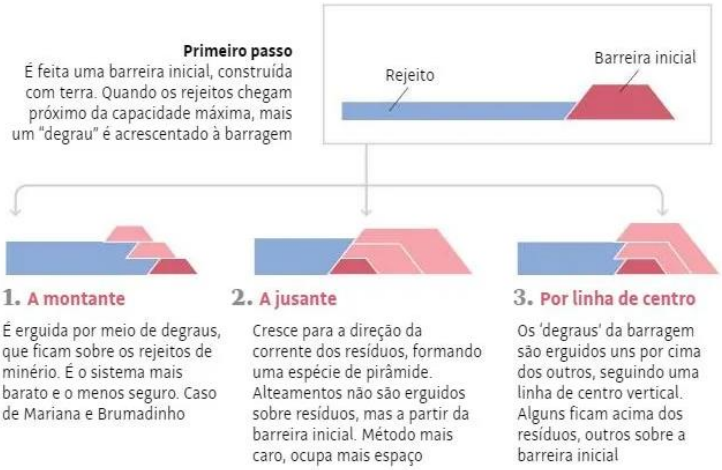


Figura 1.1.3 Tipos de barragem de deposição de rejeitos. Fonte: AESBE, 2019.

As barragens com alteamento à jusante são mais caras, pois esta opção consiste em aumentar a barragem como em uma pirâmide, construindo na face oposta aos rejeitos; com efeito, uma maior área de construção e mais materiais são requeridos. Já as barragens à montante são populares por se tratar de um método mais barato de construção, que demanda menos custos e recursos. Neste sistema, se usa os rejeitos depositados no fundo para se fazer o alteamento, servindo de base para as outras camadas da barragem. É um método que, se não houver um bom controle e a adoção das boas práticas e de monitoramento, apresenta alto risco de acidentes. Por fim, a barragem de linha de centro é um método com custos intermediários, cuja expansão ocorre como no alteamento à montante, com drenos que acompanham o alteamento e lançam os rejeitos a partir da crista do dique inicial. Barragens de maneira geral apresentam grande risco operacional e demandam forte fiscalização. A Lei Federal nº 12.334/2010 traz normativas que definem os critérios de segurança para as barragens de rejeitos (Brasil, 2010). Esta lei foi atualizada em 2020 pela Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020 (Brasil, 2020).

Além das barragens convencionais, outro método que vale destacar é o empilhamento drenado, onde se adota uma estrutura drenante de barramento, que permite a passagem de água livre por seus poros, e conta com uma rede de drenos para garantir sua estabilidade.

Por fim, os métodos que vem se difundindo por minimizarem os riscos ambientais da disposição de rejeitos são os métodos de empilhamento seco, que consistem em técnicas de desidratação dos rejeitos, aproximando-os de propriedades sólidas, facilitando sua manipulação. Um modelo que vem sendo amplamente usado, mas que ainda conta com poucas pesquisas, é o modelo da pilha de rejeitos filtrados; este consiste no uso de filtros de disco à vácuo. O rejeito filtrado passa a ter uma maior concentração de sólidos, denominado *dry cake*, embora na prática não seja seco, se tratando de um material não saturado.

Como supracitado, a maior parte dos rejeitos de mineração no mundo são armazenados em barragens de rejeito, onde se mantêm em sua condição saturada e acima do Limite de Liquidez (LL). Davies (2011) fala em lamas de rejeito com teor de sólidos na ordem de 25% a 60%, que apresentam desafios devido ao alto teor de umidade, tanto em sua operação quanto no seu fechamento. Anteriormente, pilhas de rejeitos filtrados eram consideradas primariamente para operações inferiores a 20.000 toneladas/dia, uma tendência que já vinha demonstrando certa mudança (Davies et al, 2011). Essa opção ganhou mais destaque após diversos problemas em barragens e falhas catastróficas (Amoah, Dressel e Fourie, 2018), sendo dois exemplos marcantes os acidentes de Brumadinho e Mariana (MG). Outros fatores que deram ênfase aos métodos secos foram o aperfeiçoamento das tecnologias de desidratação e de filtragem e a maior demanda social e política por usos mais conscientes da água e de recursos naturais e energéticos (Davies, 2011).

Como efeito, o número de pilhas de rejeito filtrado vem crescendo, e em 2011 já superava a quantidade de rejeitos em pasta superficial (Davies, 2011; Ulrich e Coffin, 2013); ainda assim, o modelo de pasta superficial é amplamente mais estudado, com mais de 200 publicações, possuindo até guias de operações. Por outro lado, os rejeitos filtrados tem pouco material publicado, e quase nunca se fala sobre sua operação em convenções (Davies, 2011). O motivo da falta de material ainda é uma incógnita, mas Ulrich e Coffin (2013) levantam a possibilidade de isto transcorrer da simplicidade do método e de sua operação, em especial por ser mais aplicado à pequenos empreendimentos. Porém, vale ressaltar que com o melhoramento tecnológico e as demandas ambientais podem levar a plantas de projetos cada vez maiores; os autores citam o caso

mencionado pela US Forest Service (USFS) (2010, apud Ulrich e Coffin, 2013), que reportou uma operação que visava produzir 68.000 toneladas/dia de rejeitos de mineração, chegando a uma pilha de 311 milhões de toneladas e altura de 150 m.

A ausência de informações e material sobre pilhas de rejeitos filtrados tem levado projetistas a tomarem decisões ruins de projeto e operação (Davies, 2011). Também pode ser notado uma lacuna no conhecimento sobre o comportamento geomecânico nos rejeitos não saturados (Amoah, Dressel e Fourie, 2018), situações que devem ser contornadas para atender à crescente demanda do mercado de mineração, garantindo as boas práticas, a segurança de seus operadores e minimizando os impactos ambientais, sociais e econômicos desta atividade. Neste sentido, um dos fatores de maior relevância no estudo das pilhas de rejeitos filtrados é seu comportamento hidromecânico, ou seja, como o rejeito vai reagir às mudanças da concentração de umidade em seu meio. Em uma circunstância em que a saturação do solo atinge valores elevados, pode ocorrer o fenômeno da liquefação, onde o solo volta a adquirir consistência de lama, o que promoveria desabamentos.

O presente trabalho propõe uma abordagem numérica para a questão hidromecânica das pilhas de rejeito, observando a relação destas estruturas com os aspectos climatológicos que podem interferir nas poropressões e nas taxas de infiltração.

1.2. MOTIVAÇÃO

Atualmente os complexos mineradores, em sua maioria, dependem de barragens para dispor os rejeitos em sua forma líquida. Embora avanços tenham sido feitos em novas tecnologias, os métodos tradicionais ainda se apresentam como mais baratos e vantajosos nas estratégias das empresas, em especial as barragens com alteamento à montante, que reduzem em muito os custos com construção ao se utilizar do próprio rejeito sedimentado como material de construção. Recentemente, porém, esta tecnologia foi cada vez mais questionada, ao ponto de ser proibida no Brasil.

Os acidentes com a barragem do Fundão, em Mariana (MG) e com a barragem I do Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), podem ser vistos como um marco na preocupação com o uso do alteamento à montante. Em 2015, o rompimento da barragem do Fundão liberou cerca de 60 milhões de metros cúbicos de lama na região, deixou 19 mortos e contaminou grande parte do rio doce, levando a uma alta na mortandade de espécies aquáticas e a prejuízos econômicos e sociais na região (MPMG, 2020). No início de 2019, houve o desabamento da barragem I do Córrego do

Feijão, que inundou o corpo d'água com 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos, deixando 272 pessoas mortas e seis desaparecidas; a lama ainda percorreria mais 300 km, afetando 18 municípios (Rodrigues, 2019; Andes, 2022).

O acidente da Barragem I na Mina Córrego do Feijão em Brumadinho ocorreu devido ao fenômeno da liquefação, onde o aumento das poropressões leva à redução da resistência ao cisalhamento à medida que as tensões efetivas se aproximam de zero; o colapso ocorreu quase de forma imediata, o que dificultou uma reação (MPF, 2021). O desabamento da Barragem do Fundão, por sua vez, ocorreu por diversas falhas que se acumularam ao longo do tempo, sendo que a barragem vinha apresentando problemas desde 2010. A causa última, apontada pelo Ministério Público do Estado de Minas Gerais, foi um recuo feito no eixo da barragem, que passou a ser sustentada por zonas onde o rejeito não estava devidamente consolidado (Aquino, 2016). Os acidentes com ambas as barragens, como mencionado acima, causaram impactos de ordem social, econômica e ambiental, que se estendem pelos anos subsequentes, como a infertilidade do solo nas regiões, a mortandade de espécies e a cobertura do solo com o material mineral, pobre em nutrientes. O Brasil conta atualmente com 839 barragens de rejeitos, apresentadas na Figura 1.2.4 por volume de rejeitos armazenados (Carmo et al., 2020). Muitas destas são com alteamento à montante, e diversas apresentam riscos de desabamento.



Figura 1.2.1 Barragens de rejeito no Brasil, diferenciadas por área alagada e minério explorado. Fonte: Carmo et al, 2020.

Com a preocupação crescente sobre a segurança das barragens, em especial o método de alteamento à montante, iniciou-se um movimento na sociedade civil para evitar este tipo de solução. Isso culminou na lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020, que altera a lei nº 12.334/2010, responsável por estabelecer a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Quanto as barragens à montante, em seu artigo 2-A, determina a proibição da construção por este tipo de método; no inciso 2 estabeleceu-se um prazo até o dia 25 de fevereiro de 2022 para a descaracterização de empreendimentos desta natureza em funcionamento (Brasil, 2020).

Para substituir as barragens, é necessário haver um investimento e um olhar mais aprofundado em tecnologias alternativas. O uso de rejeitos desidratados tem ganhado destaque nos últimos anos, com o avanço da tecnologia necessária para produzi-los e a redução significativa dos impactos e riscos ambientais que esses métodos apresentam. Por isso, mais pesquisas devem ser conduzidas com o objetivo de ampliar os conhecimentos sobre os rejeitos e seu comportamento não saturado, de modo a garantir segurança nos futuros projetos e um atendimento à alta demanda do setor. Os

rejeitos filtrados, assim, desempenham um papel importante, por serem estáveis e com capacidade de autossuporte, podendo assim serem empilhados e reduzindo as estruturas externas necessárias para sua manutenção.

1.3. OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo analisar o comportamento apresentado por uma pilha de rejeitos de mineração genérica e sem drenagem, modelada no software GeoStudio (GeoSlope International Ltd.®), construída em camadas ao longo de um período de tempo pré-determinado e submetida aos fatores climáticos de precipitação e evaporação, afim de verificar quais esforços e dinâmicas estão previstos para ocorrer nela. Pretendeu-se, especificamente, observar a evolução da poropressão ao longo do período de construção da pilha, bem como as tensões efetivas e a evolução do fator de segurança. De acordo com as tensões da pilha, buscou-se determinar se as condições climáticas reais gerariam riscos de saturação e liquefação; enquanto com o fator de segurança se objetivou determinar a estabilidade do talude aos esforços provocados.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Até recentemente, foram conduzidos poucos estudos a respeito das PDR, especialmente comparando-se a outros métodos de disposição. Entretanto, a quantidade de plantas sendo construídas vem aumentando gradativamente, devido ao barateamento do custo da filtragem destes materiais e às demandas socioambientais cada vez mais constantes.

Um projeto bem elaborado de uma pilha demanda entendimento das características mecânicas e hidráulicas do rejeito, seu grau de compactação e as características climáticas e geomorfológicas do ambiente onde ocorre a construção. Neste sentido, pesquisadores e engenheiros vêm apresentando conhecimentos valiosos para melhor contribuir em projetos de PDR, para diferentes condições climáticas.

2.1. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

No método convencional de disposição de rejeitos, estes se apresentam na forma de lama, contendo entre 25% e 60% de sólidos (Davies, 2011); Davies et al. (2011) fala de valores típicos entre 30% e 40% de teor de sólidos. Desta forma, os rejeitos ocupam muito volume em uma forma líquida, o que demanda a construção de vastos reservatórios para armazená-los. Devido à baixa densidade e aos altos volumes de água, os modelos convencionais apresentaram diversas falhas catastróficas,

justificando a busca por novas tecnologias (Amoah et al, 2018). Para Souza (2020) um dos maiores problemas da disposição convencional de rejeitos é a liquefação, caracterizada pela perda elevada de resistência de um material (Ferreira, 2018, apud Souza, 2020), causada por um acréscimo das poropressões sob carregamentos não drenados. Neste caso, como aponta o autor, a maior dificuldade está em identificar os gatilhos que poderão desencadear o fenômeno; isto justifica cautela na escolha pelo método tradicional. Para contornar o problema, buscaram-se medidas de remoção do conteúdo líquido dos rejeitos, como o estudo sobre pastas de alta densidade, com conteúdo de sólidos entre 60% e 70%; nestes casos, o rejeito ainda era armazenado com altos valores de umidade, em condição de saturação (Amoah et al, 2018). A Figura 2.1.1 apresenta como exemplo os contornos de incremento da força de cisalhamento da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão, em Brumadinho, MG, que sofreu o efeito da liquefação em janeiro de 2019 (CIMNE, 2021):

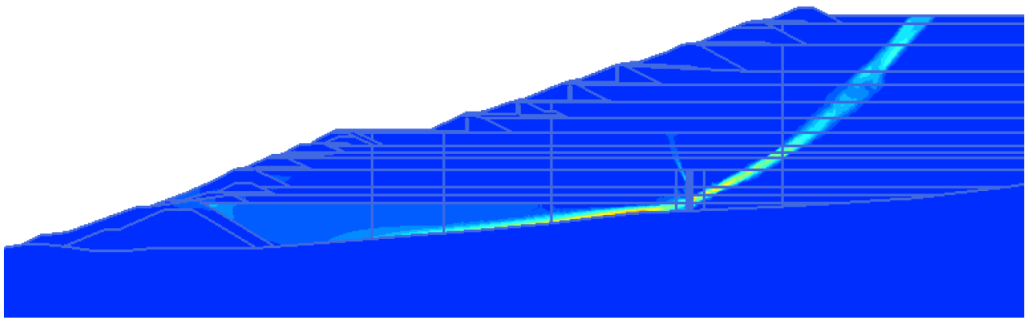


Figura 2.1.1 Contorno das linhas de incremento das tensões cisalhantes da barragem I do Córrego do Feijão, Brumadinho, MG, apontando a superfície onde ocorreu a liquefação. Fonte: CNME, 2021.

Com os avanços em tecnologias de desidratação, permitiu-se o surgimento de vários estados não-saturados para os rejeitos de mineração, facilitando a adoção de novas tecnologias de disposição (Davies, 2011). Para Davies et al (2011), qualquer rejeito pode ser considerado desidratado se houver a remoção de água entre a extração do mineral de interesse e o alocamento na área de disposição. A Tabela 2.1.1 divide o rejeito em quatro categorias, de acordo com seu teor de sólidos e em função de uma tensão em campo, que é a requerida para iniciar o deslocamento do material, de acordo com Ulrich (2019, apud Souza, 2020) e Ulrich & Kerr (2011, apud Souza, 2020).

Tabela 2.1.1 Tipos de rejeitos por teor de umidade, de acordo com Ulrich (2019). Fonte: Souza, 2020.

	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

Quanto aos rejeitos não saturados, pode-se dizer que quanto mais se reduz a umidade, maiores serão os custos de transporte e manuseio, em contrapartida os rejeitos estarão mais aptos a serem utilizados como autossuporte, dispensando a construção de barragens para contê-los (Davies, 2011). Em baixas densidades, o rejeito pode ser bombeado para seu local de disposição; porém, com o aumento da densidade, seu bombeamento vai se tornando inviável, e este precisará ser deslocado por esteiras ou caminhões (Lupo e Hall, 2010; Davies et al, 2011).

Com o crescimento das tecnologias de rejeitos desidratados, surgiu a crença de que seriam eliminados os tanques de retenção para os rejeitos. Davies et al. (2011) contradizem esta percepção; segundo os autores, o único método capaz de descartar os tanques é a pilha de rejeitos filtrados, havendo capacidade do sistema de suportar a quantidade de rejeito filtrado. De acordo com o que foi apontado por eles, um motivo para tal idealização é a vasta quantidade de obras recentes que afirmam a eliminação dos tanques com a aplicação das técnicas de desidratação do rejeito. Os autores citam ainda casos diversos, em especial no Canadá, onde projetos de PDR tiveram que comportar grandes áreas de armazenamento para se adequar a outros requerimentos exigidos.

2.2. AVANÇO E DISSEMINAÇÃO DOS REJEITOS FILTRADOS

A tecnologia de filtragem de resíduos começou a ser pesquisada nos anos 1990, embora apenas em anos posteriores viesse a tomar destaque. Avanços nas tecnologias de pressurização e câmaras a vácuo possibilitaram a viabilidade econômica deste método, que inicialmente atendia apenas a pequenos projetos com baixas quantidades de resíduos. Isto pode ser visto como um dos motivos de se haver poucas pesquisas em relação a outros métodos de disposição (Ulrich e Coffin, 2013).

O método de empilhamento de rejeitos filtrados era recomendado inicialmente apenas áreas de projeto que atendessem aos seguintes requisitos (Davies, 2011):

1. Instaladas em regiões áridas, onde é necessária a conservação dos recursos hídricos;
2. Possuírem uma recuperação econômica através do uso da filtração;
3. Onde a presença de abalos sísmicos poderia afetar a integridade de barragens;
4. Situadas em regiões frias, onde se tem dificuldade no manuseio da água durante o inverno;
5. Onde as condições topográficas inviabilizam a utilização de métodos convencionais de disposição ou grandes volumes de rejeito;
6. Os custos de manutenção e/ou encerramento de uma barragem seriam superiores aos de um empilhamento de rejeitos filtrados.

Davies (2011) afirma que, até aquele momento, os principais motivos que levariam à construção de PDR seria a recuperação de água e devido às condições topográficas desfavoráveis.

Nesta forma de disposição, os rejeitos passam primeiro por um processo de desidratação convencional, seguindo depois para uma planta de filtração, com o objetivo de acelerar sua consolidação (Lupo e J. Hall, 2010, apud Souza, 2020). A umidade na unidade de saída deve ser próxima à ótima (Ulrich e Coffin, 2013). Os rejeitos são então empilhados em um local destinado, onde passam por um procedimento de compactação de "Proctor", de modo que sua umidade após a compactação se encontra pouco abaixo à saturação total (Ulrich e Coffin, 2013). O rejeito é empilhado de forma densa, estável e não saturada, de modo a garantir a redução dos deslocamentos e a melhora nas propriedades de engenharia do material (KCB, 2017, Ulrich, 2019, apud Souza, 2020; Davies et al, 2011). A resistência da pilha depende assim das condições de drenagem, do teor de umidade, da densidade e granulometria do material (Lupo e Hall, 2010, apud Souza, 2020). Conforme Amoah et al (2018), os avanços nas técnicas de empilhamento seco requerem um maior entendimento dos princípios mecânicos do solo não saturado.

Mundialmente, o número de PDR é similar à de outros métodos de disposição de rejeitos desidratados, como a pasta adensada; ainda assim, a atenção dada ao segundo método é bem maior que ao primeiro, possuindo mais de duzentas publicações e contando com guias de projeto e operação (Davies, 2011). A Figura 2.2.1 detalha a evolução da quantidade cumulativa de métodos de disposição de rejeitos desidratados.

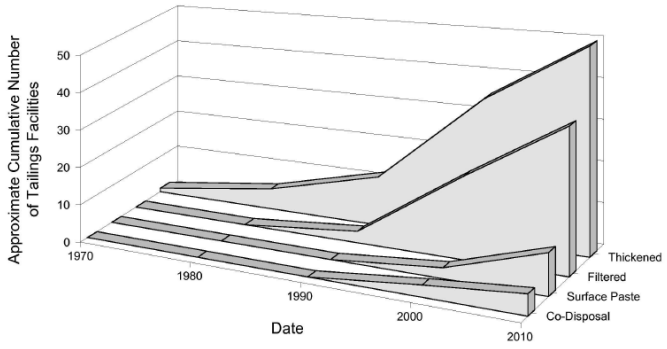


Figura 2.2.1 Número cumulativo de instalações de rejeitos desidratados. Fonte: Davies, 2011.

Por outro lado, de acordo com Ulrich e Coffin (2013), houve um rápido crescimento no uso da tecnologia de filtração aplicada aos rejeitos, que se soma à uma tendência de utilização deste método para operações de maior porte. Até 2001, de acordo com Davies e Rice (2001, apud Ulrich e Coffin, 2013) o limite máximo de produção das plantas de filtragem seria de 14.000 toneladas por dia. Em 2013, Ulrich e Coffin (2013) relatam projetos com capacidade quase cinco vezes maior; a USFS (2010, apud Ulrich e Coffin, 2013) apresentou operação com 68.000 ton/dia de rejeitos filtrados produzidos, com uma pilha projetada para chegar a 150 m de altura. Robertson et al (2017) também afirma que está se tornando relativamente comum se construírem pilhas com mais de 100 m de altura.

