

AMADEU MAGNONI VENTURIN

ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO DE UMA PILHA DE REJEITO FILTRADO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques

Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz
Antônio J. P. V. da Fonseca

T

V469a
2022
Venturin, Amadeu Magnoni, 1995-
Análise de percolação de uma pilha de rejeito filtrado / Amadeu Magnoni
Venturin. - Viçosa, MG, 2022.
1 dissertação eletrônica (105 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Eduardo Antônio Gomes Marques.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de
Engenharia Civil, 2022.

Referências bibliográficas: f. 103-105.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.800>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Barragens de rejeitos. 2. Filtros e filtração. 3. Percolação. 4. Drenagem. I.
Marques, Eduardo Antônio Gomes, 1965-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 627.8

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

AMADEU MAGNONI VENTURIN

ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO DE UMA PILHA DE REJEITO FILTRADO

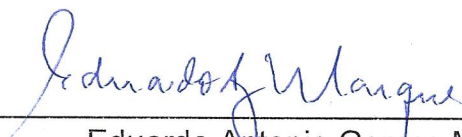
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 25 de fevereiro de 2022.

Assentimento:



Amadeu Magnoni Venturin
Autor



Eduardo Antonio Gomes Marques
Orientador

À minha família,
por me apoiarem em todas as etapas de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família que sempre me incentivou e ensinou a agir da maneira correta, pois foram através dos seus ensinamentos que cheguei aonde estou. Em especial a minha mãe Valdinea, ao meu pai Sérgio e aos meus irmãos Renata e Guilherme.

À Marina, pela paciência e apoio incondicional em todos os desafios de nossas vidas, principalmente na reta final deste trabalho.

Ao meu orientador Eduardo Marques, pelo apoio durante todos os anos que fui seu aluno e por ter me apresentado à geotecnia.

À mineradora, pelas discussões técnicas, colaboração e fornecimento dos materiais utilizados nos ensaios.

Aos técnicos dos Laboratórios do LMS-UFV e LabGeo-FEUP, pelo incessante trabalho e empenho deixado na realização de todos os ensaios realizados.

Aos meus colegas de projeto, Jessé, Ângelo, Cassiano e Tadeu, pelas discussões sempre produtivas e pelo apoio na elaboração do modelo.

À TRACTEBEL por ter me presenteado com tantos desafios profissionais, além de ter contribuído diretamente para meu crescimento profissional e pessoal. Aos meus amigos, pelo excelente convívio e contribuições dadas a este trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, pela qualidade de ensino e apoio à pesquisa, tornando possível a realização deste trabalho.

E, por fim, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais, FAPEMIG, pelo financiamento da bolsa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos sou infinitamente grato...

RESUMO

VENTURIN, Amadeu Magnoni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. **Análise de percolação em uma Pilha de Rejeito Filtrado**. Orientador: Eduardo Antonio Gomes Marques. Coorientadores: Roberto Lopes Ferraz e Antônio Joaquim Pereira Viana da Fonseca.

Diante dos recentes acidentes em barragens de mineração, a gestão de rejeitos nos empreendimentos minerários tem gerado demanda pela avaliação da viabilidade de novas metodologias e alternativas de disposição. Dentre as alternativas que englobam o desaguamento do rejeito para posterior disposição em pilhas, a filtragem tem sido amplamente estudada. Entretanto, não se tem ampla experiência na disposição destes materiais em climas úmidos como o presente no Brasil, o que gera questionamentos quanto à viabilidade e segurança deste método. O presente estudo visa elaborar uma análise de percolação tridimensional de uma estrutura de empilhamento de rejeito filtrado e, com isso, avaliar o comportamento do nível freático em seu interior considerando-se diferentes graus de compactação do material disposto. Além disso, o estudo realiza uma comparação entre metodologias para o dimensionamento do sistema de drenagem interna de pilhas. Para tanto, foi realizada a modelagem da fundação, da pilha e de seu sistema de drenagem interno. Posteriormente foi realizada a calibração do modelo, para definição da malha a ser utilizada e das condições de contorno. Na análise foi considerado o modelo de solos não saturados de van Genuchten (1980), com parâmetros obtidos através de ensaios de laboratório. De posse dos resultados, pode-se concluir que o valor do coeficiente de escoamento superficial adotado no dimensionamento do sistema de drenagem por métodos analíticos possui grande influência em seu resultado, entretanto, nas análises por modelos numéricos, sua influência é negligenciável. No estudo de caso houve apenas saturação superficial da pilha no período chuvoso, o que pode não ser crítico em uma situação final de pilha, entretanto, durante o período construtivo esse fenômeno pode gerar bolsões de saturação em seu interior. Por fim, a variação do grau de compactação do rejeito não resultou em influências significativas no resultado das análises, entretanto, com um maior grau de

compactação espera-se um maior coeficiente de escoamento superficial, diminuindo assim o efeito da saturação superficial na pilha.

Palavras-chave: Análise de percolação. Modelo tridimensional. Rejeito filtrado. Minério de ferro. Drenagem interna.

ABSTRACT

VENTURIN, Amadeu Magnoni, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February 2022. **Three-dimensional seepage analysis in a dry stack pile**. Advisor: Eduardo Antonio Gomes Marques. Co-advisers: Roberto Lopes Ferraz e Antônio Joaquim Pereira Viana da Fonseca.

Given the recent accidents in tailings dams, tailings management in mining projects has generated demand for the assessment of the feasibility of new methodologies and disposal alternatives. Among the alternatives that encompass the dewatering of the tailings for later disposal in dry stacks, filtration has been widely studied. However, there is not extensive experience in the disposal of these materials in wet climates such as the present in Brazil, which raises questions about the feasibility and security of this method. The present study aims to elaborate a three-dimensional seepage analysis of a dry stack pile and, with that, to evaluate the behavior of the pore pressures in its interior considering different degrees of tailings compaction. In addition, the study makes a comparison between design methodologies for the internal drainage system of piles. For that, the foundation, dry stack and its internal drainage system were modeled, and then the model was calibrated to define the mesh to be used and its boundary conditions. In the analysis, was considered van Genuchten (1980) model for unsaturated soils, with parameters obtained through laboratory tests. In possession of the results, it can be concluded that the surface runoff coefficient adopted in the design of the drainage system by analytical methods has a great influence on its result, however, in the analysis by numerical models, its influence is negligible. In the case study, there was only surface saturation of the pile in the rainy season, which may not be critical in a final stack situation, however, during the construction period this phenomenon can generate pockets of saturation inside it. Finally, the variation in the degree of compaction of the tailings did not result in significant influences on the results of the analyses, however, with a higher degree of compaction, a higher coefficient of surface runoff is expected, thus reducing the effect of surface saturation in the pile.

Keywords: Seepage analysis. Three-dimensional model. Filtered tailings. Iron ore. Internal drainage system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2-1 - Gráfico da variação da permeabilidade e índice de vazios.....	17
Figura 2-3 - Curva retenção de água no solo	19
Figura 2-4 - Comportamento da curva característica de sucção com a granulometria.	20
Figura 2-5 – Teor de umidade após infiltração	21
Figura 3-1 - Métodos de disposição de rejeitos.....	23
Figura 3-2 - Casos históricos de pilhas de rejeito filtrado	27
Figura 3-3 – Excedente hídrico no período chuvoso de 12/2020 a 03/2021.	29
Figura 4-1 - Dreno de fundo de pilha	30
Figura 4-2 - Balanço hídrico de bacias hidrográficas	33
Figura 4-3 – Modelo conceitual de balanço hídrico	34
Figura 4-4 - Coeficientes de escoamento superficial.....	34
Figura 4-5 - Variação do teor de umidade com a profundidade	36
Figura 4-6 - Esquema de ensaios de campo	37
Figura 4-7 - Teste de infiltração - Tensiômetro 1	38
Figura 4-8 - Teste de infiltração - Tensiômetro 6	38
Figura 5-1 – Planta da Pilha Avaliada.....	40
Figura 5-2 - Drenos trapezoidais (Drenos 1, 2 e 4).....	41
Figura 5-3 - Drenos espinha de peixe (Drenos 3 e 5)	41
Figura 5-4 - Tapetes de areia nas saídas de drenagem	42
Figura 5-5 - Drenos de bancada	43
Figura 5-6 – Dados de Precipitação, em mm	44
Figura 5-7 - Sondagens executadas em campo.....	45
Figura 5-8 - Sondagens utilizadas no modelo	46
Figura 5-9 - Planta do modelo geológico-geotécnico	47
Figura 5-10 - Seção AA' do modelo geológico-geotécnico.....	48
Figura 5-11 – Seção BB' do modelo geológico-geotécnico.....	49
Figura 6-1 - Câmara de Richard	53
Figura 6-2 - Condições de contorno	55
Figura 6-3 - Condições de contorno	56
Figura 6-4 - Condições de contorno interior da pilha.....	56
Figura 6-5 - Análise de tolerância	58
Figura 6-6 - Análise da malha	59
Figura 7-1 – Curvas granulométricas do rejeito.	61

Figura 7-2 – Curvas de compactação das amostras.....	63
Figura 7-3 - Permeabilidade determinada em câmaras triaxiais	64
Figura 7-4 - Curva de van Genuchten GC 93% e 100%.....	65
Figura 7-5 - Áreas de contribuição	68
Figura 7-6 - Carga hidráulica – Análise com coeficiente de escoamento de 0,45.....	74
Figura 7-7 - Isosuperfície de poro-pressão 0 – Análise com coeficiente de escoamento de 0,45.....	75
Figura 7-8 - Localização do nível freático – Análise com coeficiente de escoamento de 0,45	76
Figura 7-9 - Carga hidráulica – Análise com coeficiente de escoamento de 0,55.....	78
Figura 7-10 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com coeficiente de escoamento de 0,55	79
Figura 7-11 - Localização do nível freático – Análise com coeficiente de escoamento de 0,55	80
Figura 7-12 - Carga hidráulica – Análise com coeficiente de escoamento de 0,65.....	82
Figura 7-13 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com coeficiente de escoamento de 0,65	83
Figura 7-14 - Localização do nível freático – Análise com coeficiente de escoamento de 0,65	84
Figura 7-15 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 93%.....	86
Figura 7-16 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com grau de compactação de 93%.....	87
Figura 7-17 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 93%	88
Figura 7-18 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 95%.....	89
Figura 7-19 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com grau de compactação de 95%.....	90
Figura 7-20 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 95%	91
Figura 7-21 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 97%.....	92
Figura 7-22 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com grau de compactação de 97%.....	93
Figura 7-23 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 97%	94
Figura 7-24 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 100%	95
Figura 7-25 - Isosuperfície de poro-pressão 0 – Análise com grau de compactação de 100%	96
Figura 7-26 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 100%..	97
Figura 7-27 - Comparação entre vazões obtidas no dreno 1	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Vantagens e limitações do empilhamento de rejeitos filtrados.....	26
Tabela 5-1 – Características principais da estrutura avaliada	39
Tabela 5-2 – Evapotranspiração média	44
Tabela 5-3 - Ensaios de infiltração realizados	50
Tabela 5-4 - Valores de permeabilidade adotados	50
Tabela 6-1 - Análise da tolerância	57
Tabela 6-2 - Análise da malha.....	58
Tabela 7-1 – Caracterização física do rejeito	62
Tabela 7-2 – Resultados dos ensaios de compactação.....	63
Tabela 7-3 - Resumo dos parâmetros hidráulicos do rejeito filtrado.....	66
Tabela 7-4 - Balanço Hídrico	67
Tabela 7-5 - Infiltrações para dimensionamento por métodos analíticos	67
Tabela 7-6 - Áreas de contribuição.....	69
Tabela 7-7 - Vazões obtidas.....	69
Tabela 7-8 - Taxas de infiltração.....	71
Tabela 7-9 - Vazão calculada no dreno 1 para diferentes coeficientes de escoamento	71
Tabela 7-10 - Vazão calculada no dreno 1 para diferentes graus de compactação	85