Davies (2011) esclarece que uma vantagem das pilhas de rejeito filtrado em relação às barragens é a amplitude da faixa de topografias em que podem ser operadas; como mencionado anteriormente, barragens contam com uma limitação de terreno, que é bem menor para as pilhas. A condição mais importante, no que diz respeito a topografia, é evitar o escoamento de água, superficial ou subterrânea, que passe pela pilha (Davies, 2011). Para isso, é comum a utilização de sistemas de controle de escoamento, que desviam e drenam os possíveis fluxos de água que passam pela pilha (Davies, 2011).

O grau de desidratação alcançado nos rejeitos depende dos fatores a seguir (Davies, 2011):

- Tecnologia de filtração adotada;
- Taxa de aplicação do resíduo na tecnologia;
- Características físicas do rejeito.

2.3. CARACTERIZAÇÃO DA PILHA DE REJEITOS

Os rejeitos filtrados são rejeitos não saturados que se apresentam na forma sólida, com teor de umidade abaixo do limite líquido do material (LL), com grau de saturação ótimo entre 60 e 80% (Davies e Rice, 2001, apud Ulrich e Coffin, 2013). Segundo Davies (2011) os rejeitos filtrados podem ser usualmente denominados bolo seco e apresentam saturação entre 70% e 85%; sua umidade deve ser o suficiente para preencher a maioria de seus poros, mas não pode ser tão alta ao ponto de prejudicar o grau ótimo de compactação. Amoah, et al (2018) classificam que o empilhamento seco dos rejeitos filtrados deve ocorrer à uma umidade igual ou menor ao limite plástico do material (LP).

Robertson et al (2017) concluíram, com base na curva de distribuição dos grãos, que os rejeitos podem ser classificados predominantemente como entre silte arenoso a areia siltosa, tendo sua granulometria média (D_{50}) de cerca de 0,065mm, sendo um solo predominantemente não-plástico. De acordo com Robertson et al. (2017) o grau de saturação do rejeito filtrado se encontra entre 10 a 20%, com sucções variando entre 50 e 100 kPa e um comportamento não saturado até 100 metros de profundidade. Gorakhki et al. (2019, apud Souza, 2020) afirmam que o valor de entrada de ar nos materiais que constituem a pilha varia entre 20 e 56 kPa. Lupo e J. Hall (2010) apresentam, na Figura 2.3.1, a relação entre a granulometria de onze tipos de rejeitos de mineração em seu estudo e o percentual de finos por massa, demonstrando que, de maneira geral, os rejeitos possuem uma distribuição granulométrica similar.

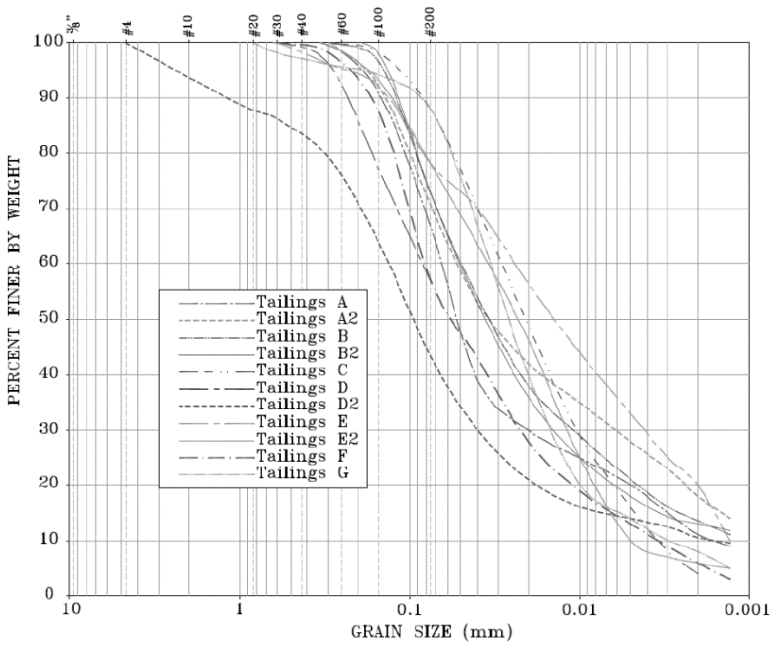


Figura 2.3.1 Percentual de finos por massa pelo tamanho dos grãos dos rejeitos. Fonte: Lupo e Hall, 2010.

Lupo e J. Hall (2010) afirmam que a condutividade hidráulica dos rejeitos tende a ser bem baixa, da ordem de 1×10^{-6}cm/s, sendo esse aspecto determinado pelo percentual de finos, mineralogia e densidade do material. Outro fator importante levantado pelos autores foi a compressibilidade, que concluíram haver grande diferença entre os tipos de rejeito, podendo ser muito ou pouco compressíveis, como demonstrado na Figura 2.3.2, que apresenta o gráfico da saturação pela altura da coluna de rejeito, onde o rejeito A demonstra baixa compressibilidade, enquanto os rejeitos B e B2 se mostram bem compressíveis.

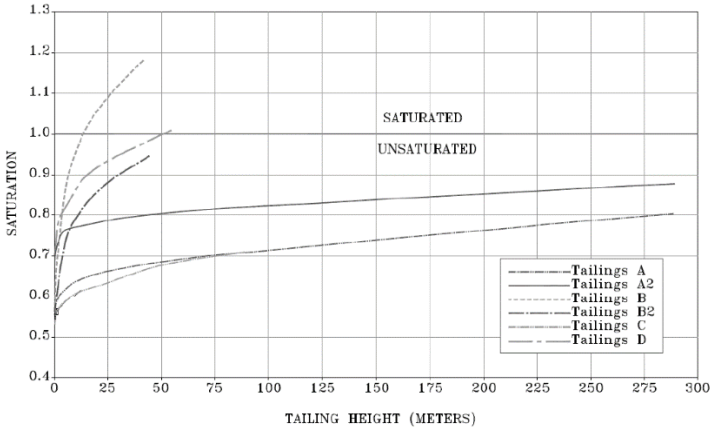


Figura 2.3.2 Altura da coluna de rejeito pela saturação, para seis tipos de rejeitos distintos. Fonte: Lupo e Hall, 2010.

Devido às suas propriedades, o rejeito pode ser empilhado sobre si mesmo ou ainda em mistura com o estéril de mineração; neste caso, une-se a baixa compressibilidade e as demais propriedades mecânicas do estéril com a alta resistência ao cisalhamento e as propriedades hidráulicas do rejeito, com o objetivo de melhorar a estabilidade da pilha (Souza, 2020). Para este trabalho, porém, será observado apenas o comportamento da pilha de rejeitos pura.

2.4. CONSIDERAÇÕES PARA A CONSTRUÇÃO DAS PILHAS

Lupo e Hall (2010) consideram, para o projeto das pilhas, que devem ser observadas as características de força de cisalhamento, permeabilidade e compressibilidade do material. Segundo os autores, para se determinar a altura que se pode construir da pilha, uma análise de estabilidade deve ser feita, levando em consideração os seguintes critérios:

- Tensão cisalhante de todos os materiais envolvidos no sistema, o que para o presente trabalho representa a pilha e a fundação; recomenda-se que os esforços sejam determinados por meio de estudo em laboratório em condições drenadas e não drenadas, e a análise pode ser usada para estabelecer a possível ocorrência de zonas de saturação na pilha.
- Presença de água de superfície estática;
- Carregamento sísmico e tensões cisalhantes residuais.

A taxa de empilhamento também deve ser levada em conta quando rejeitos apresentarem alto grau de compactação, uma vez que um empilhamento muito rápido pode levar a um excesso de poropressões (Lupo e Hall, 2010). Por fim, os autores consideram ainda a importância de se observar a infiltração e o controle de águas superficiais. Segundo apontado, a infiltração não é um

problema no projeto das plantas, desde que haja um controle eficiente da água que chega pela superfície.

A umidade desejada para os rejeitos deve ser equivalente à umidade ótima do *Proctor* do rejeito (ASTM, 2011, apud Davies, 2011), sendo que para climas úmidos essa varia entre 1% e 2%; é levantada a hipótese de que para pilhas maiores a umidade alvo deve ser próxima à do Proctor modificado (Davies, 2011). Rejeitos filtrados com alta umidade e/ou comportamento plástico podem apresentar a necessidade de um barramento (Ulrich e Coffin, 2013). Assim, a etapa de ciclone ou classificação é de vital importância para a desidratação dos rejeitos (Davies et al., 2011). Em aplicações típicas desta tecnologia, são obtidos materiais abaixo da linha de fluxo com concentração de sólidos por volta de 70% (Davies et al, 2011). Para ter sucesso nessa etapa, uma limitação a se observar é o conteúdo máximo de finos, que garante a quantidade de material desejado e a facilitação da drenagem; com isso, tem-se uma melhor compactação da camada de rejeitos e uma linha freática baixa (Davies et al, 2011). Materiais a cima da linha de fluxo são obtidos no processo com cerca de 30% de concentração de sólidos (Davies et al, 2011).

Para a tomada de decisão no projeto das pilhas, é necessária a realização de testes nos rejeitos para a aquisição de dados relevantes. Davies (2011) descreve três fases de testes: na fase conceitual, são recomendados testes para determinar a mineralogia e granulometria, testes de filtragem, o Proctor Normal para a umidade-densidade, e testes de transporte; na fase de aplicabilidade verifica-se aspectos geoquímicos, comportamento de transporte e umidade-densidade estendida, além de outros fatores; por fim na fase de maior detalhamento avalia-se a umidade variável e a compactação de campo. Testes mais detalhados são recomendados para empilhamentos maiores, como o ensaio triaxial, mas o autor afirma que os programas utilizados atualmente já estimam bem os parâmetros de resistência da maioria dos projetos (Davies, 2011). Davies e Rice (2001, apud Ulrich e Coffin, 2013) apontam os demais parâmetros a serem avaliados:

- Resistência ao cisalhamento e comportamento quando cisalhadas;
- Curva de retenção;
- Condutividade hidráulica.

Ulrich e Coffin (2013) acrescentam ainda os limites de Atterberg como parâmetros importantes de se avaliar nos rejeitos.

No cálculo da umidade, são vistas duas fórmulas, de uso dos metalúrgicos e dos engenheiros geotécnicos, respectivamente:

$$w_m = {}^{m_w}/_{m_T}\ ; \qquad \text{Equação 2.4.1}$$

$$w_G = {}^{m_w}/_{m_s}\ ; \qquad \text{Equação 2.4.2}$$

onde:

$w_m = umidade\ metalúrgica$;

$m_w = massa\ da\ água$;

$m_T = massa\ total\ (sólidos + água)$;

$w_G = umidade\ geotécnica$;

$m_s = massa\ de\ sólidos$ (Ulrich e Coffin, 2013).

A diferença entre as duas equações é relativamente pequena para a maioria dos casos, porém se mostra relevante quando o rejeito apresenta comportamento plástico (Ulrich e Coffin, 2013).

Um dos maiores desafios, de acordo com Amoah et al (2018), para a utilização de rejeitos filtrados é a falta de entendimento dos parâmetros de performance geotécnica das pilhas, devido ao baixo número de projetos em operação.

Amoah et al (2018) analisaram laboratorialmente amostras de rejeitos de magnetita da mina de Karara, no oeste da Austrália, região que apresenta uma taxa de evaporação por precipitação na ordem e 10:1. Os testes de poropressão realizados indicavam de forma consistente poropressões negativas na pilha de rejeitos. Os testes de laboratórios feitos permitiram concluir que, para a região, os rejeitos se apresentavam primariamente como silte, com baixa plasticidade e valores ótimos de umidade na faixa de 13% a 15%. O estudo mostrou que os rejeitos de magnetita apresentam baixo AEV (sucção mátrica onde ocorre a entrada de ar) na ordem de 15 e 18 kPa, de modo que o material perde saturação rapidamente, o que cria poropressões negativas que demandam um alto volume de chuvas em um longo período para se dissiparem. Assim, pode-se concluir que rejeitos filtrados empilhados de forma não saturada, com baixo valor de entrada de ar

(AEV) e baixo regime de chuvas, apresentarão altas sucções mátricas, que governarão o comportamento hidromecânico da pilha (Amoah et al, 2018).

Com relação ao clima, Davies (2011) confirma que pilhas de rejeito filtrado podem ser construídas em localidades úmidas; segundo o autor, uma compactação adequada e a manutenção da umidade alvo garante que a infiltração será desprezível, podendo-se assumir que camadas inferiores terão menos problemas com a saturação. O zoneamento também é uma forma conhecida de se lidar com a variação climática, com a construção de uma camada externa com condições ótimas, ou a utilização do estéril como uma barreira física (Davies, 2011).

2.5. O FENÔMENO DA LIQUEFAÇÃO

Ortigão (2007) define a liquefação como uma condição que ocorre quando as poropressões se elevam ao ponto de anular as tensões efetivas, anulando a tensão intergranular e o atrito entre partículas. É um fenômeno passível de acontecer em solos granulares, em especial areias e siltes finos e fofos, sendo uma preocupação especialmente no caso dos rejeitos de mineração. A liquefação pode ocorrer de forma dinâmica, como resultado de terremotos ou explosões, ou de forma estática, quando fatores naturais como a chuva provocarem um rápido carregamento (Ortigão, 2007). Olson e Stark (2003, apud Robertson, 2017) propuseram uma representação esquemática que ilustra os caminhos possíveis de carregamentos que resultem na liquefação de uma camada de solo. Nela, os autores demonstram que as alterações nas tensões no estado não drenado podem ser promovidas por carregamentos dinâmicos, estáticos ou por deformações no estado de tensão cisalhante maiores que a força de cisalhamento líquido.

A Figura 2.5.1 mostra que, para carregamentos cíclicos ou sísmicos, há variações bruscas na tensão cisalhante, até o ponto de o solo atingir grandes deformações. Carregamentos estáticos, por sua vez, levam a um aumento inicial das tensões, até o ponto em que essas se reduzem e a deformação ocorre.

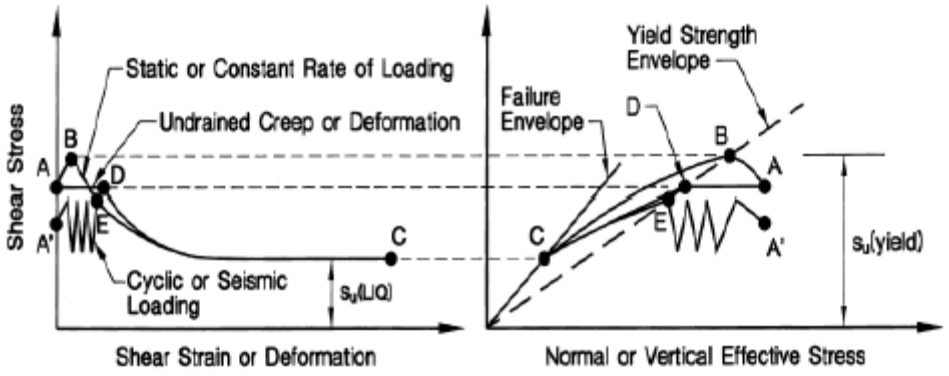


Figura 2.5.1 Resposta não drenada a contração, à esquerda considerando a deformação e à direita a força normal. Fonte: Robertson, 2017.

A liquefação trata-se de um fenômeno que se desenvolve rapidamente, sem tempo para que haja dissipação. Importante ressaltar que o Método dos Equilíbrio Limite não é capaz de determinar a susceptibilidade à liquefação, característico de cada solo. É recomendado que se assumam os gatilhos sempre que os solos forem suscetíveis a perdas significantes de força (Silvis e de Goot, 1995, apud Robertson, 2017). A força de percolação F_p, assim, se iguala ao peso submerso W', de modo que se atinge um gradiente hidráulico dito crítico definido por:

$$i_c = \frac{\gamma'}{\gamma_w}; \qquad \text{Equação 2.5.1}$$

onde:

$\gamma' = peso\ específico\ aparente\ submerso$;

$\gamma_w = peso\ específico\ da$ água (Ortigão, 2007).

Para a maioria dos solos, o peso específico submerso é igual ao peso específico da água, então assume-se que o gradiente hidráulico crítico seja 1 (Ortigão, 2007).

Segundo Robertson (2017) o solo atinge seu estado crítico a altas tensões, sendo esse o resultado da relação entre tensão cisalhante, tensão normal efetiva e índice de vazios. O comportamento de falha pode ser notado em dois tipos de solo: os que dilatam sob grandes tensões e os que contraem; solos saturados que contraem possuem resistência ao cisalhamento sob carregamento não drenado menor que sob um carregamento drenado, enquanto os solos que dilatam apresentam resistência

maior ou igual (Robertson, 2017). Observa-se neste fenômeno que a força de percolação F_p se iguala ao peso submerso W', de modo que se atinge um gradiente hidráulico dito crítico definido por:

$$\frac{\sigma'_o}{\sigma'_{cs}} = 10^{(\frac{\Psi}{\grave{\imath}})} \; ; \quad \text{Equação 2.5.2}$$

onde:

$\sigma'_0 = tensão\ efetiva\ inicial\ in\ situ$;

$\sigma'_{cs} = tensão\ efetiva\ no\ estado\ crítico$;

$\Psi = parâmetro\ de\ estado$;

$\grave{\imath} = inclinação\ da\ linha\ de\ estado\ crítico\ no\ intervalo\ entre\ \sigma'_0\ e\ \sigma'_{cs}$.

A taxa inicial de tensão é definida como (σ'_0/σ'_{cs}) (Robertson, 2017). O gráfico da Figura 2.5.2 mostra a variação do índice de vazios em relação às tensões efetivas. Nota-se que a contração dos solos ocorre acima da linha de estado crítico, enquanto abaixo têm-se a dilatação. O parâmetro de estado pode ser definido como a diferença entre os índices de vazios inicial e de estado crítico.

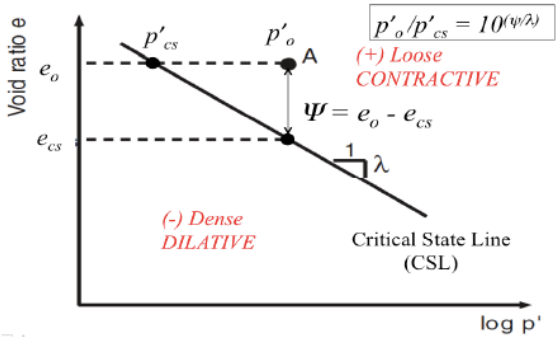


Figura 2.5.2 Relação entre índice de vazios e tensões efetivas. Fonte: Robertson, 2017.

2.6. MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS AO ESTUDO DE ESTABILIDADE DE TALUDES

Um modelo numérico é uma representação matemática de um fenômeno físico. O objetivo da modelagem numérica é se aproximar o máximo possível do observado na natureza, com o mínimo erro possível. Sendo assim, modelos que incorporam mais variáveis e equações tendem a promover

resultados mais aceitáveis; o custo operacional, porém, é igualmente maior. Nesse contexto, o avanço da matemática computacional permitiu um avanço na prática da modelagem.

Modelos numéricos podem simular em períodos curtos situações que levariam dias ou meses na vida real; também permitem um controle maior das condições de contorno e das variáveis externas (Geoslope International Pte Ltd., 2012). A Figura 2.6.1 mostra a vantagem do modelo computacional, ao reproduzir com acurácia o modelo em escala realizado por Rulon de um talude sob uma carga de chuva (1985, apud Geoslope International Ltd., 2012); a primeira trata-se dos resultados em laboratório, e a segunda é a representação no software.

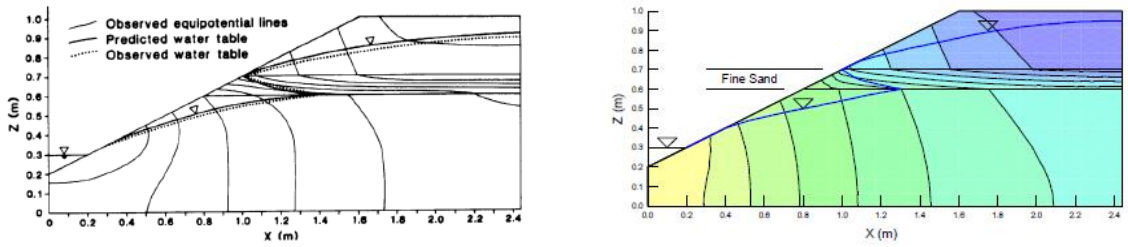


Figura 2.6.1 Comparação entre os resultados do modelo laboratorial em escala de Rulon (à esquerda) e do modelo computacional para o mesmo problema (à direita). Fonte: Geoslope International Ltd., 2012.