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Generalidades	14
1.1 Justificativa	14
1.2 Objetivo	15
2. ANÁLISES DE FLUXO	16
2.1 Contextualização	16
2.2 Fluxo em meios saturados	16
2.3 Fluxo em meios não saturados	18
3. TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS	22
3.1 Contextualização	22
3.2 Empilhamento de Rejeito Filtrado	24
4. DRENAGEM EM PILHAS	30
4.1 Considerações gerais	30
4.2 Dimensionamento por Métodos Analíticos	31
4.2.1 Vazão de projeto	31
4.2.2 Balanço hídrico	32
4.3 ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO EM PILHAS DE REJEITO	35
5. ESTUDO DE CASO	39
5.1 Contextualização	39
5.2 Pilha de Rejeito Filtrado de Minério de Ferro	39
5.3 Sistema de Drenagem Interno	40
5.4 Dados Hidrológicos	43
5.5 Fundação da Pilha	44
6. METODOLOGIA	51
6.1 Disposições Gerais	51
6.2 Caracterização do Rejeito	51
6.2.1 Ensaios de Caracterização Física	51
6.2.2 Ensaios de Compactação	51
6.2.3 Ensaios de Permeabilidade e Sucção Matricial	52
6.3 Dimensionamento por Modelos Analíticos	53
6.4 Modelagem numérica	53
6.4.1 Calibração do Modelo Inicial	54
6.4.1.1 Disposições Gerais	54
6.4.1.2 Condições de contorno	54

6.4.1.3	Estudo de Malha e Tolerância	57
6.4.2	Modelo da Pilha	59
6.4.2.1	Modelo geométrico	59
6.4.2.2	Análises realizadas	60
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	61
7.1	Parâmetros Geotécnicos	61
7.1.1	Caracterização Física	61
7.1.2	Compactação	62
7.1.3	Condutividade hidráulica e Sucção Matricial	64
7.2	Modelo Analítico	66
7.2.1	Balanço Hídrico	66
7.2.2	Determinação da Vazão dos Sistemas de Drenagem	68
7.3	Modelagem numérica	70
7.3.1	Disposições Gerais	70
7.3.2	Análises da Influência do Coeficiente de Escoamento	71
7.3.2.1	Coeficiente de escoamento de 0,45	73
7.3.2.2	Coeficiente de escoamento de 0,55	77
7.3.2.3	Coeficiente de escoamento de 0,65	81
7.3.3	Análise da Influência do Grau de Compactação	85
7.4	Análise dos Resultados e Considerações Gerais	98
8.	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1. INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

A demanda por metais básicos na sociedade moderna é crescente, isso, aliado à escassez natural de recursos minerais incentiva as mineradoras a explorarem frentes de lavra que possuem minérios com menores teores, gerando assim, um maior quantitativo de rejeitos em seu beneficiamento.

A disposição de rejeitos resultantes do beneficiamento em barragens se apresenta como o método mais praticado na indústria minerária, devido ao seu baixo custo e facilidade operacional. No Brasil, atualmente, estão cadastradas junto à Agência Nacional de Mineração (ANM) um total de 905 barragens, sendo que destas 455 estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010 e alterada pela Lei nº 14.066/2020 (ANM, 2022).

Diante dos recentes acidentes em barragens de mineração, a gestão de rejeitos nos empreendimentos minerários tem gerado demanda pela avaliação da viabilidade de novas metodologias e alternativas de disposição. Dentre as alternativas, destaca-se as que englobam o desaguamento do rejeito para posterior disposição em pilhas.

O presente trabalho busca compreender o comportamento de empilhamentos de rejeitos filtrados em relação às condições de percolação, com ênfase na avaliação do dimensionamento de seu sistema de drenagem interno. O estudo procura apontar pontos de atenção nos projetos destas estruturas, de tal modo que seja garantida sua segurança e funcionalidade ao longo da vida útil. Além disso, pretende-se avaliar a saturação da pilha e comparar metodologias diferentes para a avaliação do sistema de drenagem interno proposto.

1.1 Justificativa

O empilhamento de rejeito filtrado tem se mostrado como uma alternativa tecnicamente viável para a disposição de rejeitos. Entretanto, não há experiência no Brasil ou no exterior na operação de tais pilhas em locais com as condições climáticas como as existentes no Brasil, com longos períodos chuvosos, que podem

dificultar a trabalhabilidade do material e impor condições de recarga que dificultem a drenagem dos rejeitos dispostos.

Além disso, devido às grandes dimensões previstas para alguns dos projetos em desenvolvimento para essas estruturas, é necessária uma maior compreensão do comportamento esperado para o rejeito em elevadas tensões confinantes. Na literatura há poucos trabalhos que abordem a variação da condutividade hidráulica de rejeitos filtrados com o aumento da tensão confinante e a elaboração de modelagem numérica em pilhas de rejeito, especialmente para pilhas com alturas como a considerada neste estudo.

O presente estudo buscou analisar os parâmetros de condutividade hidráulica e os resultados que podem ser extraídos de uma análise de percolação tridimensional. Com isso, busca-se contribuir com o desenvolvimento técnico sobre o tema e fornecer diretrizes para elaboração de análises percolação tridimensionais de pilhas de rejeito desaguado em condições de clima tropical úmido.

1.2 Objetivo

O estudo teve como objetivo geral avaliar o comportamento hidráulico de uma pilha de rejeito filtrado, assim como avaliar a eficiência do sistema de drenagem interno projetado.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Caracterização hidráulica do rejeito estudado;
- Obtenção dos valores de vazão nos dispositivos de drenagem interna da estrutura por meio de métodos analíticos e modelagem numérica;
- Obtenção da variação da posição da superfície freática na estrutura ao longo do tempo através de modelagem numérica;
- Sugerir diretrizes para elaboração e apresentação de resultados de análises tridimensionais de percolação em pilhas.

2. ANÁLISES DE FLUXO

2.1 Contextualização

A análise de percolação, dentro do contexto da mecânica dos solos e das rochas, busca avaliar as condições de fluxo nestes materiais. Dessa forma, essa análise permite compreender o comportamento da água no solo/rejeito e prever as vazões a serem escoadas em sistemas de drenagem de estruturas de contenção destes materiais e conhecer a posição da superfície freática e suas variações sazonais.

Portanto, neste capítulo apresenta-se uma breve revisão bibliográfica a respeito das metodologias utilizadas nas análises de fluxo aplicadas nos trabalhos realizados no presente estudo e dos parâmetros que compõem as formulações utilizadas.