As PDR, expostas as condições climáticas, demandam métodos para determinar sua estabilidade à medida que são empilhadas. Diante deste problema, a geotecnia vem se utilizando de métodos computacionais que permitam determinar os carregamentos sobre um talude e sua resistência às tensões cisalhantes que se formam na inclinação. Diante disso, dois métodos são abordados para o presente trabalho: o Método dos Elementos Finitos é usado para discretizar a área de análise, facilitando os cálculos de percolação da água no rejeito e na fundação e a determinação das tensões. Já o Método do Equilíbrio Limite é o que verifica a resistência do talude à ruptura.

2.6.1. Método dos Elementos Finitos (MEF)

Dentre os diferentes métodos computacionais, duas classes de Métodos Numéricos são utilizadas dentro da geotecnia: as diferenças finitas e as projeções (Rincon e I-Shih, 2015); enquanto o método das diferenças finitas busca converter uma equação diferencial em um sistema de equações algébricas, o método das projeções foca em encontrar uma solução aproximada da solução da equação diferencial, combinando as chamadas funções bases. O método de Galerkin se vale deste segundo princípio, utilizando o conceito de ortogonalidade de funções; este faz parte de uma classe conhecida como métodos dos resíduos ponderados (Rincon e I-Shih, 2015). O Método dos

Elementos Finitos (MEF), ou FEM (*Finit Elements Method*) utiliza-se dos resíduos ponderados, junto às funções peso que distribuem os resíduos dentro do domínio de estudo, permitindo uma aproximação mais precisa da realidade.

O MEF discretiza o domínio analisado em sub-regiões, intersecionadas com os nós, que são o objeto de análise do método. Diferentes tipos de elementos permitem diferentes soluções para um mesmo problema. Com esta subdivisão do domínio, as derivadas contínuas das equações de governo serão aproximadas pela taxa de variação da variável de estado de cada nó (Pereira e Nogueira, 2017).

Griffiths e Lane (1999, apud Hoyos, 2014) apresentam estas como sendo as vantagens do FEM sobre os métodos convencionais:

- Dispensa suposições sobre a forma e localização da superfície de ruptura;
- Dispensa a suposição das forças laterais entre as camadas;
- Manutenção do equilíbrio local até o momento de ruptura;
- A solução do problema apresenta informações sobre deformações para os níveis de tensões considerados;
- Pode fornecer informações sobre rupturas progressivas.

No aspecto do presente trabalho, em que há uma variação do carregamento de tensões ao longo do tempo, a equação de elementos finitos sobre a pilha de rejeitos e a fundação que a sustenta será (GeoSlope International, 2013):

$$\int_V [B]^T[C][B]dV \ \{a\} = b_c \int_V \{N\}^T dV + p \int_A \{N\}^T dA + \{F_n\}\,; \qquad \text{Equação 2.6.1}$$

onde:

$[B] = matriz\ das\ tensões - deslocamentos$;

$[C] = Matriz\ construtiva$;

$\{a\} = vetor\ coluna\ do\ incremento\ nodal\ dos\ deslocamentos\ x\ e\ y$;

$\{N\} = vetor\ de\ linha\ das\ funções\ de\ interpolação$;

$A = área\ de\ contorno\ do\ elemento$;

$V = volume\ do\ elemento$;

$b_c = unidade\ da\ intensidade\ de\ força\ sobre\ o\ corpo$;

$p = incremensto\ da\ pressão\ sobre\ a\ superfície$; e

$\{F_n\} = concentração\ do\ incremento\ nodal\ dos\ carregamentos$.

Para o presente trabalho, esta equação será utilizada em uma região de análise de duas dimensões. Foram feitos incrementos ao longo do tempo, de modo que a cada etapa calculou-se os deslocamentos para os novos carregamentos. Esse método agiliza o processo computacional ao simplificar a pilha de rejeitos em regiões de geometria simples, mas não permite determinar uma superfície de ruptura, no caso de um carregamento acima do suportado.

2.6.2. Método do Equilíbrio Limite (MEL)

Considerando que os rejeitos de mineração serão dispostos em empilhamentos, de modo a formarem taludes, é necessário um método de cálculo que assegure sua estabilidade quando da aplicação de uma carga. Neste sentido, o Método do Equilíbrio Limite (MEL) configura-se como um método numérico de cálculo de estabilidade de um talude, que busca equacionar os equilíbrios de forças e momentos atuantes. Para isso, o Método consiste no fatiamento do talude em parcelas de geometria simplificada, sujeitas a um conjunto de forças internas e externas, por onde se calcula um Fator de Segurança (Fs), que permite determinar os limites de carregamento suportados pelas fatias. A Figura 2.6.2 demonstra o fatiamento de um talude, tal como o método se vale.

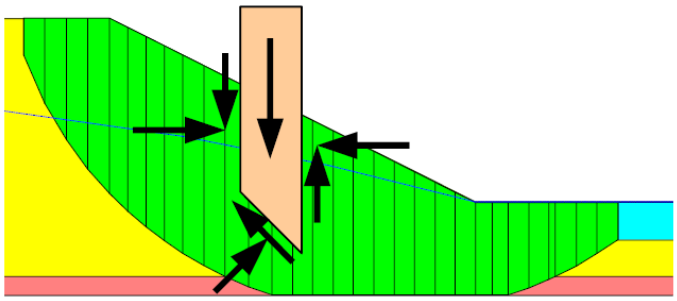


Figura 2.6.2 Discretização de um talude por fatiamento e forças atuantes em uma fatia. Fonte: Geoslope International Ltd., 2020.

Pode-se notar pela figura que a análise é feita sobre um plano, denominado Superfície de Falha. Consiste em um plano de corte arbitrado onde pode ocorrer uma ruptura, e onde o Fs será igual

para todos os seus pontos. As análises computacionais, de maneira geral, consistem em determinar uma série de superfícies de falhas, de modo a se encontrar a superfície com Fs mínimo, também chamada de superfície crítica (Notas de aula).

O método das lamelas ou Método das Fatias foi desenvolvido por Peterson & Fellenius (1936), tendo sido aperfeiçoado por diversas outras metodologias de cálculo ao longo do século XX. Destacam-se os métodos de Bishop (1955) e Janbuú (1954) como dois dos mais utilizados em projetos passados, devido à simplicidade e rapidez na análise. Em termos de precisão, os preferidos para uso são os Métodos de Morgenstern-Price (1965) e Spencer (1967), que favorecem uma rigorosa análise de estabilidade (GeoSlope International Ltd., 2020).

Para formular problemas de MEL se assume as seguintes hipóteses (Notas de aula):

- A superfície é adequada, a priori, à definição de superfície de deslizamento;
- Assume-se o solo segundo um modelo rígido-perfeitamente-plástico, do tipo Mohr-Coulomb (na prática, os rejeitos irão apresentar comportamento não linear);
- O fator de segurança será igual para todos os solos presentes na análise, tanto para as componentes coesivas quanto para as componentes de atrito e de resistência ao cisalhamento;
- O fator de segurança será o mesmo para todas as fatias.

- *Fator de segurança*

O Fator de Segurança é definido por Fellenius (1922) como a relação entre a resistência ao corte real e a tensão de corte crítica. Ou seja, pode-se entender o Fs como a razão entre a resistência ao cisalhamento disponível e a tensão atuante no corpo, como pode ser visto na equação 2.6.2:

$$F_s = \frac{\tau_{cis}}{\tau_m} = \frac{S_{cis}}{S_m}; \qquad \text{Equação 2.6.2}$$

onde:

$\tau_{cis} = tensão\ cisalhante\ de\ ruptura\ ou\ tensão\ disponível$;

$\tau_m = tensão\ cisalhante\ mobilizada\ ou\ tensão\ atuante$;

$S_m = Força\ atuante$;

$S_{cis} = Resistência\ ao\ cisalhamento$ (notas de aula).

A força de resistência ao cisalhamento é normal ao plano onde se apoia as fatias, chamado de Superfície de Falha. A resistência ao cisalhamento S_r é entendida como a tensão de ruptura ao longo do comprimento da base da lamela.

- *Equilíbrio de forças e momentos*

O MEL pode resultar em duas conclusões de análise: ou uma condição de equilíbrio ou de ruptura. A chamada "condição de equilíbrio limite, de acordo com Janbú (1973), corre quando a tensão cisalhante mobilizada se expressa como uma fração da tensão disponível (apud Aryal, 2006). No caso de falha, supõe-se que as forças atuantes e resistentes serão iguais ao longo da superfície de falha e que seu fator de segurança será de 1,0. Assim, para chegar aos resultados de tensões cisalhantes, todos os métodos se valem da expressão de Mohr-Coulomb.

2.7. INTERAÇÃO COM AS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

O solo se relaciona com outras características locais, como o clima e a vegetação. Este sistema é influenciado por várias relações de dependência entre seus fatores, que se retroalimentam em seus respectivos subsistemas; o armazenamento de água no solo pode, assim, ser usado para representar a dinâmica destas interações (Rueda, 2008, apud Hoyos, 2014). Ainda que se exclua a variável vegetação, como é o caso do presente estudo, a interrelação com o clima ainda é de extrema importância para o entendimento dos mecanismos atuantes nas camadas superficiais de solo.

A respeito da estabilidade de encostas, a precipitação é reconhecidamente um fator de influência direto, mesmo que de difícil quantificação. Isso se deve às variáveis de que depende, como a heterogeneidade do solo (Aristizábal, 2013, apud Hoyos, 2014) e a própria variação do fenômeno no tempo.

A infiltração da água de chuva no solo é caracterizada por Hoyos (2014) como uma componente estocástica, representada pela quantidade de precipitação que penetra o interior do solo, regida pela Equação 2.7.1:

$$\Phi[S_r(t), t] = R(t) - I(t) - \varphi[S_r(t), t]\ ; \quad \text{Equação 2.7.1}$$

onde:

$R = taxa\ de\ precipitação$;

$In = quantidade\ de\ água\ interceptada\ pelas\ folhas$;

$\varphi = taxa\ de\ escoamento\ superficial.$

Se forem desconsideradas possíveis interferências das plantas e desprezada a taxa de escoamento superficial, a infiltração será igualada à taxa de precipitação. Ao mesmo tempo, a perda de água no solo é descrita por Hoyos (2014) como:

$$\chi[S_r(t)] = ET[S_r(t)] + L[S_r(t)]\ ; \quad \text{Equação 2.7.2}$$

sendo:

$ET = taxa\ de\ evapotranspiração$;

$L = taxa\ de\ percolação$;

$S_r = grau\ de\ saturação.$

Rahardjo et al. (2013) estudaram a relação entre o fluxo nas condições de contorno e a distribuição de poropressão em um talude, mais especificamente a inclusão das variáveis climáticas nas análises de solo não saturado. É sabido que, enquanto a precipitação aumenta a saturação de um solo, espera-se que a evaporação leve a um aumento da poropressão negativa daquela camada de solo. Wilson et al. (1993, apud Rahardjo et al., 2013) apontam a existência de uma rede de fluxo de infiltração, caracterizada pelo balanço de água na superfície considerando a precipitação, o escoamento, a infiltração, evaporação e mudança na umidade armazenada no solo. Quanto a precipitação, é necessário determinar o quanto do volume de chuva de fato infiltra o solo, sendo que este percentual varia de 40% a 100%, a depender do volume de chuva; determinando esse percentual é possível estimar a capacidade de infiltração de um solo (Rahardjo et al., 2013). Se o volume ultrapassar a capacidade de infiltração do solo, espera-se que um percentual menor seja absorvido. O gráfico na Figura 2.7.1 apresenta a relação entre o percentual de precipitação e a taxa de infiltração para solos residuais em Jalan Kukoh, Singapura, demonstrando que a taxa de água infiltrada se reduz à medida que as precipitações se intensificam:

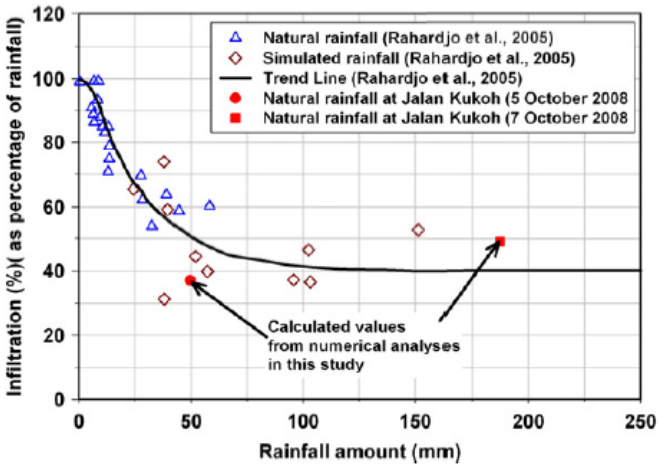


Figura 2.7.1 Percentual de infiltração da água da chuva pelo volume de precipitação. Fonte: Rahardjo et al., 2013.

Hoyos (2014) caracteriza a precipitação como uma série de eventos pontuais, de ordem diária e simplificados à uma concentração em um instante de tempo, a uma taxa λ. A distribuição dos tempos entre os eventos de precipitação é definida por uma exponencial de média $\frac{1}{\lambda}$, de acordo com a Equação 2.7.3. Com ela, é possível determinar sua distribuição de probabilidade, como apresentada pela Figura 2.7.2 (a); a altura dos eventos de chuva, por sua vez, trata-se de uma variável aleatória e independente, cuja distribuição segue padrão idêntico, como visto no gráfico da Figura 2.7.2 (b).

$$f_T(T) = \lambda e^{-\lambda T} \text{, para } T \geq 0 \text{ ;Equação 2.7.3}$$

sendo o parâmetro λ a quantidade de eventos em um determinado intervalo de tempo do processo,

$$f_{H_R}(h_R) = \frac{1}{\alpha} e^{-\frac{1}{\alpha} h_R} \text{, para } h_R \geq 0 \text{ ;} \quad \text{Equação 2.7.4}$$

onde α é a altura média dos eventos de chuva (Hoyos, 2014):

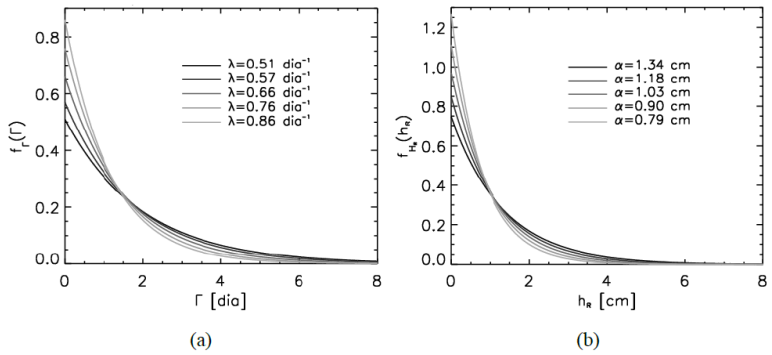


Figura 2.7.2 Distribuição da probabilidade (a) do tempo entre eventos de chuva e (b) da altura dos eventos de chuva. Fonte: Hoyos, 2014.

Considerando a infiltração da água de chuva no solo, Hoyos (2014) assume que ocorrerá escoamento superficial quando a intensidade da precipitação exceder a capacidade de infiltração do solo, aspecto esse denominado mecanismo Hortoniano. A infiltração é então definida por um sistema em função da condutividade hidráulica saturada e não saturada do solo e a precipitação efetiva, onde se iguala a precipitação efetiva quando:

1. O grau de saturação do solo ($S_r[t]$) é igual a 1 e a precipitação efetiva ($PE[t]$) encontra-se a baixo da condutividade hidráulica na condição saturada ($PE[t] < k_s$);
2. O grau de saturação do solo é menor que 1 e a precipitação efetiva está abaixo do produto entre a condutividade hidráulica não saturada e o grau de saturação ($PE[t] < k_y[S_r]$) (Hoyos, 2014).

Os valores de condutividade hidráulica em um solo não saturado, por sua vez, são obtidos de acordo com o grau de saturação para cada intervalo de tempo, como mostrado na Equação 2.7.5, baseada na lei potencial de Campbell (1974, apud Hoyos, 2014):

$$k_y(S_r) = k_s S_r^d \; ; \qquad \text{Equação 2.7.5}$$

onde $d = 2b + 3$. O termo b é um expoente empírico, relativo a cada solo (Hoyos, 2014).

A respeito da evaporação, esta representa o caminho pelo qual a água infiltrada pode deixar a camada superficial do solo. Rahardjo et al. (2013) apontam dois métodos equacionais para determinar a quantidade de água evaporada: a equação de Penman e de Thornthwaite. O método de Thornthwaite é considerado mais simples, por tanto comumente utilizado, e se utiliza de um índice que classifica a área de acordo com seu clima; ela calcula a evaporação potencial com base

na temperatura média do mês e na duração média do dia naquele período (Rahardjo et al., 2013). A equação de Penman, por sua vez, utiliza base de dados climáticos em sua análise, considerando fatores como umidade relativa, radiação e velocidade do vento (Rahardjo et al., 2013).

O fluxo de água no solo, por sua vez, é governado pela equação de Darcy. Em solos não saturados, a permeabilidade não é constante, e assim a equação adquire uma forma não linear, e a capacidade do solo de reter água varia de acordo com sua sucção (Rahardjo et al., 2013). A curva característica do solo-água apresenta dois caminhos distintos entre as fases de hidratação e secagem, onde a secagem apresenta um maior conteúdo líquido que a hidratação, para uma mesma sucção mátrica, como o gráfico da Figura 2.7.3 demonstra (Freudlund e Rahardjo, 1993, apud Rahardjo et al., 2013). Este tipo de comportamento é complexo demais para ser representado em uma simples formulação matemática.

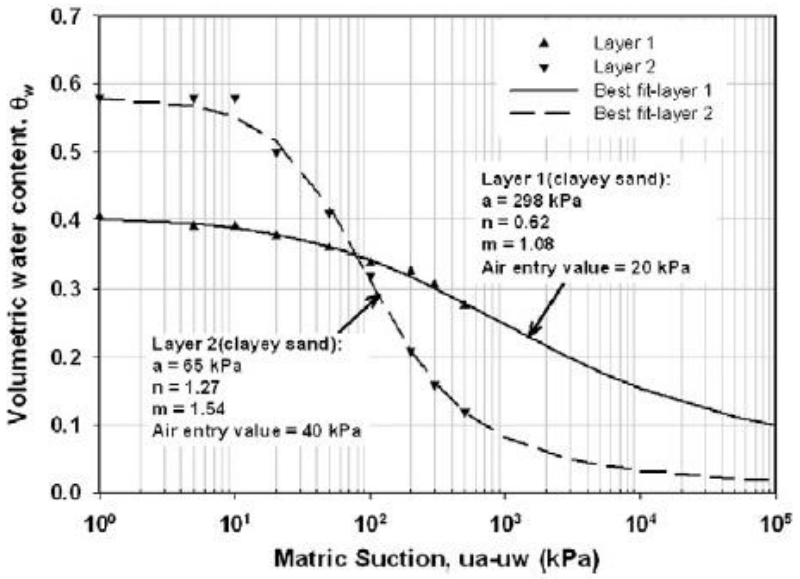


Figura 2.7.3 Relação entre conteúdo volumétrico de água e sucção mátrica para fase de hidratação (Layer 1) e secagem (Layer 2). Fonte: Rahardjo et al., 2013.

Nas análises de Rahardjo et al. (2013) constatou-se que, de uma forma geral, a evaporação potencial calculada pela equação de Penman apresenta valores maiores que pela equação de Thornthwaite, provavelmente devido à quantidade de variáveis incorporadas no primeiro método.

Para incluir os dados de evaporação e precipitação no estudo de fluxo, Rahrdjo et al. (2013) simularam dois casos de análise transiente para uma área de solo residual em Singapura; o primeiro

considerava apenas a aplicação da chuva sobre o talude, descartando a evaporação, enquanto o segundo caso aplicava a evaporação potencial após o fim do período de chuva. Foi utilizado o software de elementos finitos Vadose/W para a análise (Geoslope International Pte Ltd., 2007). Os dados climáticos foram obtidos por bancos de dados considerando meses do ano de 2008 (Rahardjo et al., 2013). Os resultados foram comparados com resultados de monitoramento manual feito no talude observado, e permitiram concluir que o aumento da poropressão não ocorre de forma tão significativa quanto prevista na simulação, mas que ainda apresentam uma boa representação da realidade, ao passo que a evaporação se mostra importante para a recuperação da poropressão (Rahrdjo et al., 2013). Considerando o clima úmido e uma taxa de infiltração entre 40% e 50% para uma chuva de 49,5mm, o método de Thornthwaite demonstrou resultados adequados para representar a evaporação no solo (Rahrdjo et al., 2013).