2.2 Fluxo em meios saturados

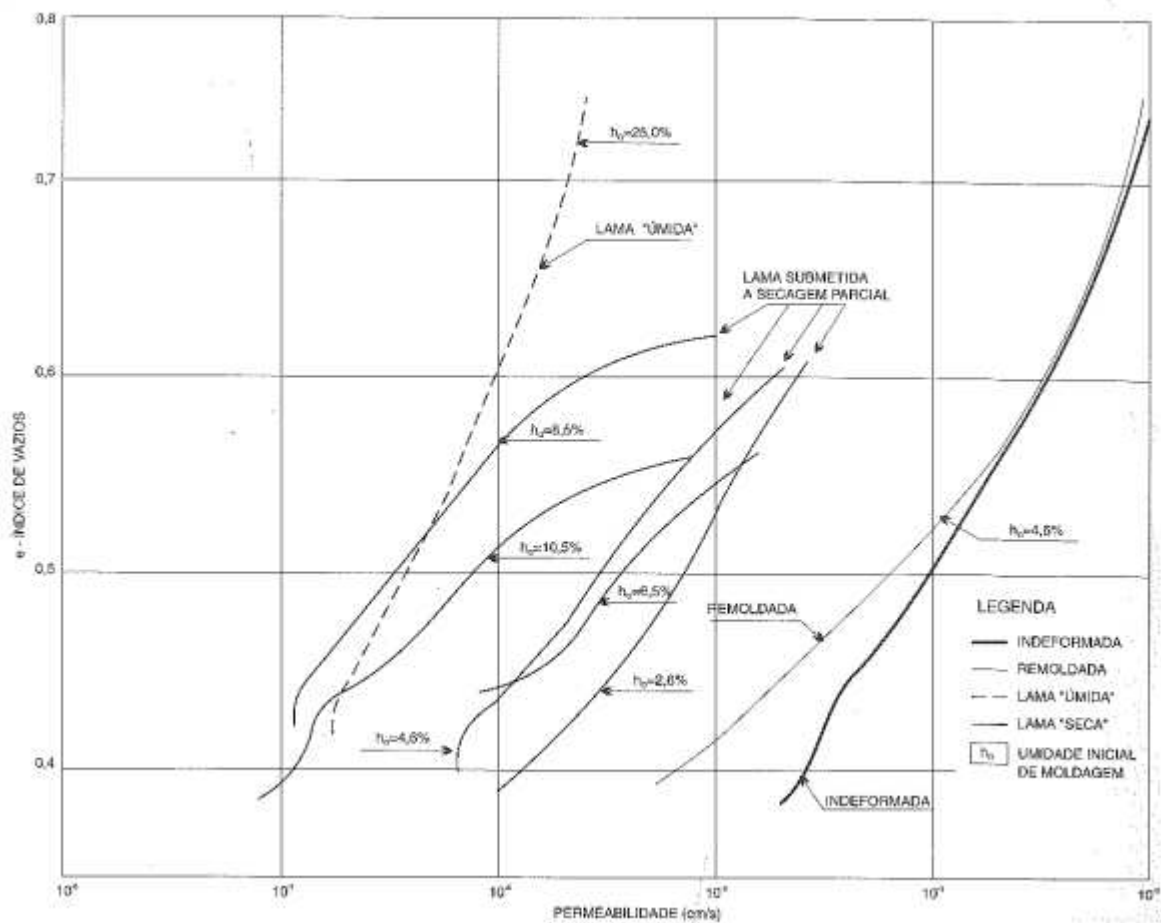
Os estudos de percolação consistem na análise do comportamento da água no interior do solo, rocha ou rejeitos. De acordo com Pinto (2006), estes estudos são importantes porque tem relação com um grande número de problemas práticos, que podem ser agrupados em 3 tipos:

- No cálculo das vazões como, por exemplo, na estimativa da quantidade de água que se infiltra em uma escavação;
- Na análise de recalques porque, frequentemente, o recalque está relacionado à diminuição de índice de vazios, que ocorre pela expulsão de água dos mesmos;
- Nos estudos de estabilidade, porque a tensão efetiva depende da pressão neutra, que, por sua vez, depende das tensões provocadas pela percolação de água.

O fluxo no interior dos solos foi melhor entendido após os experimentos de Darcy (1856), que resultaram em uma constante de proporcionalidade entre velocidade média de fluxo e o gradiente hidráulico, denominada condutividade hidráulica do meio poroso. Esta equação mantém-se válida nos meios porosos para fluxo em regime laminar e em meios saturados.

Com relação à permeabilidade e condutividade hidráulica de solos e rochas, Cruz (2009) afirma que ambas as propriedades são influenciadas basicamente pela dimensão e pela forma dos vazios que ocorrem nos mesmos. De uma forma geral, segundo o autor, espera-se que solos porosos sejam mais permeáveis do que solos densos. O autor complementa essa afirmação com o gráfico apresentado na Figura 2-1, que correlaciona o índice de vazios com a permeabilidade dos materiais.

Figura 2-1 - Gráfico da variação da permeabilidade e índice de vazios.



Fonte: Cruz (2009)

Em casos que o fluxo se dá em condições turbulentas, a equação de Darcy (1856) não é mais válida. Saliba *et al.* (2010) mostram que, para o dimensionamento de um dreno de fundo em pilhas de estéril, a equação de Darcy não é mais válida, pois são formados por blocos de rocha angulosos ou cascalhos de granulometria aberta, de ordem decimétrica, que, em geral, levam a condições de escoamento turbulentas.

Para casos de fluxo turbulento, Li *et al.* (1998) compararam, através de simulações computacionais, formulações que correlacionam a velocidade de fluxo e o gradiente

hidráulico. Como resultado, tem-se, para valores de porosidade entre 0,35 e 0,50 e de gradiente hidráulico entre 0 e 0,7, velocidades de escoamento muito próximas para as equações analisadas.

Dentre as equações analisadas por Li *et al.* (1998) destaca-se a equação de Wilkins, que, de acordo com Saliba *et al.* (2010) é amplamente utilizada no dimensionamento de sistemas de drenagem de pilhas e é definida por:

$$v_v = WR_h^{0,5} i^{0,54} \quad \text{Equação 2.1}$$

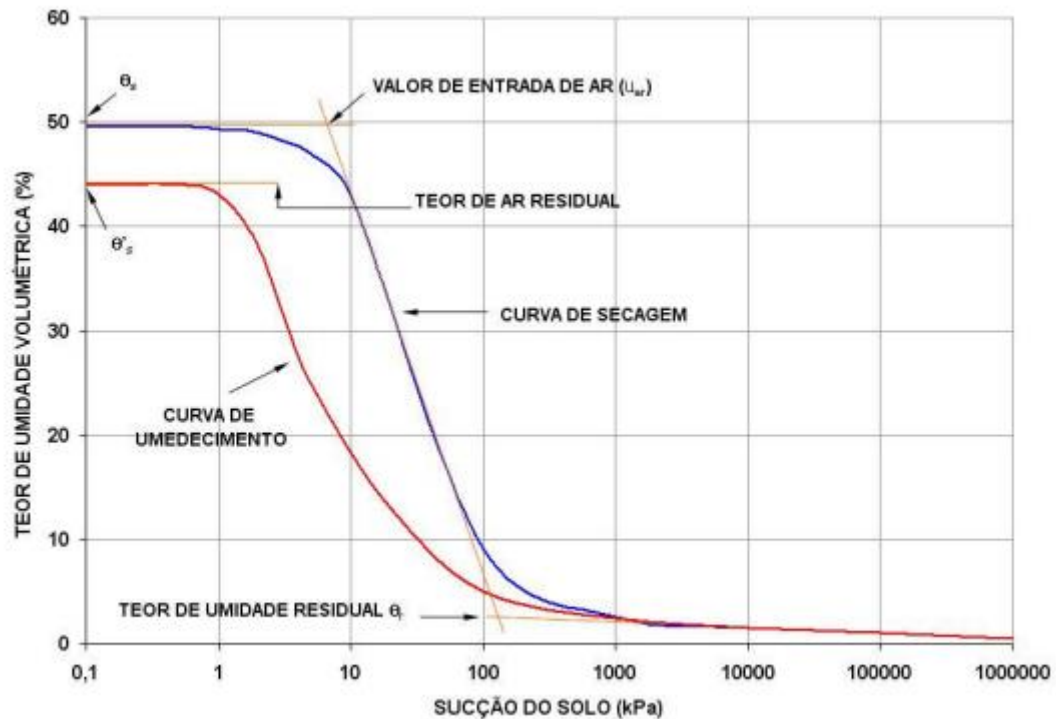
Em que v_v é a velocidade efetiva do escoamento (m/s), W é uma constante igual a 5,25 m^{0,5}/s, R_h é raio hidráulico médio (m), que, de acordo com Leps (1973) pode ser definido como razão entre o volume dos vazios e área superficial das partículas, valor aproximado a $D_{50}/8$.

2.3 Fluxo em meios não saturados

A formulação proposta por Darcy (1984) é válida para fluxo laminar em meios saturados. O fluxo em meio não saturado, segundo Cruz (2009), adquire características mais complexas, porque o gradiente de fluxo passa a ter duas componentes: a primeira relativa à carga gravitacional, e uma segunda relativa à carga resultante da sucção matricial.

O comportamento dos solos não saturados é descrito pelas curvas de retenção de água no solo, nas quais é mostrada a variação do teor de umidade volumétrico (%) com a sucção do solo (kPa), conforme exemplo apresentado na Figura 2-2.

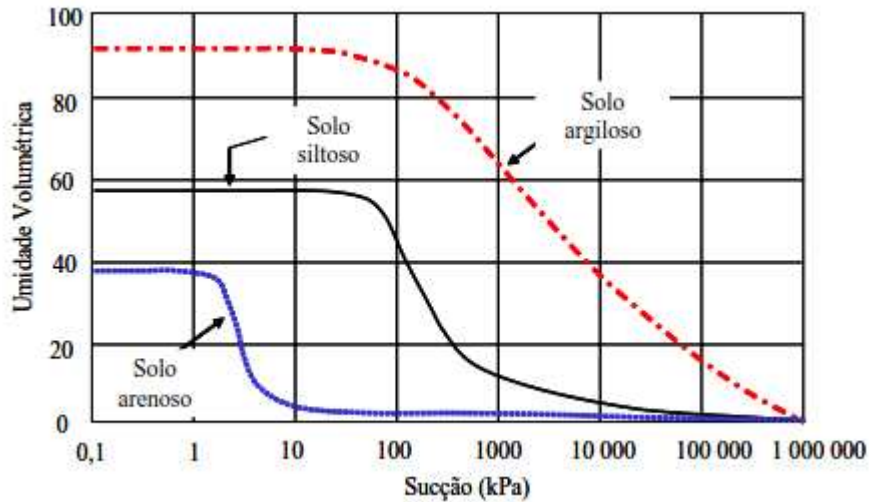
Figura 2-2 - Curva retenção de água no solo



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994) apud Cardoso Junior (2006)

A granulometria do solo influencia diretamente no comportamento da curva de sucção matricial. De acordo com Cardoso Junior (2006), os solos arenosos apresentam pequena variação nos diâmetros dos poros, dessaturando rapidamente após o valor de entrada de ar. Os solos argilosos dessaturam de forma mais lenta, apresentando uma inclinação da curva mais suave e uma distribuição nos vazios dos solos não uniforme. A Figura 2-3 apresenta o comportamento esperado para materiais arenosos, siltsos e argilosos.

Figura 2-3 - Comportamento da curva característica de sucção com a granulometria.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994) apud Cardoso Junior (2006)

Para caracterizar e modelar o comportamento do fluxo em meios não saturados, van Genuchten (1980) introduziu uma equação matemática para a curva de retenção de água. Através desta, é possível correlacionar a umidade e a sucção matricial do material. A equação é válida apenas para valores negativos de poro pressão (sucção) e é dada por:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad \text{Equação 2.2}$$

Em que θ é a umidade volumétrica em uma determinada carga hidráulica h ; θ_r e θ_s são os teores de umidade volumétrica residuais e saturados, respectivamente; h é a pressão neutra atuante (sucção); α , n e m são valores experimentais do modelo, em que α está relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar, n é relacionado com a distribuição do tamanho dos poros e $m = 1 - 1/n$ (Schaap and Leij, 2000).