Para a análise no Vadose/W, Rahrdjo et al. (2013) utilizaram a função espacial para auxiliar na fixação doas condições iniciais; a camada de solo perto da superfície foi modelada pela função "surface region meshing" para gerar a distribuição das poropressões durante a evaporação. Observou-se que as poropressões próximas à superfície aumentavam rapidamente durante o período de chuva, ao passo que os efeitos da evaporação sobre a distribuição das poropressões se reduzia com a profundidade da camada de solo, sendo que nos dois casos de estudo as poropressões se demonstravam similares às profundidades acima de 1 metro (Rahardjo et al., 2013).

2.7.1. Método de Penman-Wilson

Uma vez que a pilha de rejeitos encontra-se sendo empilhada por etapas, está sujeita ao ciclo climatológico do ambiente. Assim, a precipitação gera um carregamento sobre o solo, por meio da saturação do mesmo. Considerando-se camadas sobrepostas ao longo dos anos, o resultado será camadas com carregamentos diferenciados uma sobre as outras, com tensões e poropressões presumivelmente maiores. Em contrapartida, a evaporação da água do solo não apenas reduz a saturação, como também aumenta a sucção mátrica. Deste modo, é necessário entender a relação do solo com as variáveis climáticas.

Penman (1948, apud Kobiyama e Vestena, 2006) é descrito como o primeiro a elaborar um método que combinasse os efeitos do balanço de energia com a evapotranspiração provocada pelo ar. Ele possui boa precisão em suas estimativas, o que o torna o modelo padrão nas análises climáticas e relação com o solo, mas apresenta como desvantagem algumas imperfeições operacionais, como

assumir que a superfície sempre se encontra saturada (Penman, 1948, apud GeoSlope International Ltd., 2014), e a exigência por um grande número de dados meteorológicos. Atualmente, o método é utilizado de forma modificada, com contribuição de pesquisadores como Wilson, Monteith, Doorembos e Pruit (Kobiyama e Vestena, 2006).

O método de Penman-Wilson é inserido no sistema para que se determine também a evaporação, de modo a oferecer uma observação mais acurada do comportamento da pilha em face da precipitação. Tem-se assim que parte da umidade no solo é evaporada, como se vê na equação do fluxo evaporativo real (GeoSlope International Ltd., 2014):

$$E_R = \frac{\Gamma Rad_L + k_{pir} E_a}{k_{pir} U_{solo} + \Gamma}; \quad \text{Equação 2.7.6}$$

sendo E_a definida como:

$$E_a = f(var) P_a (U_{ar} - U_{solo}) ; \qquad \text{Equação 2.7.7}$$

onde:

$\Gamma = pressão\ de\ vapor\ de\ saturação\ do\ talude\ pela\ curva\ da\ temperatura\ média\ do\ ar$;

$E_R = fluxo\ real\ de\ evaporação\ (mm/dia)$;

$f(var) =$
$função\ da\ velocidade\ do\ vento, rugosidade\ da\ superfície\ e\ difusão\ do\ vapor$;

$k_{pir} = constante\ piométrica$;

$P_a = pressão\ de\ vapor\ do\ ar\ (kPa)$;

$Rad_L = radiação\ líquida$;

$U_{ar} = inversa\ da\ umidade\ relativa\ do\ ar$;

$U_{solo} = inversa\ da\ umidade\ relativa\ do\ solo$.

2.8. GEOSTÚDIO

Para efetuar a modelagem, o presente trabalho utilizou o software GeoStudio 2022.1, versão 11.4.1.212, da Seequent. Ele é composto por um conjunto de ferramentas de métodos computacionais, que permitem a resolução de diferentes tipos de problemas envolvendo estruturas

e solo. Por meio de suas ferramentas, o GeoStudio permite combinar geometrias em um único projeto, conexão com projetos em CAD, resolução de análises em paralelo e a visualização gráfica dos resultados, facilitando a relação com o usuário e a compreensão do software. Além disso, as versões mais recentes contam com a integração entre ferramentas, permitindo análises mais eficientes e precisas (GeoSlope International Ltd.).

São três programas utilizados na análise: o Sigma/W, que se utiliza de elementos finitos para calcular as resistências e os carregamentos sobre o solo, e permite uma análise acoplada junto ao Seep/W (GeoSlope International Ltd., 2013). Este, por sua vez, também consiste em uma ferramenta de elementos finitos, permitindo cálculos do fluxo de água no solo (GeoSlope International Ltd., 2014). Para este projeto, o Seep/W não é habilitado, utilizando-se a análise acoplada do Sigma/W, que oferece as funções necessárias para os cálculos dos carregamentos.

Por fim, o Slope/W é uma ferramenta que trabalha através do Método do Equilíbrio Limite, de modo a mesurar a estabilidade da pilha e determinar o fator de segurança necessário para sua operação (GeoSlope International Ltd., 2021).

3. METODOLOGIA

O presente projeto se fixa na análise de uma pilha de rejeitos de mineração fictícia, onde se prevê um empilhamento de 10 m por ano, durante dez anos, chegando a um total de 100 m de altura. Esta pilha estará sujeita às condições climáticas de um local pré-estabelecido, e se espera acompanhar a percolação desta chuva no rejeito e, por consequência, o aumento de sua saturação e do carregamento sobre a pilha e a fundação. Para isto, é necessário executar uma análise integrada e iterativa dos parâmetros, que irão gerar novos resultados a cada etapa. Os métodos matemáticos utilizados para tanto serão os Método de Elementos Finitos e o Método do Equilíbrio Limite. Será integrado a estes o Método de Penman-Wilson para a interação entre a pilha e o clima.

3.1. FERRAMENTAS

Foram feitas duas análises, onde a primeira considerava os índices de precipitação como fluxo de água a percolar o solo, desconsiderando as outras variáveis climáticas; deste modo, esperava-se gerar um modelo mais simples e que maximizasse os efeitos da chuva sobre a pilha. A segunda análise, feita a título de comparação, se utilizou também dos dados climáticos de precipitação total diária, além de acrescentar a velocidade média do vento, temperatura média do dia e a umidade

relativa, parâmetros necessários para desenvolver as equações de evaporação, fornecidos pelo INMET. Os valores de radiação líquida, por sua vez, foram estimados com base no trabalho de Funari e Tarifa (2017), que mediram as médias de insolação, radiação global e radiação líquida no Brasil, ao longo de um ano.

3.1.1. SIGMA/W

O software SIGMA/W é uma ferramenta de método de elementos finitos utilizada para modelagem de problemas de tensão-deformação (Geoslope International Pte Ltd., 2013). Um fator de interesse no software é a possibilidade de inserir incrementos de carregamento, ou seja, novas cargas são aplicadas em intervalos de tempo definidos, o que permite analisar a variação de tensões e poropressões ao longo do tempo, bem como outras análises.

O SIGMA/W também permite uma análise acoplada ao SEEP/W, permitindo que todas as propriedades hidráulicas e condições de contorno sejam operadas pelo SIGMA/W (Geoslope International Pte Ltd., 2013). O acoplamento gera três equações para cada elemento nodal: duas equações de equilíbrio e uma equação de fluxo, cujas resoluções fornecem as variações tanto nos deslocamentos quanto nas poropressões. As formulações não acopladas, por sua vez, permitem que as análises de fluxo e variação de volume sejam resolvidas de modo independente; desse modo, as mudanças incrementadas nas poropressões são usadas a cada novo carregamento no cálculo de tensão-deformação, para assim determinar a variação das tensões efetivas.

Para o presente trabalho, o SIGMA/W foi utilizado devido à sua capacidade de cálculo por etapas, sendo cada etapa referente a uma camada da pilha de rejeitos sendo construída, através dele, foi possível determinar as condições de contorno do sistema, o período de análise e as etapas. Em resposta, o SIGMA/W apresenta a variação da poropressão, a carga hidráulica no solo e as tensões efetivas aplicadas sobre a pilha e sua fundação.

3.1.2. SEEP/W

O SEEP/W é uma ferramenta de modelagem numérica e análise, com cálculos feitos pelo Método dos Elementos Finitos, que incorpora parâmetros de fluxo em solos, permitindo a resolução de problemas tanto em condições de saturação em condição de equilíbrio, quanto em regimes transientes de solos saturados e não saturados. Atualmente, o software já incorpora também as análises atmosféricas, como condições de precipitação e evaporação (Geoslope International Ltd., 2021).

O SEEP/W não foi utilizado diretamente no estudo, mas sim através da função de acoplamento do SIGMA/W. Com ele, é possível determinar a percolação da água na pilha de rejeitos e seu fluxo, entendendo assim a dinâmica do empilhamento sendo submetido a uma carga de chuva. Também por ele foi possível inserir as variáveis climáticas.

3.1.3. SLOPE/W

A análise de estabilidade é um ponto de grande importância no estudo, uma vez que carregamentos acima do suportado pela pilha de rejeitos tendem a gerar rupturas. Como supracitado, o método numérico que melhor descreve o comportamento de equilíbrio de um talude é o Método do Equilíbrio Limite. Neste sentido, o SLOPE/W é uma ferramenta de MEL que dá acesso aos diferentes métodos de cálculo de equilíbrio limite, como Jambu ou Morgenstern-Price (GeoSlope International Ltd., 2020). Por meio deste software, é possível estabelecer regiões de ruptura, onde será calculado, iterativamente os esforços necessários para causar um desequilíbrio no sistema.

Para o presente trabalho, utilizou-se o SLOPE/W em uma análise parental com cada camada do SIGMA/W, de modo a determinar as tensões e poropressões de cisalhamento. Com esta análise, foi possível calcular o Fator de Segurança e estabelecer a superfície de ruptura da pilha, para cada altura de pilha e seu respectivo ano de construção.

3.1.4. Dados Atmosféricos – INMET

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) é um órgão ligado ao Ministério da Agricultura e Pecuária, com o objetivo de auxiliar a produção do país, por meio da apresentação de dados meteorológicos precisos. Os dados fornecidos pelo instituto são obtidos de sua rede de estações meteorológicas, automáticas e convencionais, espalhada pelo país, e seu acervo conta com informações que datam desde 1961.

No trabalho apresentado, foram selecionadas as informações de precipitação total diárias (mm), de temperatura média compensada (ºC), de média diária da umidade relativa do ar (%) e a velocidade média diária de vento (m/s). Escolheu-se dados entre os anos de 2011 e 2022, por serem os mais recentes. A estação meteorológica escolhida é a de Belo Horizonte (MG) (código 83587), localizada na latitude -19.93444444 e na longitude -43.95222222. A escolha desta estação se deve ao fato da proximidade da cidade com o chamado Quadrilátero Ferrífero, área de intensa exploração mineral, ao mesmo tempo que a centralidade da estação dá garantia de que tenha um banco de dados mais completo. Outro motivo da escolha é a proximidade de Belo Horizonte com

o complexo minerador do Brucutu, entre os Municípios de São Gonçalo do Rio Abaixo (MG) e Barão dos Cocais (MG), local onde está prevista a construção da Pilha de Rejeitos Filtrados do Tamanduá – PDR Tamanduá, de modo que o trabalho se contextualiza com o que já vem sendo feito na realidade (SETE, 2019).

3.2. ETAPAS DA MODELAGEM

Primeiramente foram definidos os parâmetros da análise. Optou-se pela modelagem de uma pilha de rejeitos em duas dimensões. As camadas são determinadas pelo adensamento, usando a ferramenta SIGMA/W, com iterações num período de 0 a 365 dias por camada, separado em doze etapas. A estabilidade de cada camada é calculada pelo SLOPE/W, considerando o cisalhamento da superfície de ruptura. A Figura 3.2.1 apresenta a tela onde são definidos os dados de projeto no GeoStudio., cujas iterações partiriam da fundação por meio de análises parentais.

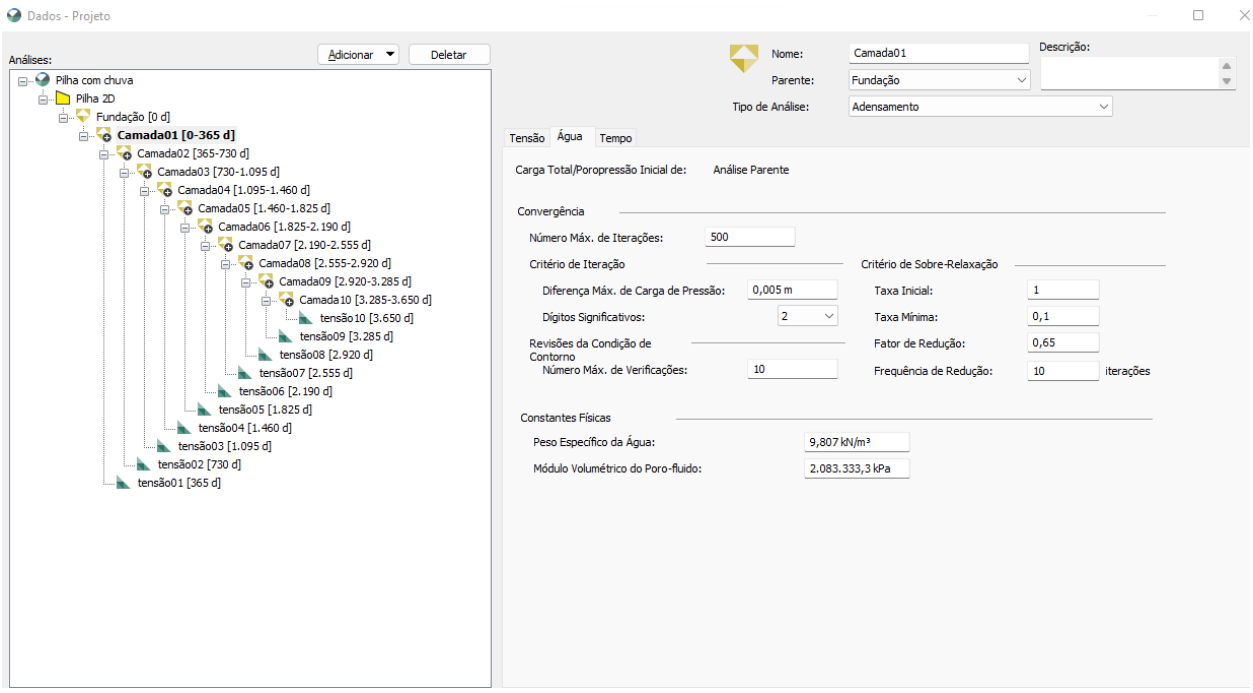


Figura 3.2.1 Dados do projeto, com análise parental em Sigma/W e Slope/W, com tempo de duração de 365 dias por camada.

Definidos os parâmetros, o próximo passo é determinar a geometria da pilha. Foi preestabelecido que esta teria uma altura de 100 m, com um empilhamento de 10 m de rejeito por ano. Optou-se assim por uma geometria de pilha com 200 m de base e com 35,81º de declividade. Para a fundação adotou-se uma área retangular de 50 m de altura por 500 m de base.

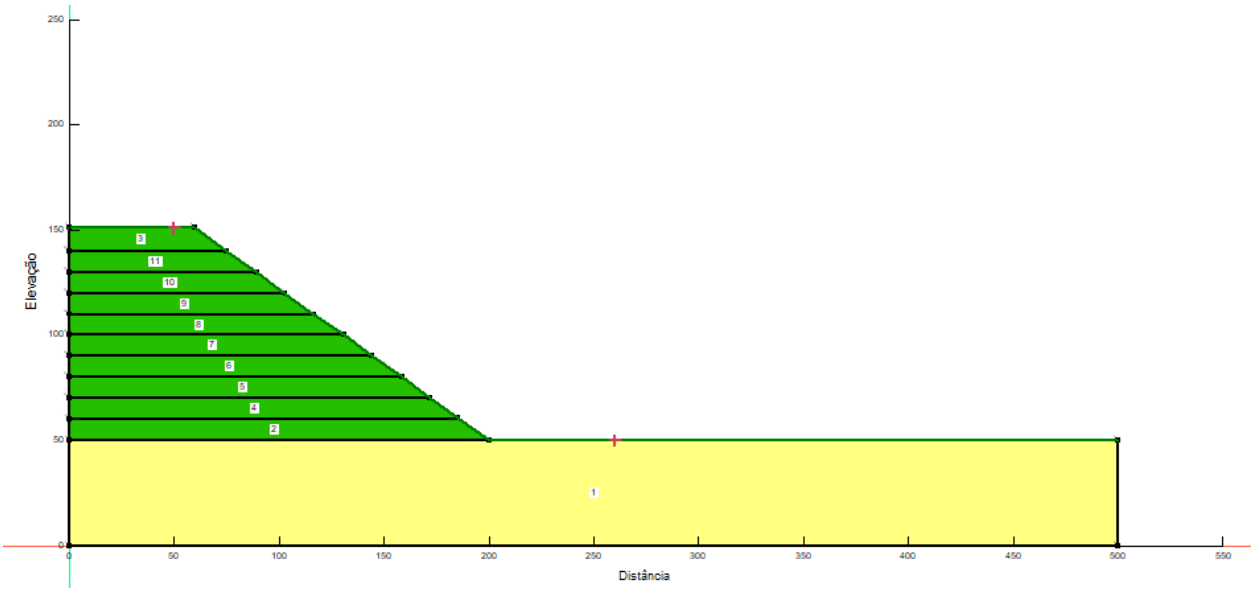


Figura 3.2.2 Desenho geométrico 2D da pilha de rejeitos (em verde), separada por 10 camadas e sustentada sobre um solo de fundação (em amarelo).

A Figura 3.2.2 apresenta a geometria da pilha de rejeitos, com suas dez camadas destacadas em verde, sobre a fundação em amarelo. A próxima etapa é a definição dos materiais a constituírem o sistema. São dois materiais que compõem o modelo: o solo de fundação, mais resistente e menos permeável, e os rejeitos, descritos como bem permeáveis e com certo grau de compactação (Cordão Neto, 2023). As Tabelas 3.2.1 e 3.2.2 descrevem, respectivamente, as propriedades de tensão e hidráulica dos dois materiais. Na análise do SIGMA/W, a fundação se encontra no modelo elástico isotrópico, enquanto o rejeito é segue o modelo Mohr-Coulomb. Com efeito, sua coesão efetiva será de 10 kPa e o ângulo de atrito efetivo é de 30º. Para a análise do SLOPE/W, considera-se também a fundação como Mohr-Coulomb.

Tabela 3.2.1 Propriedades de tensão da fundação e do rejeito.

Material	Índice de vazios inicial	Peso Específico (kN/m³)	Elasticidade efetiva (kPa)	Poisson
Fundação	0,9	23	100.000	0,3
Rejeito	1	25	30.000	0,4

Tabela 3.2.2 Propriedades hidráulicas da fundação e do rejeito.

Material	a (kPa)	n	Compressibilidade (1/kPa)	TUV Sat	TUV Res
Fundação	300	1,3	$1 * 10^{-5}$	0,4	0,05
Rejeito	30	1,3	0,0001	0,5	0,05

Os gráficos das Figuras 3.2.3 e 3.2.4 comparam as propriedades hidráulicas (curva de retenção e permeabilidade) do rejeito e da fundação. Nota-se que o teor de umidade da fundação aumenta linearmente com a poropressão, numa taxa de crescimento que logo é superada pelo rejeito. Devido ao comportamento elástico linear da fundação, espera-se esse aumento gradual e constante, proporcionalmente à poropressão. Já o rejeito, que segue o modelo Mohr-Coulomb, apresenta um aumento exponencial de seu teor de umidade em face do crescimento das suas poropressões.

A condutividade dos dois materiais, como demonstra o gráfico em 3.2.4, tem comportamentos similares, mantendo certa linearidade conforme se aumenta a sucção mátrica, até o ponto em que decrescem exponencialmente.

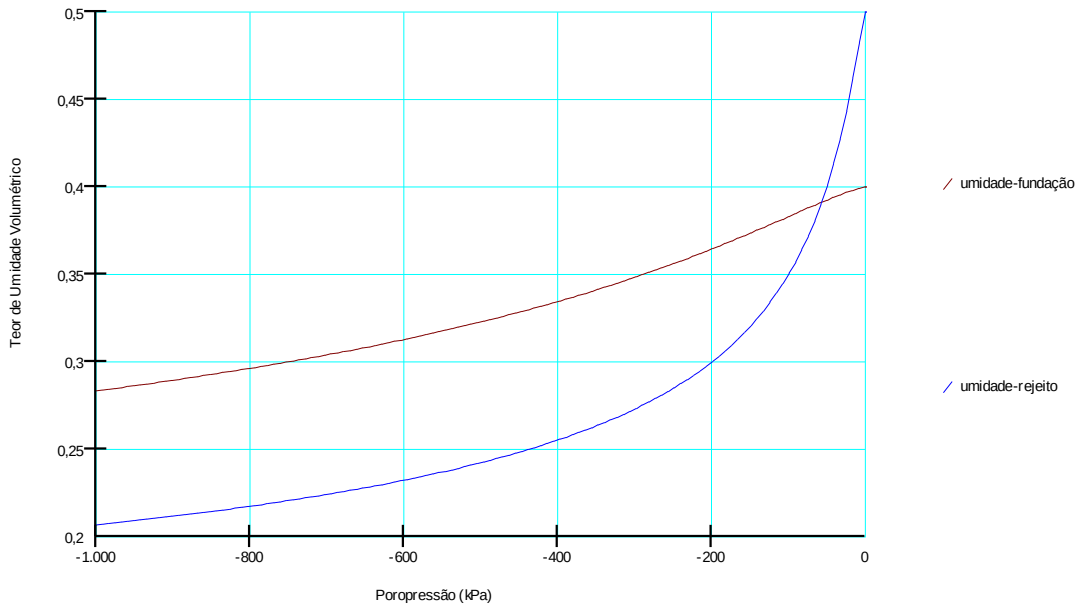


Figura 3.2.3 Relação entre o teor de umidade volumétrico e a poropressão para a fundação e o rejeito

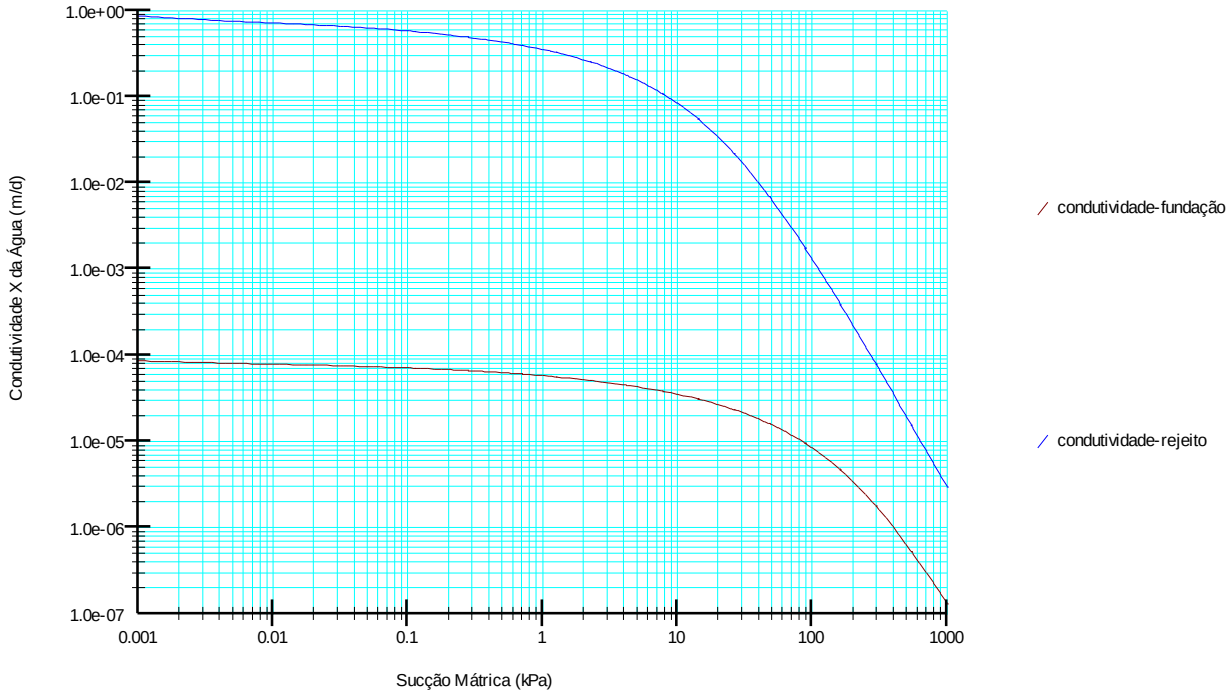


Figura 3.2.4 Relação entre a condutividade vertical de água e a sucção mátrica.

Com os materiais aplicados nas regiões do modelo, segue-se para a definição das condições de contorno. As bordas inferiores e laterais do modelo são delimitadas como fronteiras, de modo que se considera não haver fluxo ou transferência de energia para além destas regiões. Sobre a superfície exposta da fundação, assume-se uma pressão zero. Por fim, é aplicado sobre o rejeito o fluxo de água no solo, para a primeira análise, e a interação terra-clima na segunda análise. Para tanto, foi necessário realizar o tratamento dos dados climáticos, que são apresentados a diante. A Figura 3.2.5 mostra a tela de condições de contorno, com destaque para a interação terra-clima.

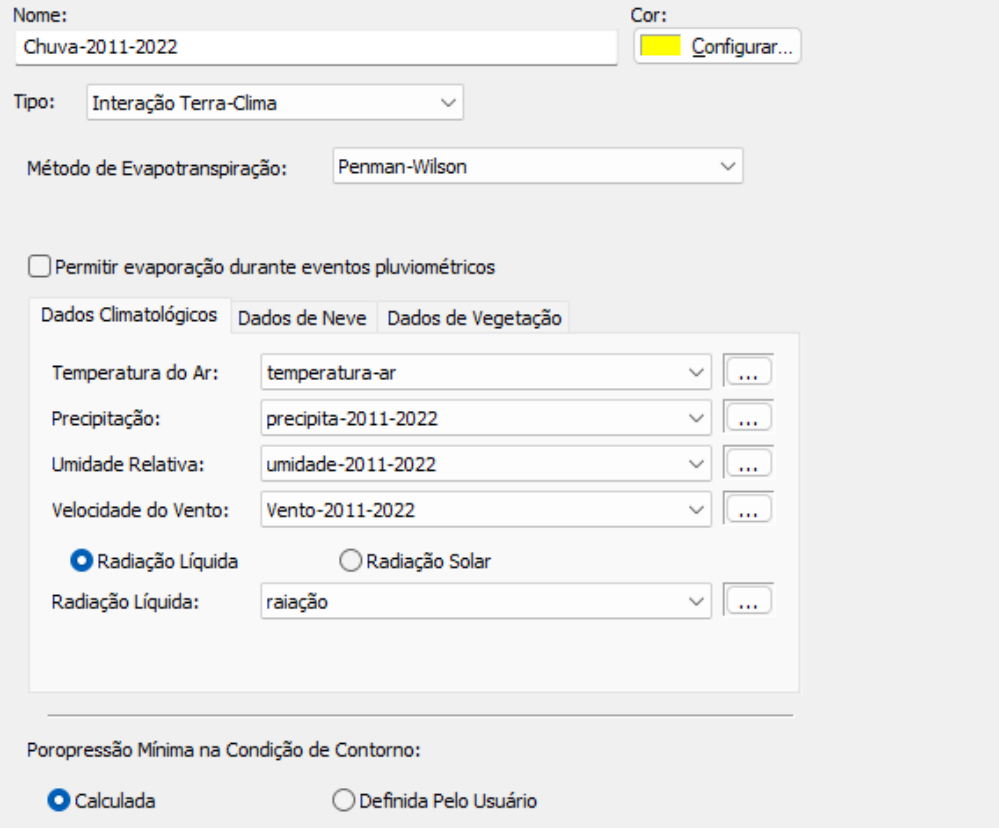


Figura 3.2.5 Tela de entrada para as condições de contorno, com destaque para a interação Terra-Clima.

- *Temperatura média*

Os valores de temperatura diários apresentam uma oscilação de temperatura que varia, aproximadamente, entre 16 e 28ºC, com alguns picos sendo observados ao longo da série histórica. Estes valores estão de acordo com as condições climáticas de uma região subtropical, e espera-se que os períodos de menor temperatura resultem também numa redução da taxa de evaporação.

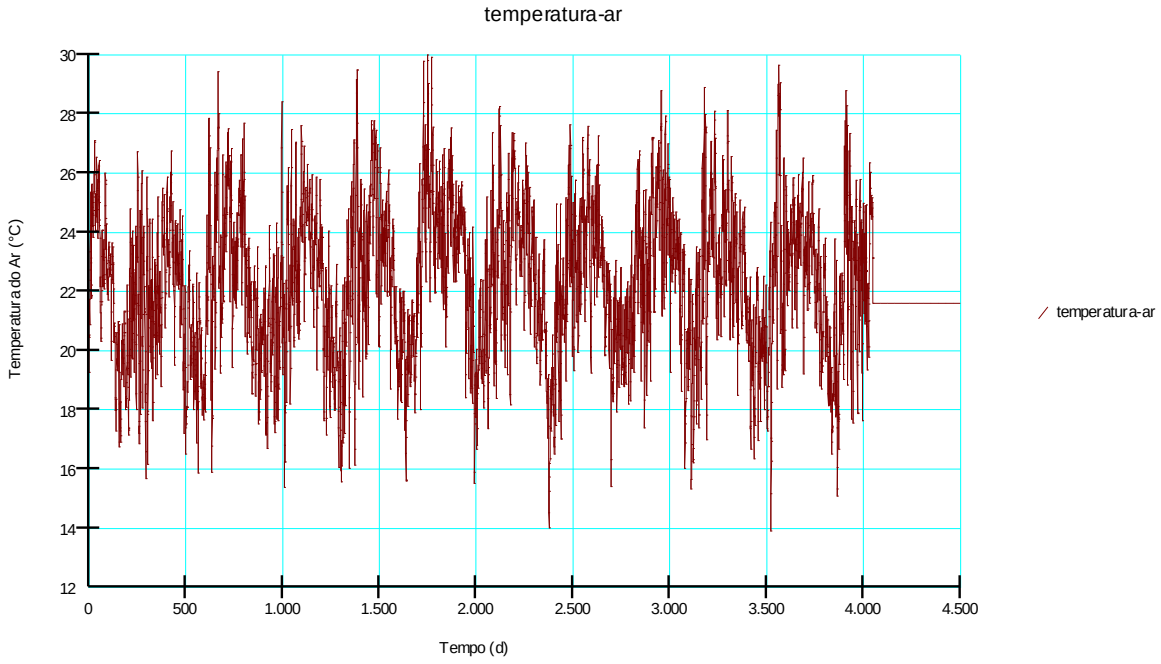


Figura 3.2.6 Temperatura diária média entre janeiro de 2011 e janeiro de 2022, com base nos dados do INMET.

- *Precipitação*

A precipitação é o dado mais relevante das variáveis climáticas para esta análise, visto que se objetiva determinar sua influência nos carregamentos e na presença de umidade no solo. Os índices apresentados no gráfico da Figura 3.2.7 mostram que a chuva na região segue um ciclo aproximadamente bem definido, com altos níveis de precipitação no início e final do ano e uma baixa pluviosidade no meio do ano.

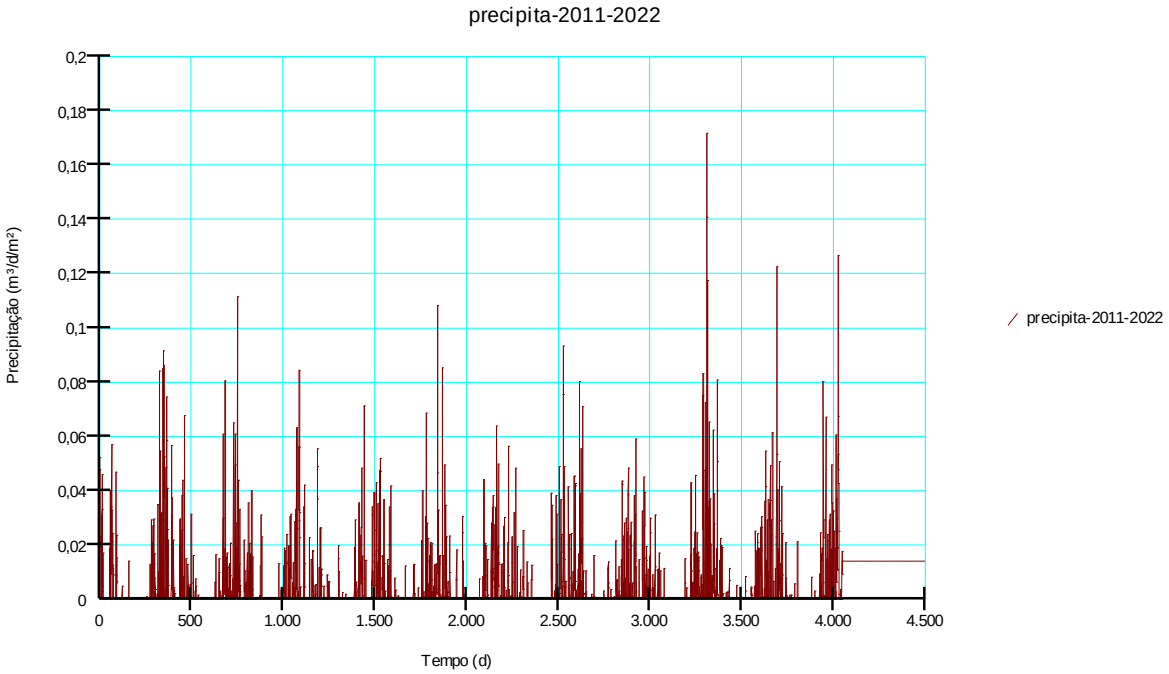


Figura 3.2.7 Precipitação total diária entre janeiro de 2011 e janeiro de 2022, com base em dados do INMET.

- *Umidade relativa*

A umidade do ar desempenha um papel importante na interação entre solo e clima, uma vez que a baixa umidade do ar aumenta a taxa de evaporação da água no solo. O gráfico da Figura 3.9 mostra que a umidade, assim como a chuva, segue um ciclo estável, e uma associação que pode ser feita é que em períodos mais chuvosos, a umidade do ar será mais elevada, e portanto haverá um percentual maior de água percolando o solo.

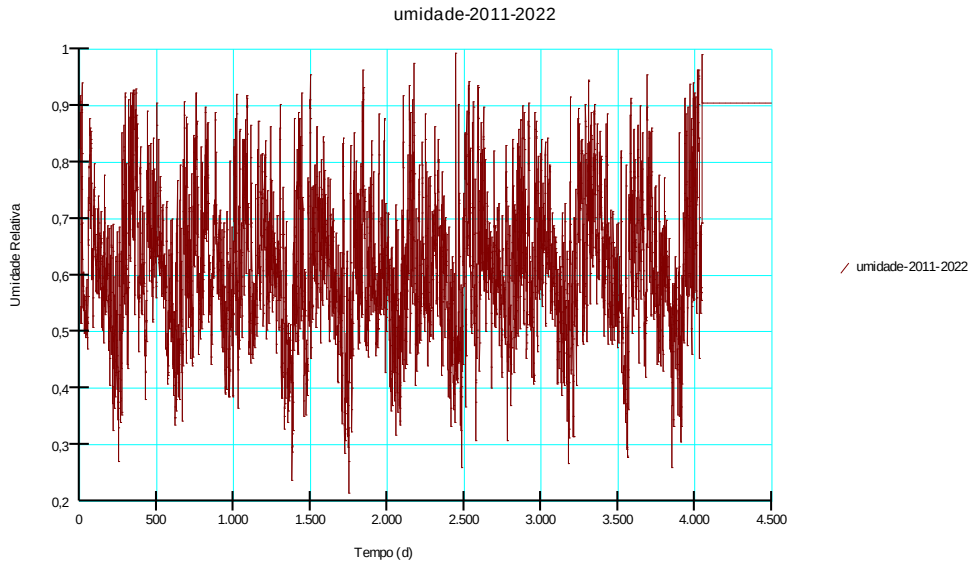


Figura 3.2.8 Variação da umidade relativa do ar entre os anos de 2011 e 2022, obtida por dados do INMET.

- *Velocidade do vento*

A velocidade do vento é mais um fator que impacta a presença de umidade do solo. O gráfico da Figura 3.2.9 mostra que o vento apresenta uma faixa média de velocidade ao longo da série histórica, com poucos períodos de pico, ficando entre os 0,59 m/s e 2,31 m/s.

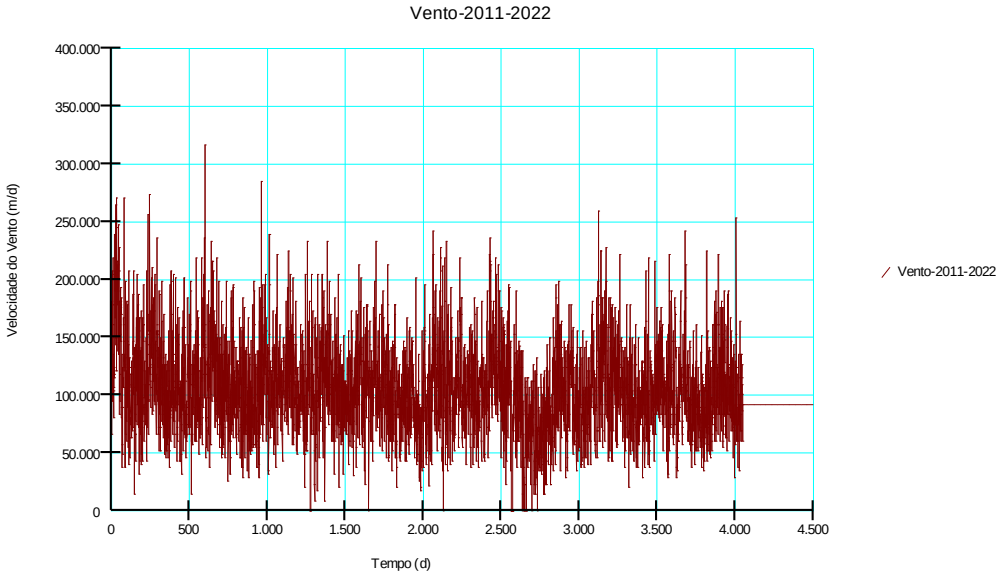


Figura 3.2.9 Médias diárias das velocidades do vento entre os anos de 2011 e 2022, obtidas por dados do INMET.

- *Radiação líquida*

A radiação líquida é entendida como o tanto de radiação propriamente incide sobre uma região. O INMET não dispõe dos valores de radiação líquida, que é calculada em função da radiação solar total e do albedo, ambas variando em no tempo, na latitude e pelas condições atmosféricas. Para os dados de radiação líquida, utilizou-se a faixa de valores mensais determinada no trabalho de Funari e Tarifa (2017), aplicando-se uma função senoidal cíclica e com variações diárias para o período de 365 dias. O gráfico da Figura 3.2.10 demonstra que há uma forte variação entre as radiações líquidas do início e fim do ano, período do verão, para o período de meio de ano, inverno.

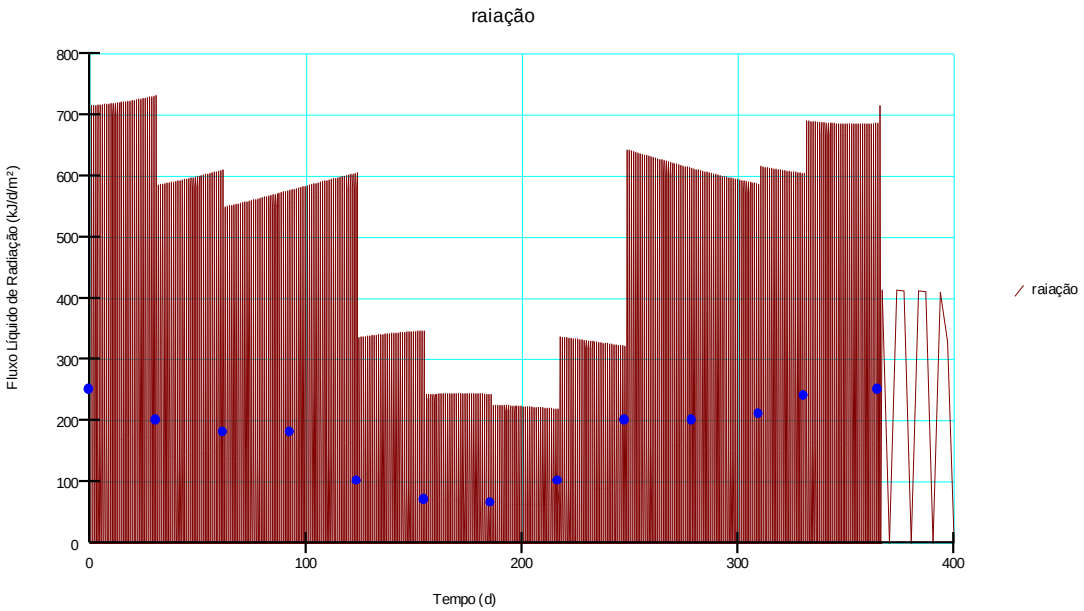


Figura 3.2.10 Fluxo líquido diário de radiação em período de 365 dias, estimado a partir dos valores mensais de radiação líquida. Com base em pesquisa de Funari e Tarifa, 2017.