A variação da permeabilidade (K) do solo não saturado é dada por:

$$K = K_0 S_e^L [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad \text{Equação 2.3}$$

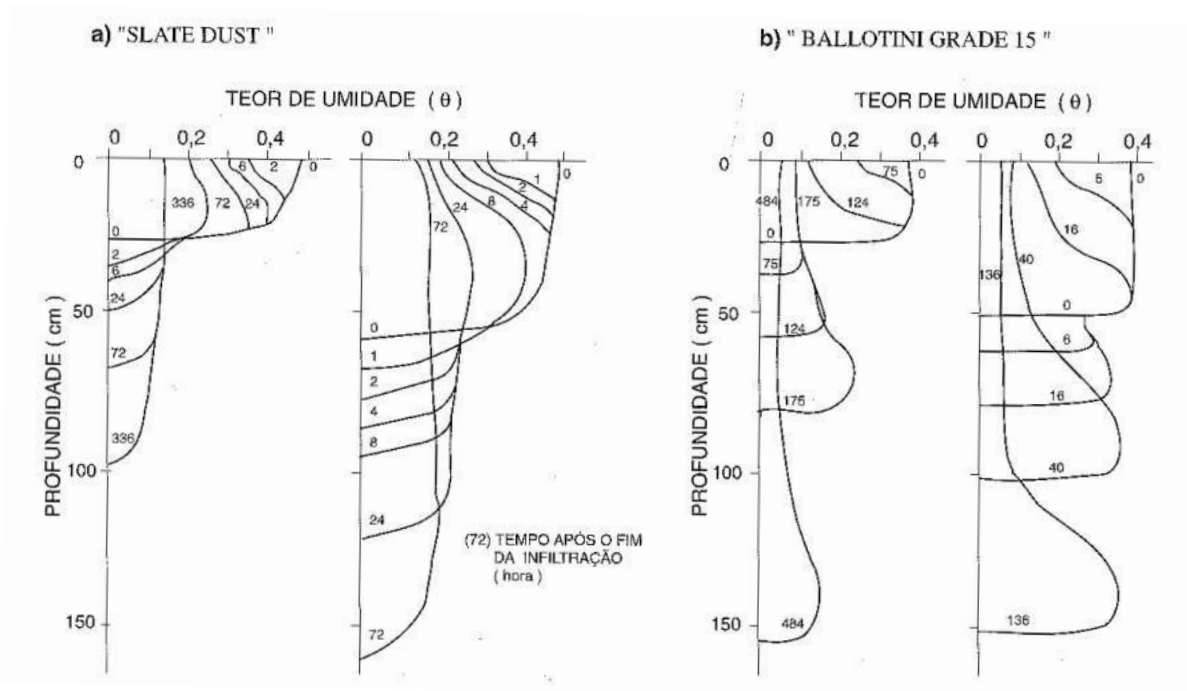
Sendo L uma constante empírica e S_e a saturação equivalente, dada por:

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad \text{Equação 2.4}$$

Com eventos de precipitação, a infiltração pode causar a saturação do solo. Em seu trabalho, Cruz (2009) mostra os estudos de Youngs (1959), nos quais foram

medidos os teores de umidade volumétrica em materiais granulares homogêneos em função do tempo em horas após o fim da infiltração e da profundidade. A Figura 2-4 apresenta os resultados dos estudos, onde é possível observar o avanço da franja de saturação no solo, e que, após certo tempo, as camadas superficiais do solo deixam o estado de saturação.

Figura 2-4 – Teor de umidade após infiltração



Fonte: Youngs (1959), apud Cruz (2009)

3. TECNOLOGIAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

3.1 Contextualização

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) NBR 13028:2017, rejeito é todo e qualquer material descartado durante o processo de beneficiamento de minério.

Os rejeitos podem ser dispostos de diferentes formas e com características distintas, visto que o modelo de disposição é influenciado pela natureza do processo de mineração, pelas condições geológicas e topográficas da região, pelas propriedades mecânicas dos materiais, pelo poder de impacto ambiental de contaminantes dos rejeitos e pelas condições climáticas da região (IBRAM, 2016).

A metodologia a ser utilizada na disposição de rejeitos depende do teor de sólidos do mesmo. As nomenclaturas utilizadas para as metodologias podem sofrer variações de acordo com o autor. Portanto, para os propósitos deste estudo, serão utilizadas as definições das metodologias de disposição apresentadas por Watson *et al.* (2010):

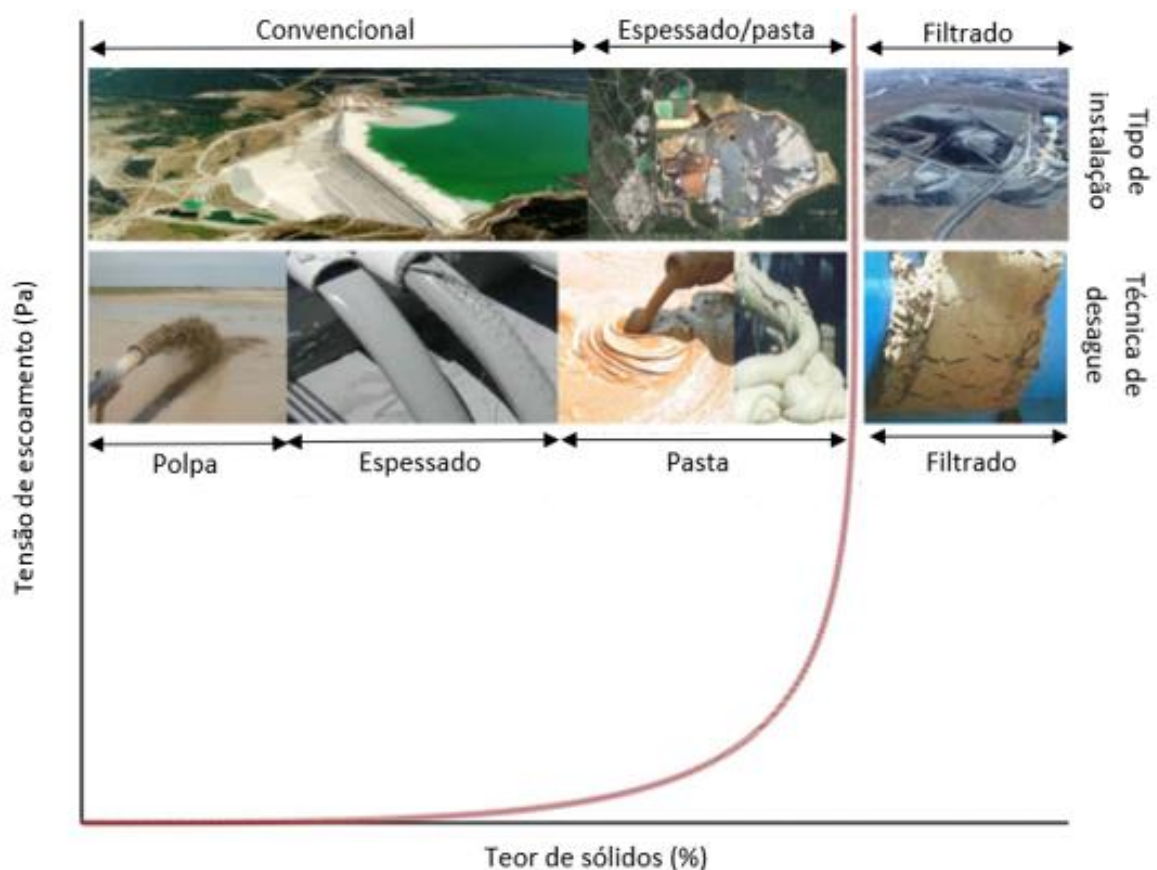
- Disposição de rejeitos convencional: envolve a descarga de rejeitos em um teor de sólidos entre 25 a 45%. Os rejeitos convencionais também podem se referir à pasta de rejeitos produzida em espessadores rasos. Geralmente, essas densidades de polpa resultam em teores de sólidos da ordem de 30 a 55%, recuperando parte da água para reutilização na usina. Como resultado, o método convencional é atualmente o método de disposição de rejeitos mais comum;
- Rejeitos espessados: envolve a produção de uma pasta de rejeitos que tende a não segregar, para o que são utilizados espessantes de alta densidade ou de cone profundo. O teor de sólidos dos rejeitos espessados geralmente varia de 50 a 70%. O rejeito espessado pode, usualmente, ser bombeado com a utilização de bombas centrífugas;
- Rejeitos em pasta: envolve a desidratação do rejeito com a utilização de espessantes específicos, ou espessantes de densidade ultra alta, para obter uma densidade de pasta que ainda seja bombeável. O teor de sólidos de