A seguir, para a análise com o SLOPE/W, se determina, para cada camada, pontos de entrada e saída das superfícies de pesquisa, de modo que o software possa realizar as iterações entre seus pontos e chegar assim à superfície de ruptura. A Figura 3.2.11 apresenta a tela com os intervalos de entrada e saída, demarcados no modelo pelas linhas cinzas.

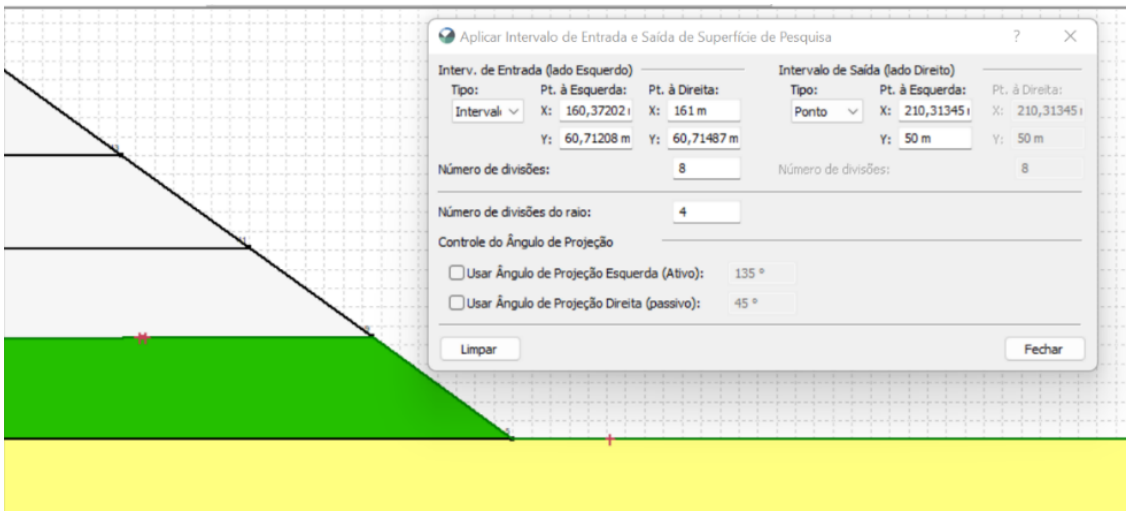


Figura 3.2.11 Tela de entrada para a superfície de pesquisa, com atribuição dos pontos de entrada e saída para análise de estabilidade.

Após definir as condições de contorno e as superfícies de pesquisa, são aplicadas as propriedades da malha, que consiste em uma rede de elementos retangulares e com 5 m de tamanho. Devido ao tamanho do modelo, crê-se que essas dimensões de malha poderão apresentar um resultado acurado, com menos custo computacional.

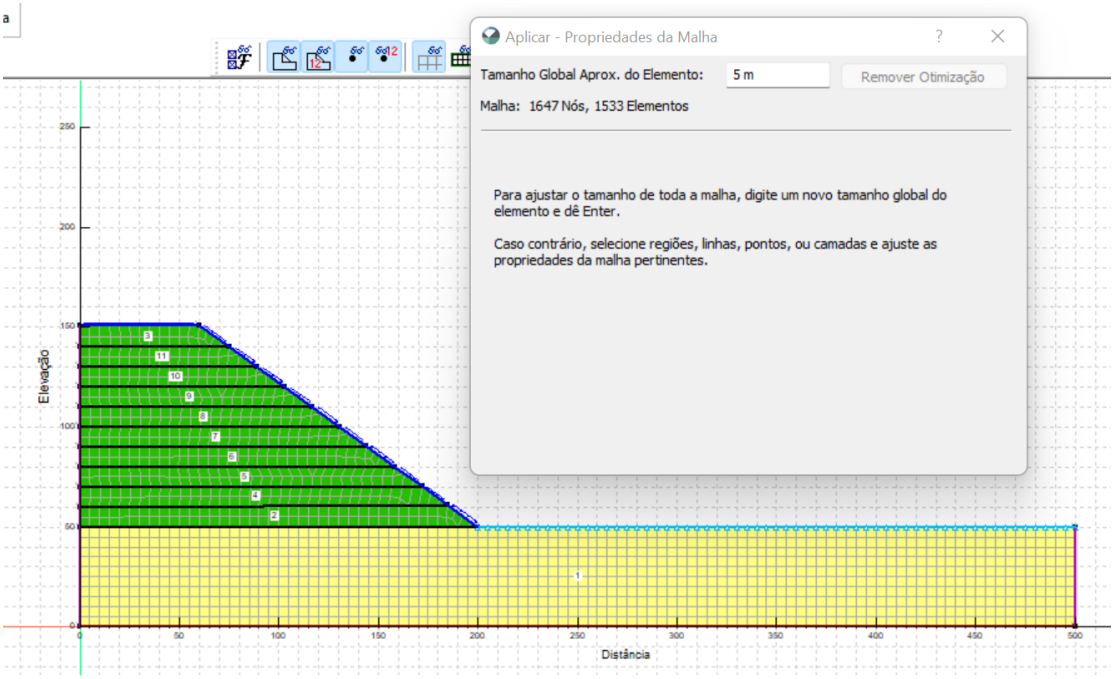


Figura 3.2.12 Tela para a definição da malha, com tamanho de elementos de 5 metros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao solucionar o modelo no software GeoStudio, nota-se, de modo geral, um cenário de estabilidade ao longo do período de empilhamento. Nas Figuras de 4.1 a 4.10 são apresentados os resultados de poropressão. Nos dois primeiros anos, são observadas as maiores poropressões nas duas camadas então construídas, com máxima de 100 kPa. Ao longo dos anos seguintes, as isolinhas se distanciam, evidenciando a estabilidade do talude. A partir do terceiro ano, começam a predominar poropressões negativas ao longo da pilha, ou seja, prevalece a tensão superficial e a adsorção da água pelas partículas do rejeito, o que gera uma coesão aparente nas zonas não saturadas da pilha. Este é o cenário desejado para um solo não saturado, uma vez que a coesão atua para impedir o carreamento do solo por fluxos de vento ou chuva, ao mesmo tempo que a ausência de poropressões positivas afasta a preocupação da ocorrência de liquefação. Entretanto, as poropressões na base do talude demonstram valores mais altos de poropressão, situação não desejada por contribuir para a instabilidade da pilha.

As Figuras 4.1 a 4.10 demonstram o modelo da pilha para os dez anos, onde os trechos em azul representam poropressões negativas e os trechos de verde a vermelho são poropressões positivas. Com as dez camadas construídas, as poropressões variam entorno de 100 e -50 kPa, sendo nulas na região da base da pilha.

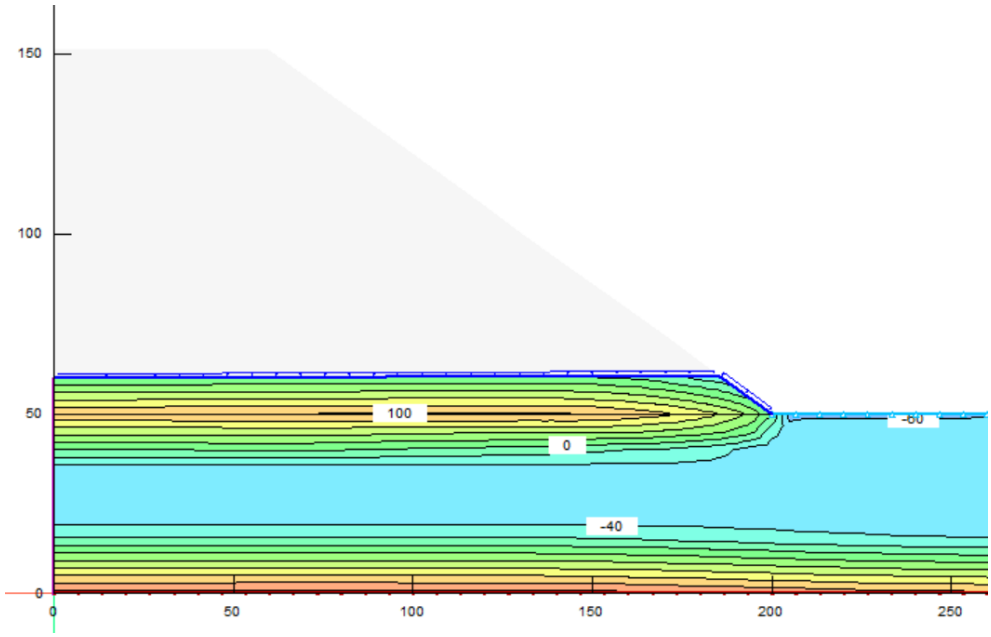


Figure 4.1 Primeira camada da pilha de rejeitos.

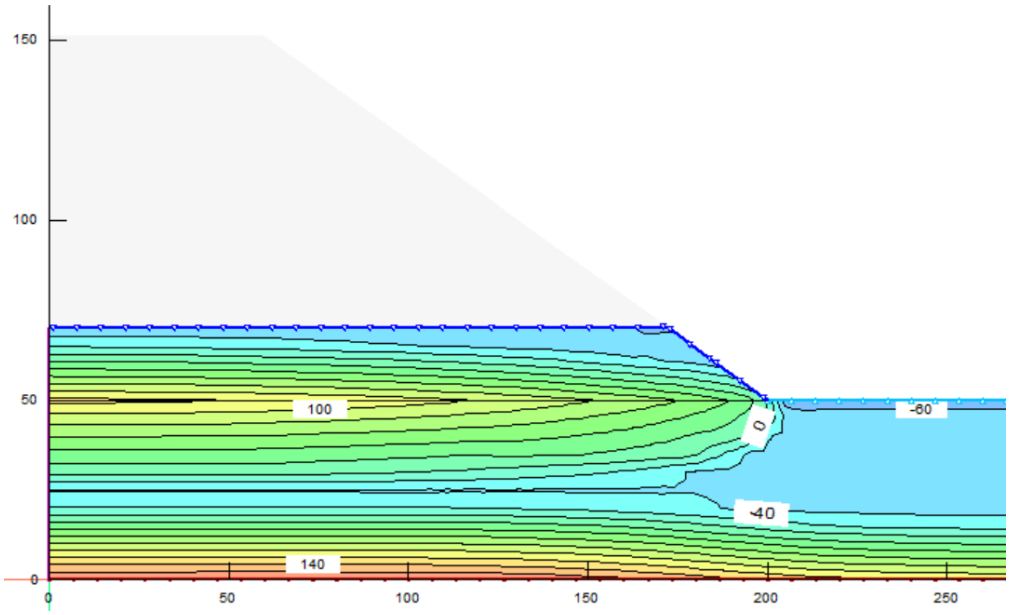


Figure 4.2 Modelo de pilha de rejeitos com duas camadas.

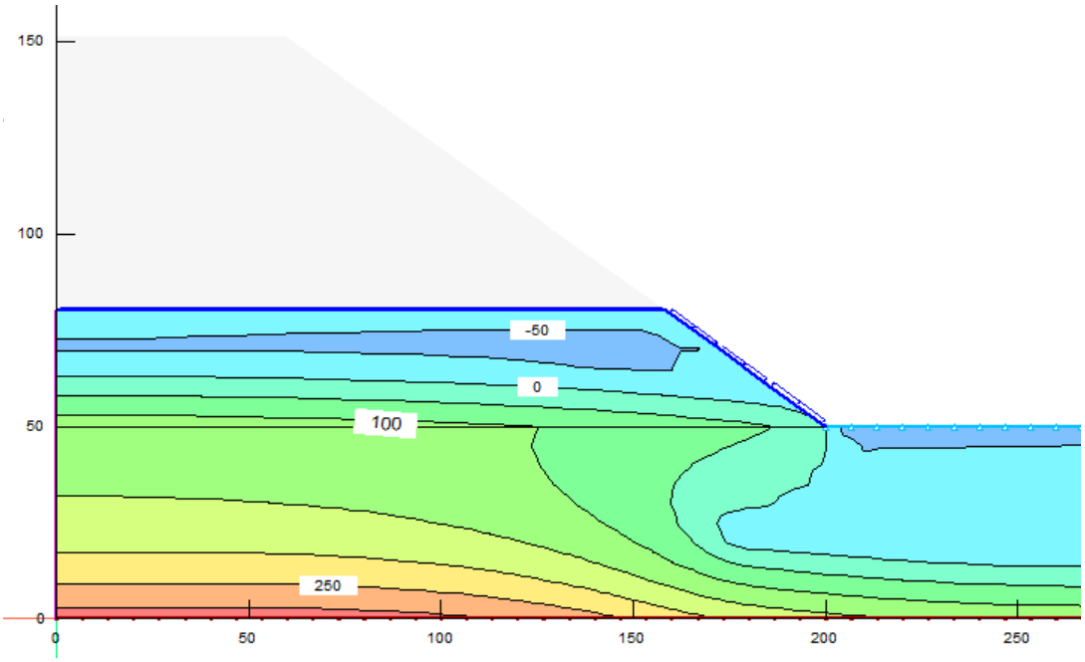


Figure 4.3 Modelo de pilha de rejeitos com três camadas.

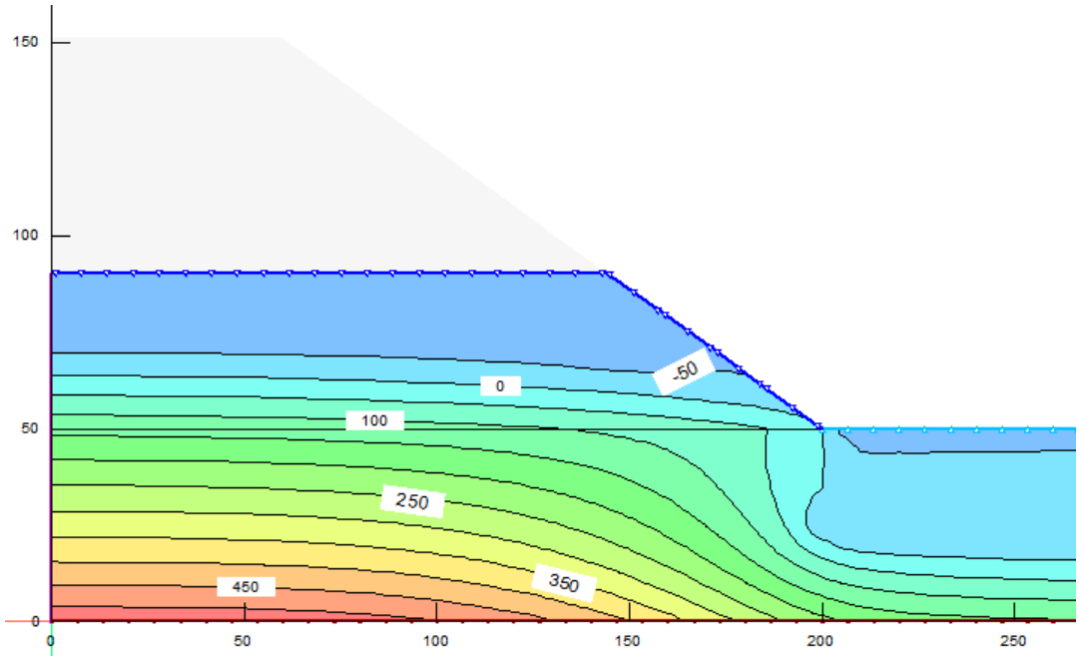


Figure 4.4 Modelo de pilha de rejeitos com quatro camadas.

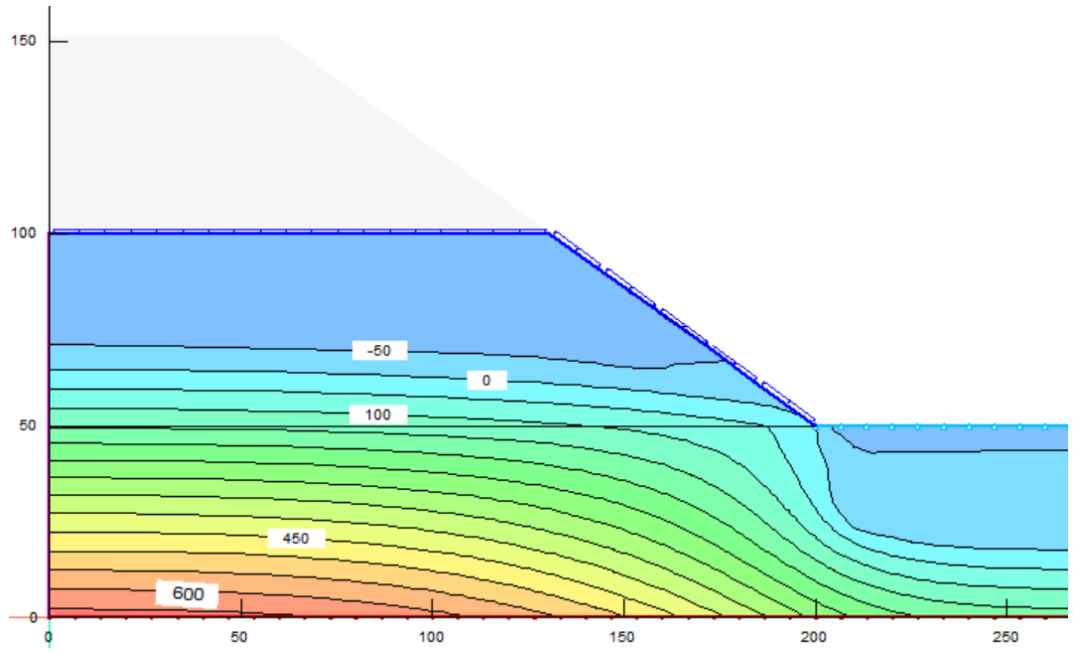


Figure 4.5 Modelo de pilha de rejeitos com cinco camadas.

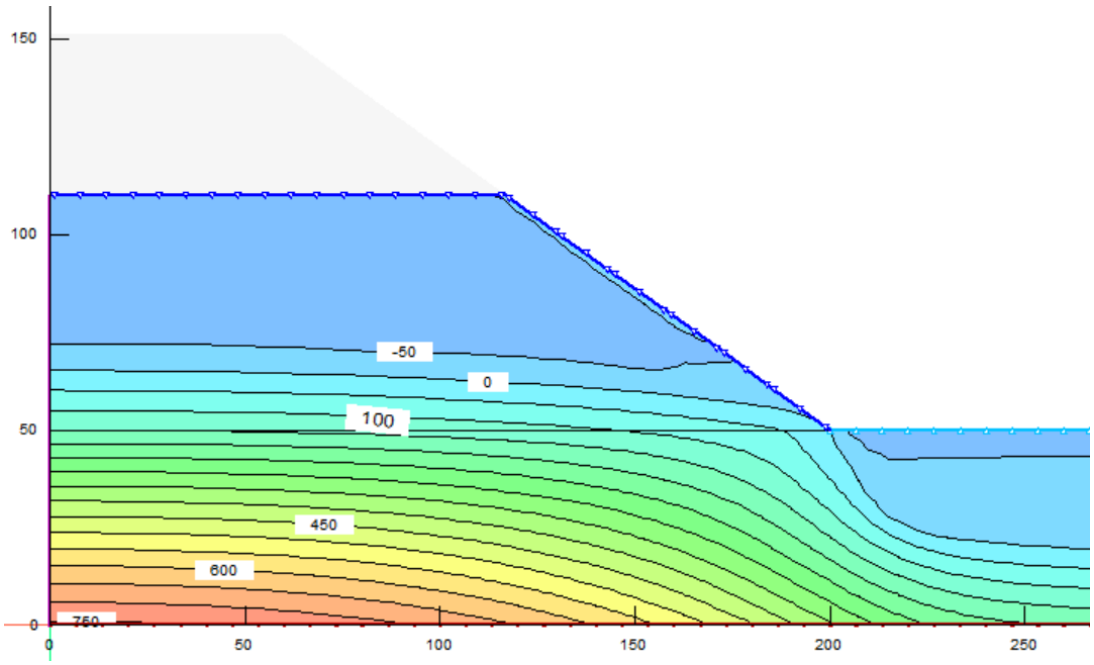


Figure 4.6 Modelo de pilha de rejeitos com seis camadas.

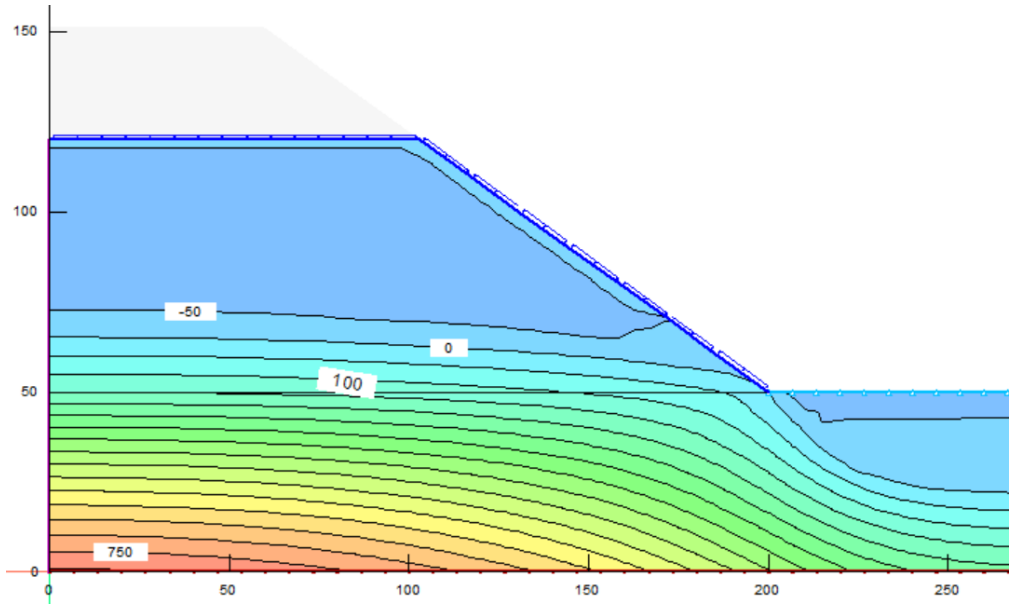


Figure 4.7 Modelo de pilha de rejeitos com sete camadas.

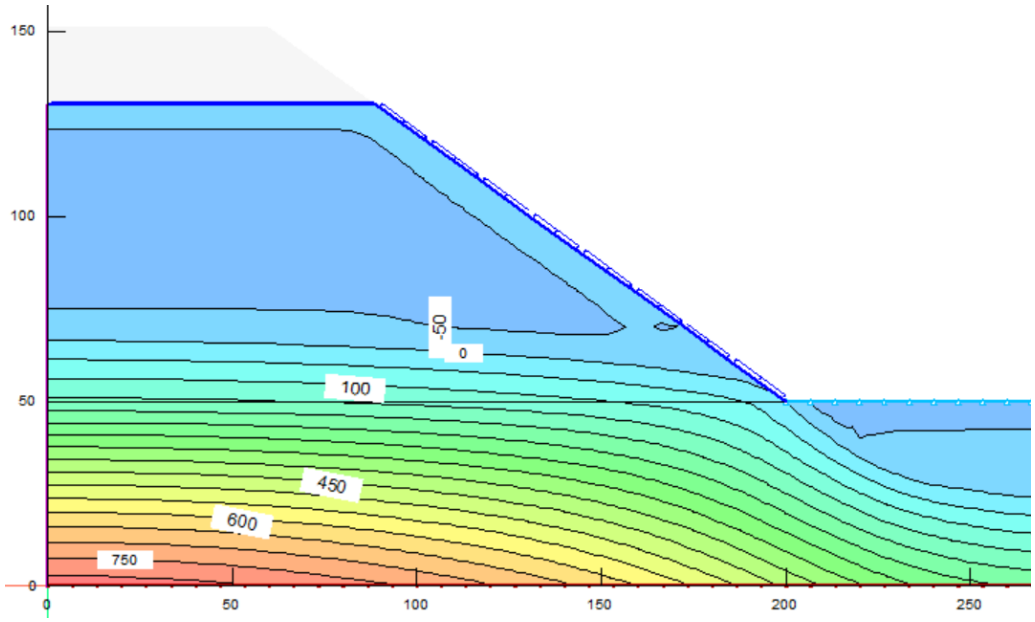


Figure 4.8 Modelo de pilha de rejeitos com oito camadas.

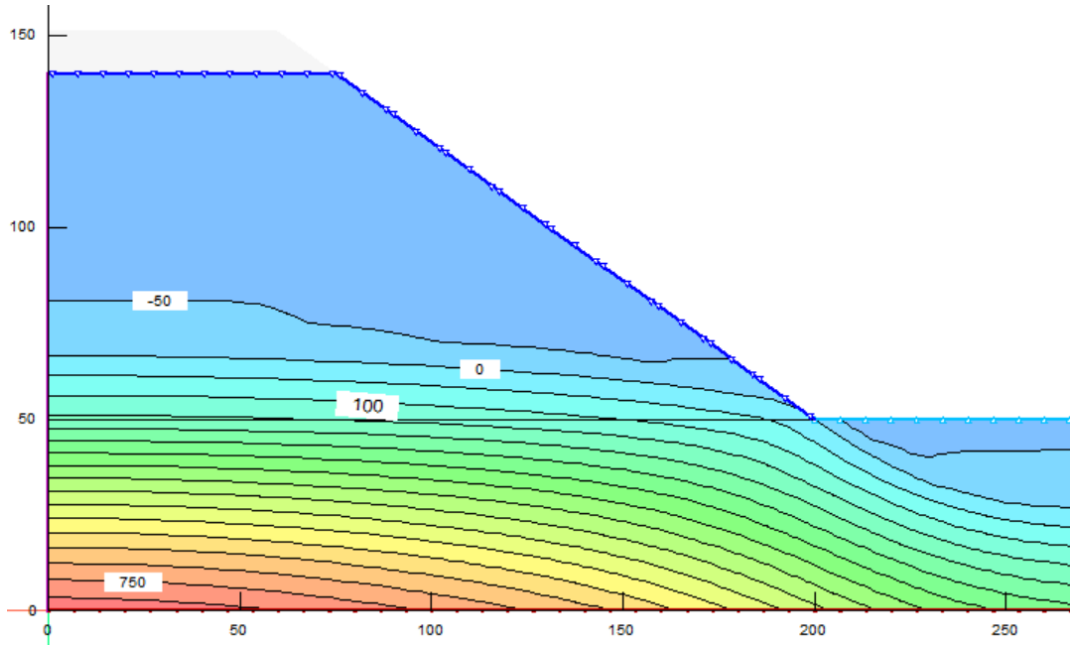


Figure 4.9 Modelo de pilha de rejeitos com nove camadas.

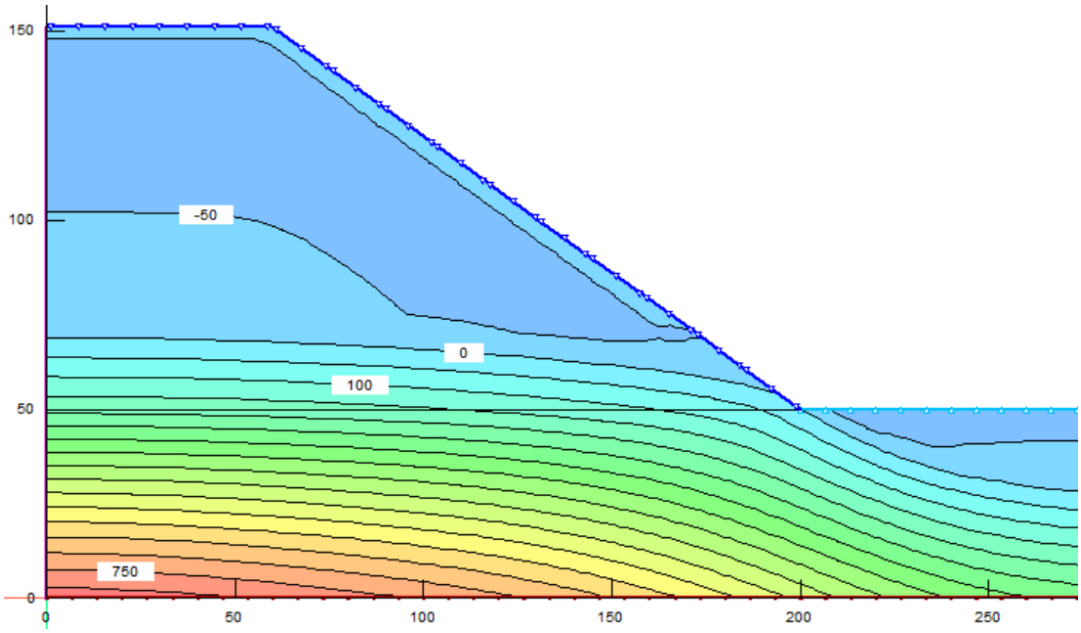


Figure 4.10 Pilha de rejeitos completa, com dez camadas.

Quanto ao modelo que inclui as variáveis climáticas, o fato que mais chama a atenção é que as zonas com menores valores de poropressão se encontram mais próximas da superfície, corroborando com o entendimento de que a evaporação eleva as poropressões negativas. A Figura 4.11 mostra como seriam as poropressões da pilha do décimo ano, com acréscimo da equação de

Penman-Wilson. Novamente aqui, destaca-se também as poropressões positivas na base da pilha, na ordem de 100 kPa, o que pode ser indicativo do risco de liquefação.

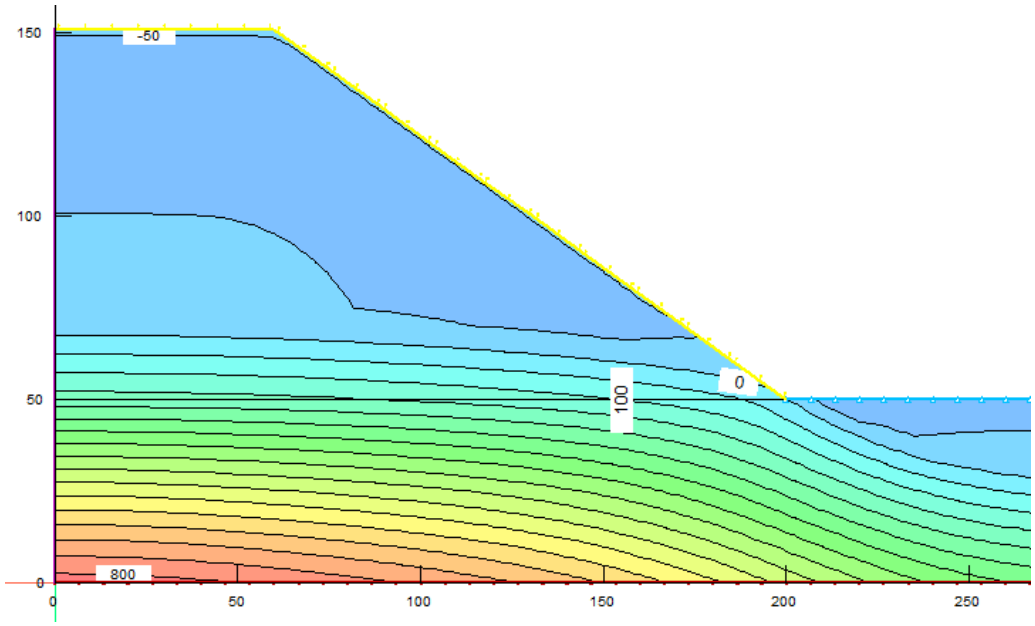


Figure 4.11 Poropressões na pilha após os dez anos de construção, considerando o cálculo de interação climática de Penman-Wilson.

Ao analisar as tensões efetivas no sentido vertical, nota-se que, com a pilha já construída, sua superfície externa mantém-se na mesma isolinha, com tensão efetiva de 200 kPa. As tensões, como esperado, concentram valores maiores na base e mais para o centro de massa da fundação sob a pilha, atingindo valores de até 2.200 kPa. Considerando que as tensões normais efetivas são resultantes de forças compressivas, que são transmitidas através do esqueleto do solo, isto é, atuam diretamente nos grãos; neste sentido, as baixas tensões efetivas nas zonas superficiais da pilha são um indicativo de que estas regiões estão menos sujeitas à carregamentos intensos. Na Figura 4.12 indica-se a pressão efetiva na pilha já construída, que contribuem para a afirmação da estabilidade da pilha, uma vez que de modo geral as tensões efetivas se mostrem com valores superiores às poropressões na maior parte da pilha.

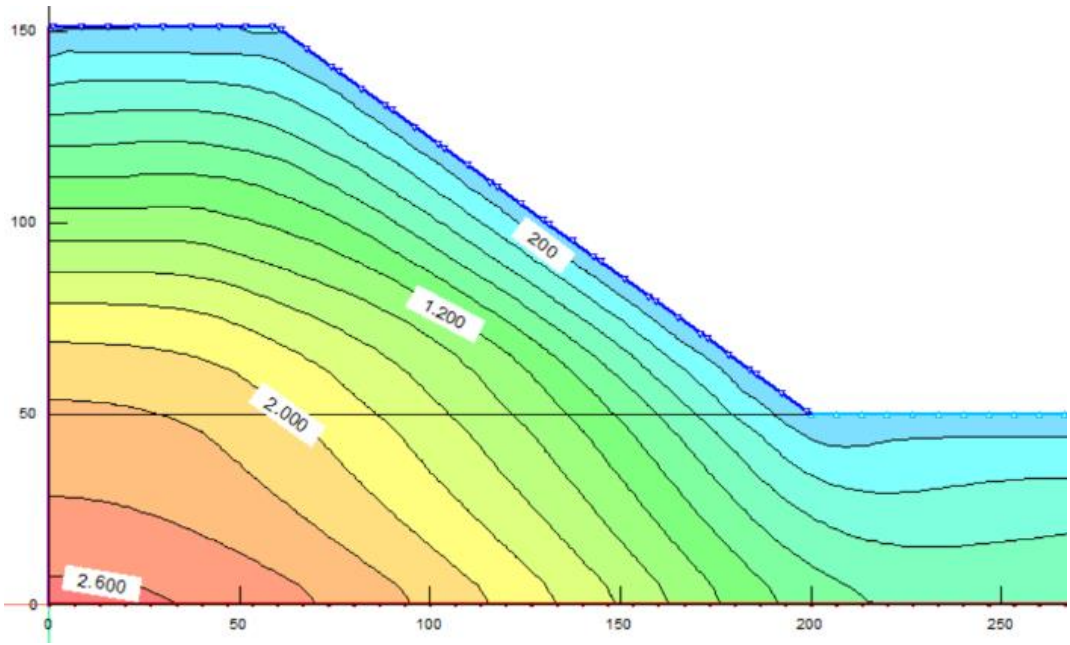


Figure 4.12 Representação das tensões efetivas na pilha após dez anos.

Neste aspecto, a análise com as variáveis climáticas demonstra que estas pouco afetam as tensões efetivas, de modo que as isolinhas permanecem práticamente inalteradas em relação ao primeiro modelo, como constatado pela Figura 4.13.

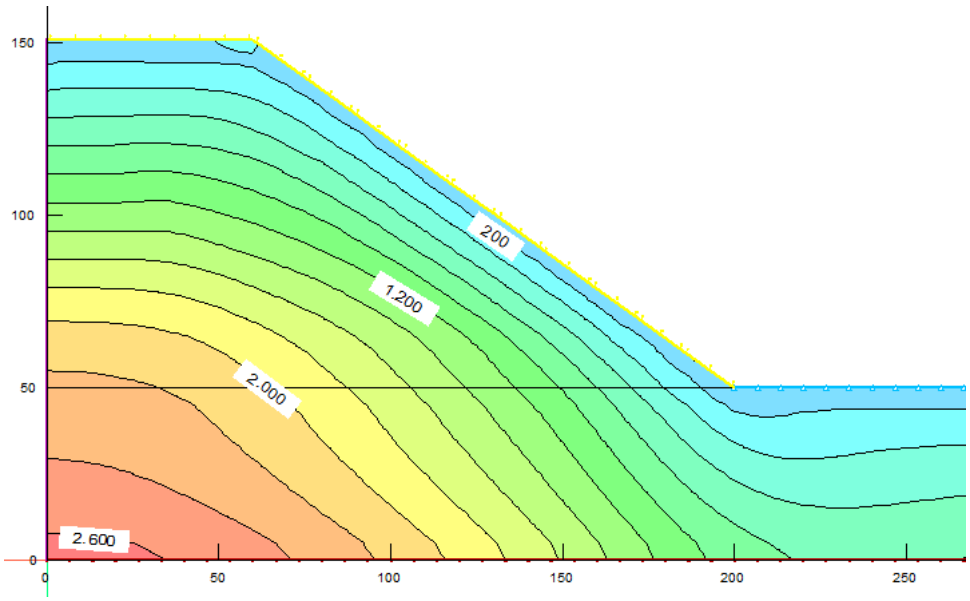


Figure 4.13 Isocurvas das tensões efetivas atuantes sobre a pilha, considerando-se as variáveis climáticas no cálculo de Penman-Wilson.

Por fim, ao observar a evolução do fator de segurança ao longo dos anos, buscou-se comparar duas situações, a primeira desprezando os efeitos da sucção no sistema, enquanto a segunda levava em conta este parâmetro. A tendência do Fs, que se confirmou no modelo, era a de redução, a medida que se progredia com a construção, com o aumento da carga aplicada e consequente redução da resistência ao cisalhamento. Para as análises sem as demais variáveis climáticas, o Fs variou de 3,068 no primeiro ano, para 1,269 no último ano. De modo geral, até o quinto ano se garante um fator de segurança acima de 1,5, que é o nível de segurança considerado alto tanto para prevenção de danos ambientais quanto para a vida humana, de acordo com a ABNT NBR 11682 (2009). Após este período, o Fs permanecerá abaixo de 1,5, representando moderado risco a pessoas próximas e, eventualmente ao meio ambiente.

A Figura 4.14 apresenta a superfície de ruptura da pilha após os dez anos de construção. As linhas em cores representam as principais superfícies analisadas pelo software, enquanto a área em verde indica a superfície mais provável de ocorrer deslizamentos, separada em fatias. A linha azul pontilhada é a superfície piezométrica, que inicialmente havia sido determinada a 40 m de profundidade. A ascenção desta linha era esperada, uma vez que a fundação se aproxima de um modelo elástico linear, adensando proporcionalmente ao carregamento imposto pela pilha. Em um

projeto normal, porém, espera-se não ter fluxos de água subterrânea abaixo da pilha, conforme mencionado anteriormente como critérios de design.

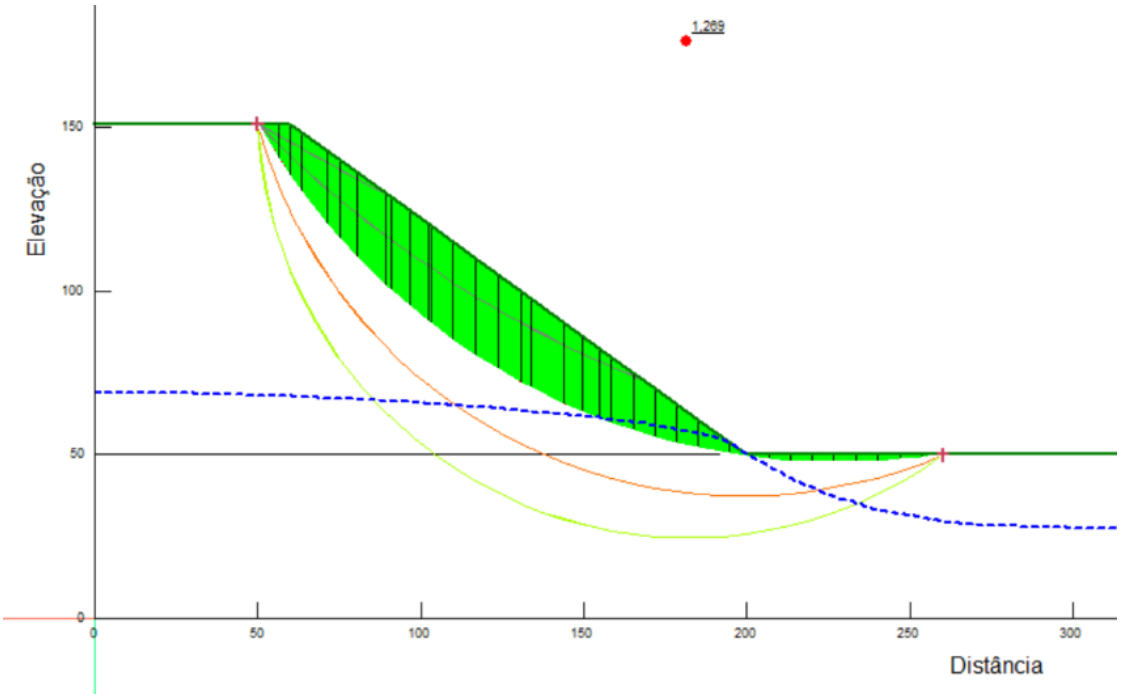


Figure 4.14 Superfície de ruptura da pilha após dez anos, com Fator de segurança de 1,209.