rejeitos em pasta é geralmente entre 70 e 85%. Bombas de deslocamento positivo ou equipamento similar são necessários para transportar a polpa;

- Rejeitos filtrados: envolve a remoção de água por métodos de vácuo ou pressão. Os rejeitos são "desidratados" usando filtros de tambor, disco ou de esteira (por vácuo) ou com filtros prensa ou filtros de prensa de esteira (usando pressão) para densidades de polpa superiores a 85% de sólidos em peso. O material após secagem requer transporte por caminhão ou transportador.

A Figura 3-1 resume os métodos de disposição de rejeito, e mostra que a tensão cisalhante necessária para o escoamento do fluido (tensão de escoamento) aumenta com o aumento no teor de sólidos da disposição.

Figura 3-1 - Métodos de disposição de rejeitos



Fonte: Adaptado de Klohn Crippen Berger (2017)

O estudo de caso apresentado no presente trabalho trata de rejeitos filtrados dispostos em pilhas. Logo, este método é tratado de forma mais detalhada a seguir.

3.2 Empilhamento de Rejeito Filtrado

Nesse sistema, o rejeito é empilhado em estado não saturado, com teor de umidade que pode chegar próximo aos teores de umidade ótimos de compactação. Para tal, é necessário que o rejeito seja previamente filtrado, com o objetivo de aumentar seu teor de sólidos. Segundo Nery (2013), a filtração é definida como uma operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido. O líquido que atravessa o meio filtrante é denominado filtrado e os sólidos retidos constituem a “torta”.

Lara *et al.* (2013) apresentam a relação entre as propriedades físicas dos rejeitos e a eficiência de sua filtração:

- Com relação ao tamanho das partículas dos sólidos, em particular o teor de finos: o processo de filtração geralmente é mais eficiente quando o teor de argila é baixo.
- Com relação ao peso específico dos rejeitos: um maior valor de peso específico resulta em um rejeito com melhores características para filtração.

Após o processo de filtração, o material se encontra em um estado solto, possuindo baixa densidade, pelo que, para se obter um maior peso específico em sua disposição e uma maior resistência da pilha, faz-se necessária sua compactação. De acordo com Davies (2011), seu grau típico de saturação se encontra entre 70 e 85%, e, com isso, é possível a utilização de equipamentos tradicionais para sua compactação.

Segundo Lara *et al.* (2013), como o método exige compactação, o teor de umidade na planta de filtração e o teor de umidade ótimo são importantes condicionantes, já que uma grande diferença entre seus valores pode inviabilizar o método. Uma solução para este problema é a estocagem do rejeito filtrado para secar, conforme descrito por Lara e León (2011). Em seu trabalho os autores descrevem a operação de uma pilha de rejeito nas instalações de Cerro Lindo, no Peru, onde o rejeito era filtrado e depositado na pilha, mas sua compactação ocorria apenas 3 a 5 dias depois de espalhado, o que permitia que o teor de umidade se reduzisse ao ótimo,

permitindo uma melhor compactação. Além disso, para o empilhamento, os autores recomendam camadas de 30 a 35 centímetros.

De acordo com Cooling (2007), o método é mais oneroso quando comparado aos métodos tradicionais de disposição de rejeito em barragens, entretanto, o mesmo autor afirma que seu custo de implementação pode ser justificável por ser possível obter um depósito com maior densidade e, assim, armazenar uma quantidade maior de rejeito no mesmo volume de pilha. Além disso, o método também permite pilhas com alturas que não seriam econômicas em métodos convencionais, reduzindo sua área de implantação e, com isso, o potencial de contaminação de águas subterrâneas, quando for o caso.

É de se esperar, portanto, que a técnica de rejeito filtrado proporcione uma redução da área impactada com a disposição dos rejeitos. Todavia ressalta-se que, dependendo das condições topográficas, o ganho de área ao se adotar a pilha de rejeito filtrado pode ser tornar inexpressivo (PORTES, 2013).

Em seu trabalho, Davies (2011) sintetiza sua experiência na aplicabilidade de projetos de rejeito filtrado. Segundo o autor, os projetos mais viáveis possuem um ou mais dos seguintes atributos:

- Localizar-se em regiões áridas, onde a conservação da água é crucial (por exemplo, Austrália Ocidental, Sudoeste dos Estados Unidos, grande parte da África, algumas regiões da América do Sul, regiões árticas do Canadá e Rússia);
- Ter fluxogramas em que a recuperação econômica (mercadoria ou agente(s) de processo) seja aprimorada por filtragem de rejeitos;
- Localizar-se em áreas onde a sismicidade muito alta contraindica algumas formas de disposição convencionais;
- Localizar-se em regiões frias, onde o manuseio da água é muito difícil no inverno;
- Ter considerações topográficas que excluam a possibilidade de construção de barragens convencionais, com uma baixa relação entre os volumes da barragem e armazenados; e

- Considerar que a responsabilidade operacional e/ou de fechamento de uma barragem de rejeitos convencional é superior à de desenvolver uma pilha seca.