Ao comparar o fator de segurança com e sem a sucção, esperava-se que o fenômeno amortecesse a diminuição de seus valores, uma vez que promoveria a coesão aparente. O resultado, porém, revelou que para o modelo analisado, não ocorreram variações perceptíveis nos fatores de segurança. Já na análise com as variáveis climáticas, obteve-se valores discrepantes, com fatores de segurança menores que os observados anteriormente. Essa diferença se reduz a medida que a pilha é construída, de modo que gráficamente serão valores semelhantes, como demonstrado na Figura 4.15. Assim, ao contrário do que foi concluído na análise das tensões, a estabilidade pode ser, ainda que levemente, afetada negativamente pelo conjunto variáveis de umidade, temperatura, velocidade do vento e radiação solar, associadas à precipitação.

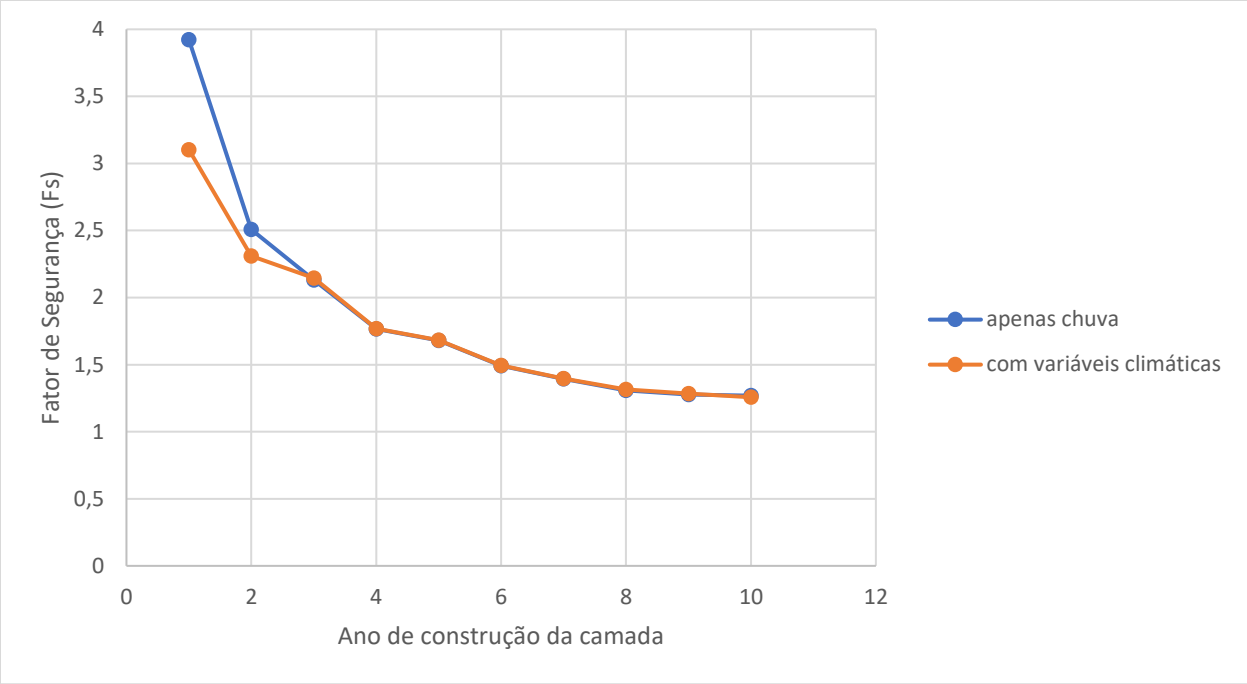


Figure 4.15 Fatores de segurança ao longo dos anos de construção: (em azul) considerando-se apenas a precipitação percolando o solo; (em laranja) considerando-se as variáveis climáticas pelo cálculo de Penman-Wilson.

Os resultados apresentados demonstram que os cálculos em MEF chegam a valores baixos de tensões na pilha de rejeito. As poropressões se mantém estáveis e negativas ao longo de maior parte da construção, remetendo a uma condição de coesão aparente, porém a base da pilha demonstrou valores mais elevados de poropressão; enquanto as tensões efetivas não apresentam carregamentos muito intensos para a estrutura; unindo estes dois fatores, o que ocorre é que as poropressões das regiões superficiais não anulam as tensões efetivas para a maior parte da estrutura, condição necessária para a ocorrência da liquefação. Estes resultados podem estar relacionados à alta permeabilidade do rejeito adotado na análise que, sob um regime de chuva que passa por períodos de estiagem, teria tempo para acomodar as poropressões, com a percolação da água sem dar espaço à saturação da camada. Para comprovar esta hipótese, seriam necessários estudos mais detalhados, distinguindo as etapas de construção no período de chuvas e de estiagem.

Quanto ao fator de segurança calculado pelo MEL, ficou demonstrado que este se reduziu consideravelmente ao longo do tempo, e o efeito da sucção não foi o suficiente para mitigar essa piora. Considera-se como principal causa a inclinação íngreme adotada no design, que aumenta os esforços cisalhantes no talude, aliada a ausência da drenagem e acúmulo das poropressões

positivas na base. Reduzindo-se o ângulo de inclinação para valores menores pode resultar em uma pilha mais estável, ainda que aumente a área ocupada.

Do ponto de vista da interação com o clima, a pilha se mostrou relativamente segura, mesmo em um regime hídrico com valores reais de chuva de uma região subtropical. O modelo demonstra que a água pode percolar com facilidade o rejeito, gerando zonas de excesso de poropressões apenas em sua base, devido à ausência de drenagem. Recomenda-se, porém, que sejam feitas futuramente análises mais detalhadas, distinguindo os períodos chuvosos dos períodos secos, por exemplo, e aprimorando as variáveis climáticas, inclusive com o uso de modelos estatísticos, para melhor prever o comportamento do clima futuro da região, especialmente em um contexto de emergência climática, entendendo assim como o modelo responderia a essas previsões.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante do que foi exposto, o presente trabalho tratou do método de disposição por empilhamento dos rejeitos filtrados. É um método que se apresenta como um substituto mais estável às barragens, pois baseia-se na remoção de água dos rejeitos até que atinjam valores de umidade abaixo do Limite de Liquidez, comportando-se como sólidos. Desta forma, os resíduos podem ser compactados e empilhados, tendo assim uma estrutura estável, que ocupa menores áreas e apresenta menos riscos ambientais e sociais.

Foram feitas análises que incorporaram os índices meteorológicos locais, com valores de precipitação total diária, umidade do ar, velocidade média do vento e temperatura média diária, também foram estimados dados de radiação líquida diária pelas médias mensais da região. O objetivo do trabalho foi tentar responder se a umidade gerada pela precipitação poderia gerar riscos à estrutura da pilha, como pontos de maior saturação ou zonas onde as poropressões anulassem as tensões efetivas, considerando seu empilhamento em camadas ao longo do tempo e expostas ao clima local. Considerando-se que o Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais é a região com mais intensa exploração mineral no país, optou-se por usar os dados climáticos da região.

Os resultados demonstraram que as chuvas da região escolhida, para os parâmetros que foram definidos na modelagem, não apresentam aparente risco à estrutura, onde prevalecem as poropressões negativas ao longo do corpo da pilha, sendo um indicativo de coesão aparente. Ao se comparar as poropressões próximas à superfície, que chegam a -50 kPa, e as tensões efetivas, que

atuam entorno de 200 kPa para a mesma região, observa-se um cenário onde não se espera a ocorrência de liquefação. Acrescentando-se os demais dados climáticos à análise, o resultado se mostrou ainda mais satisfatório. Ainda assim, o modelo possui valores mais elevados de poropressão em sua base, o que levaria ao risco à estabilidade, situação que pode ser remediada diante da aplicação de condições de drenagem.

Deste modo, o presente trabalho demonstrou que a liquefação não é um problema que preocupe, a princípio aos projetistas das pilhas de rejeito. Ainda assim, recomenda-se que análises mais precisas sejam realizadas futuramente, com mais parâmetros que garantam maior acurácia nos resultados. O modelo desenvolvido teve várias simplificações, a critério de estudo, então seria melhor ter um levantamento da topografia e das condições geotécnicas das regiões que podem vir a ter pilhas construídas, como também valores mais precisos das características hidráulicas do rejeito, possivelmente envolvendo ensaios em laboratório. Outra forma de aprimorar o modelo seria detalhamento temporal do projeto, considerando que a região apresenta períodos de maior pluviometria e períodos de estiagem.

Quanto à análise da estabilidade do talude, esta apresentou fatores de segurança que se reduziam muito ao longo do empilhamento, iniciando-se em 3,068, mas apresentando Fs de 1,269 quando da conclusão da pilha. Ao se acrescentar os dados climáticos, o que ocorreu foi uma piora no Fs, que não se manteve muito expressiva para as camadas mais acima. Os resultados não foram muito satisfatórios, embora ainda indiquem estabilidade do talude. Ao se considerar a sucção, não se constatou mudança nos resultados. Uma possibilidade para chegar a fatores de segurança mais elevados seria reduzir o ângulo de inclinação, de preferência para valores abaixo do ângulo de atrito dos grãos de rejeito, construindo assim uma pilha menos íngreme. Isso reduziria os carregamentos sobre as fatias e aumentaria a resistência total ao cisalhamento.

Além de tudo o que foi exposto, é importante mencionar que, dada a situação atual de emergência climática, vários locais de clima tropical e subtropical, como a região escolhida para análise, podem apresentar picos nos volumes de chuva maiores que os projetados, ou ainda períodos de estiagem prolongados. Incorporar essas incertezas em estudos mais aprofundados pode garantir as melhores soluções para o desenvolvimento destes projetos.

As pilhas de rejeito filtrado, portanto, continuam se mostrando promissoras substitutas das disposições tradicionais de rejeitos de mineração. Embora não estejam livres de causar impactos

ao meio ambiente e à saúde humana, sua estrutura é bem mais estável e segura do que as barragens, especialmente as com alteamento à montante, e sua disposição na forma sólida garante mais controle de sua operação e menores riscos de resultar em catástrofes socioambientais, como nos rompimentos de barragens. A medida em que se popularizarem, a tendência é a construção de pilhas maiores, e, no entanto, o estudo demonstrou que as preocupações com o empilhamento em solo tropical a princípio não procedem, tendo o modelo se provado estável ao clima da região.

Com sugestões de trabalhos futuros tem-se:

1. Realizar ensaios para caracterização hidromecânica do rejeito de modo a obter as propriedades necessárias para a análises semelhantes a desenvolvida neste trabalho;
2. Realizar análises semelhantes as desse trabalho, porém com modelos que consigam reproduzir o comportamento do solo quanto a susceptibilidade a liquefação;
3. Acrescentar condições drenantes à pilha e considerar a sucção, de modo a verificar a diferença dos resultados;
4. Utilizar modelos que prevejam as condições climáticas futuras para ambientes que onde se possa vir a construir as pilhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2009). "NBR 11682 – Estabilidade de encostas". Segunda edição, Rio de Janeiro, RJ.

AESBE. (2019). "1 a cada 3 barragens da Vale pode causar tanto estrago quanto a de Brumadinho", em AESBE – Associação Brasileira das Empresas Estaduais de Saneamento, em 30 de janeiro de 2019. Disponível em: https://aesbe.org.br/novo/1-a-cada-3-barragens-da-vale-pode-causar-tanto-estrago-quanto-a-de-brumadinho/. Acesso em: 24 de setembro de 2019.

Amoah, N., Dressel, W. e Fourie, A. B. (2018). "Characterization of unsaturated geotechnical properties of filtered magnetite tailings in a dry stack facility", em RJ Jewell&AB Fourie (eds), pasta 2018: *Proceeding of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth, Austrália, pp. 375-388, disponível em: <https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1805_31_Amoah>.

Andes – Sindicato Nacional dos Docentes das Instituições de Ensino Superior. (2022). “Três anos após o rompimento da barragem de Brumadinho (MG), atingidos ainda cobram justiça”, publicado na web em 25 de janeiro de 2022. Disponível em: https://www.andes.org.br/conteudos/noticia/tres-anos-apos-o-rompimento-da-barragem-de-brumadinho-mG-atingidos-ainda-cobram-justica1. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

Aquino, Yara. (2016). “Tragédia em Mariana foi causada por obras em barragem da Samarco, diz MP”, publicado no site Agência Brasil em 24 de junho de 2016. Disponível em: https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-06/tragedia-em-mariana-foi-causada-por-obras-em-barragem-da-samarco-diz-mp. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

Aryal, Krishna. (2006). “Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods”.

BRASIL. Lei n° 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. 2010. Brasília, DF: Presidência da República, [2010]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

BRASIL. Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Altera a Lei nº 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragen (PNSB), a Lei nº 7.797, a Lei nº 9.433, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). 2020. Brasília, DF: Presidência da República, [2020]. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982> . Acesso em: 17 ago. 2022.

Carmo, F.F., Lanchotti, A.O. e Kamino, L.H.Y. (2020). “Mining Waste Challenges: Environmental Risks of Gigatons of Mud, Dust and Sediment in Megadiverse Regions in Brazil”. Sustainability 12(20): 8466. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su12208466 . Acesso em: 19 set. 22.

CMNE. (2021). “Computational analyses of Dam I failure at the Corrego de Jeijao mine in Brumadinho – Final Report”. CIMNE, Vale S.A, Agosto de 2021.Cristal Jr. (2020). “Tratamento de minérios: Descubra como funciona todo o processo de beneficiamento” em Cristal, 18 de novembro de 2020. Disponível em: https://cristaljr.com/tratamento-de-minerio/. Acesso em: 24 de setembro de 2022.

Davies, Michael. (2011). “Filtered Dry Stacked Tailing – The Fundamental”, em *Proceedings Tailing and Mine Waste 2011*, AMEC Environment & Infrastructure, Vancouver, Canadá.

Davies, M. et al. (2011). “Dewatered Tailings Practice – Trends and Observations”, em *Tailings and Mine Waste – Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste*. Disponível em: <DOI:10.1201/b10569-19>.

Earth Systems. (2006). “A Brief Story of Mining”, em Earth Systems. Disponível em: https://www.earthsystems.com/history-mining/ . Acesso em: 24 de outubro de 2022.7

E&MJ – Engineering and Mining Journal. (2021). “2021 Global Mining Investment Outlook”. Disponível em: https://www.e-mj.com/features/2021-global-mining-investment-outlook/. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

Funari, Frederico L.; Tarifa, José Roberto. (2017). “Sunshine, global radiation and net radiation in Brazil”. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, SP, vol. 38 (2), pgs. 49-83.

General Kinematics®. “A Brief History of Mining: The Advancement of Mining Techniques and Technology”. Disponível em: https://www.generalkinematics.com/blog/a-brief-history-of-mining-and-the-advancement-of-mining-technology/. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

Geoscan. (2020). “Barragem de Rejeito: O que são e como evitar rompimentos”, publicado em 28 de setembro de 2020, atualizado em 09 de outubro de 2020. Disponível em: https://www.geoscan.com.br/blog/barragem-de-rejeito/. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

Geoslope International Ltd. (2012). “Seepage Modeling with SEEP/W – An Engineering Methodology”. Geoslope International Ltd., Calgary, Alberta, Canadá.

Geoslope International Ltd. (2013). “Stress-Deformation Modeling with SIGMA/W – An Engineering Methodology”. Geoslope International Ltd., Calgary, Alberta, Canadá.

Geoslope International Ltd. (2021). “Stability Modeling with GeoStudio”. Geoslope International Ltd., Calgary, Alberta, Canadá.

GeoSlope. “GeoStudio – The modeling software for geo-engineers and earth scientists”. GeoSlope, products. Seequent. Disponível em: <https://www.geoslope.com/products/geostudio>, acesso em 01 de fevereiro de 2023.

Hoyos, E. (2014). “Influência dos Parâmetros Hidrológicos e Geotécnicos na Estabilidade de Taludes”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106p.

Kobiyama, Masato; Vestena, Leandro R. (2006). “Aplicação do Método de PENMAN Modificado no Cálculo da Evapotranspiração Potencial para Quatro Estações Meteorológicas do Estado do Paraná”. Revista Ciências Exatas e Naturais, Vol. 8, nº 1, janeiro/junho de 2016. Disponível em: file:///C:/Users/55619/Downloads/204-822-1-PB.pdf, acesso em: 03 de fevereiro de 2023.

Laminatus – Engenharia e Inovação. (2019). “Entenda o que é minério de ferro, rejeito e barragem”, publicado na web em 21 de março de 2019. Disponível em: https://laminatus.com.br/aplicacao-do-rejeito/. Acesso em: 27 de outubro de 2022.

Lupo, J. e Hall, J. (2010). “Dry Stack Tailings – Design Considerations”. AMEC Earth and Environmental, Englewood, CO, USA.MPF – Ministério Público Federal. (2021). “Desastre da Vale: relatório elaborado por universidade da Espanha aponta causas do rompimento da barragem em Brumadinho (MG)”, publicado na web em 04 de outubro de 2021. Disponível em: https://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/noticias-mg/desastre-da-vale-relatorio-elaborado-por-universidade-da-espanha-aponta-causas-do-rompimento-da-barragem-em-brumadinho-mg. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

MPMG – Ministério Público de Minas Gerais. (2020). “Rompimento da barragem de Fundão, em Mariana: resultados e desafios cinco anos após o desastre”, publicado na web em 29 de outubro de 2020. Disponível em: https://www.mpmg.mp.br/portal/menu/comunicacao/noticias/rompimento-da-barragem-de-fundao-em-mariana-resultados-e-desafios-cinco-anos-apos-o-desastre.shtml. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

Ortigão, J.A.R. (2007). *Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos*. 3ª edição. Terratek, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 391p.

Pereira, Ronald e Nogueira, Christianne. (2017). “Análise não linear do problema de adensamento unidimensional a grandes deformações via Método das Diferenças Finitas”. Disponível em: <DOI:10.20906/CPS/CILAMCE2017-0300>.

Rahardjo, H., Satyanaga, A. e Leong, E.C. (2013). “Effects of flux boundary conditions on pore-water pressure distribution in slope”, em *Engineering Geology* 165) 2013, Elsevier, 133-142.

Rincon, M.A. e I-Shih, L. (2015). *Introdução ao Método de Elementos Finitos – Computação e Análise em Equações Diferenciais Parciais*. Instituto de Matemática, Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 402p.

Robertson, P.K. (2017). “Evaluation of Flow Liquefaction: influence of high stresses”. PBD III – Earthquake Geotechnical Engineering, Vancouver, Canadá. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318682041_Evaluation_of_Flow_Liquefaction_influence_of_high_stresses.

Rodrigues, Sabrina. (2019). “Retrospectiva: Rompimento da barragem de Brumadinho foi a primeira grande tragédia ambiental do ano”, publicado na web em 16 de dezembro de 2019. Disponível em: https://oeco.org.br/noticias/rompimento-da-barragem-de-brumadinho-e-a-primeira-grande-tragedia-ambiental-do-ano/. Acesso em: 04 de novembro de 2022.

SETE – Soluções e Tecnologia Ambiental. (2019). “Relatório de Impacto Ambiental – Projeto Pilha de Disposição de Rejeitos Filtrados – PDR Tamanduá”. Belo Horizonte, MG.

Souza, W.A.R. (2020). Análise numérica do comportamento de pilhas de rejeito filtrado e co-disposição durante a construção. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71p.

Ulrich, B. e Coffin, J. (2013). “Considerations for tailings facility design and operation using filtered tailings”, em R Jewell, AB Fourie, J Caldwell e J Pimenta (eds), Pasta 2013: *Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Australian Center for Geomechanics, Perth, Austrália, pp. 201-210, disponível em: <https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1363_15_Ulrich>.

Venditti, Bruno. (2021). “The Biggest Mining Companies in the World in 2021”, em Elements, 04 de Agosto de 2020. Seção: *Eletrification*. Disponível em: https://elements.visualcapitalist.com/the-biggest-mining-companies-in-the-world-in-2021/. Acesso em: 24 de setembro de 2022.

VGR. (2021). “Resíduos da mineração: tipos, rejeitos e como destinar?”, publicado em 24 de maio de 2021. Disponível em: https://www.vgresiduos.com.br/blog/residuos-da-mineracao/. Acesso em: 27 de outubro de 2022.