A Klohn Crippen Berger (2017) elaborou um estudo comparativo sobre os métodos de disposição de rejeito. No que tange à disposição a disposição em pilhas de rejeitos filtrados, foram listadas as vantagens e limitações resumidas na Tabela 3-1.

Tabela 3-1 - Vantagens e limitações do empilhamento de rejeitos filtrados

Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Pode permitir disposição em áreas com topografia íngreme, onde métodos convencionais não são práticos; • A taxa de recuperação de água no processo de filtragem é uma vantagem em regiões onde a água é um recurso escasso; • Há uma maior flexibilidade nas estratégias de disposição do rejeito, o que pode permitir avanços progressivos; • O plano de fechamento tende a ser mais simples; • A ruptura hipotética da estrutura tende a ser local, a menos que o material atinja alguma estrutura com água (barragem).
Limitações	<ul style="list-style-type: none"> • Pode não ser aplicável para todas as granulometrias de rejeito, rejeitos argilosos são mais desafiadores para filtrar até o teor de umidade ótimo; • As plantas de filtragem requerem mais atenção operacional. Bacias de secagem adicionais podem ser necessárias para o caso de mal funcionamento do sistema; • A depender do teor de umidade do rejeito e das condições climáticas, a trafegabilidade sobre os rejeitos pode ser desafiadora; • A disposição é desafiadora em regiões de clima úmido; • A disposição por caminhões pode ser difícil de escalar para grandes volumes de rejeitos; • Requer zonas estruturais, que podem ser constituídas por rejeito compactado; • Requer estruturas de contenção de sedimentos; • Precipitações e ventos podem aumentar a erosão superficial dos taludes;

Fonte: Klohn Crippen Berger (2017)

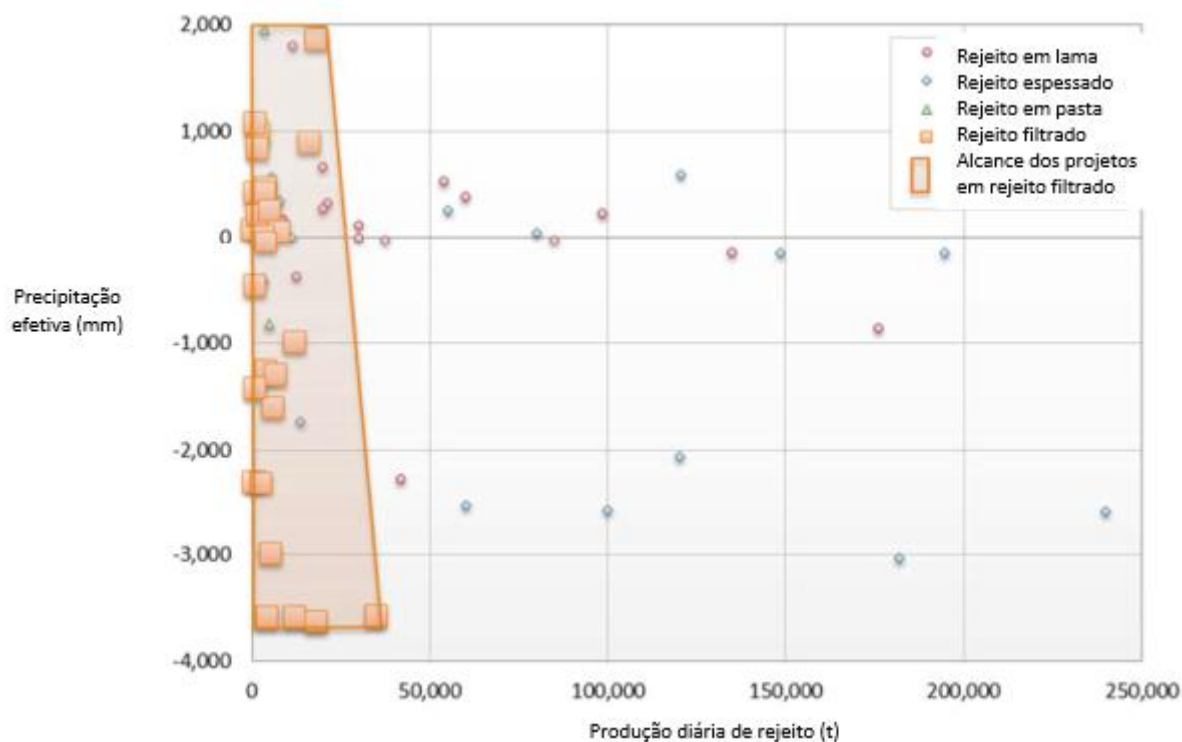
Segundo Nery (2013), um dos maiores desafios para a disposição do resíduo seco deve-se às variações das condições climáticas, como, por exemplo, períodos de

chuvas intensas durante o ano, que podem causar impactos na obtenção da compactação desejada para o rejeito. No mesmo trabalho a autora propõe uma solução para este problema, conforme se descreve a seguir.

Uma solução é projetar o sistema de disposição com zoneamento, no qual pode-se dispor o rejeito com as condições ótimas especificadas para a compactação formando uma espécie de bacia e, no seu interior, depositar o rejeito no período chuvoso, quando não se espera obter as condições desejadas, sendo que esta zona interior não terá influência na estabilidade global da pilha (NERY, 2013).

A experiência atual em pilhas de rejeito filtrado é composta por estruturas com produção de rejeito relativamente baixa, quando comparados a outras metodologias de disposição de rejeitos. Na Figura 3-2 são apresentados os casos históricos de disposição de rejeitos filtrados, onde é possível notar a concentração dos casos em locais com baixa precipitação efetiva (precipitação anual menos evaporação anual) e em estruturas com baixa produção de rejeitos.

Figura 3-2 - Casos históricos de pilhas de rejeito filtrado



Fonte: Klohn Crippen Berger (2017)

Davies (2011) afirma que o sistema de drenagem da pilha de rejeito seco normalmente consiste na construção de dois sistemas de controle de águas. O primeiro consiste na coleta e desvio de água sem contato com o rejeito (isto é, água de superfície e subterrânea da bacia hidrográfica). Esse sistema geralmente consiste em canaletas para o escoamento superficial ao redor do local. Enquanto o segundo consiste em um sistema que intercepta e coleta águas superficiais e de infiltração da pilha. Esse sistema usualmente consiste em um sistema de drenagem horizontal com dreno de pé, além de um reservatório para a água coletada.

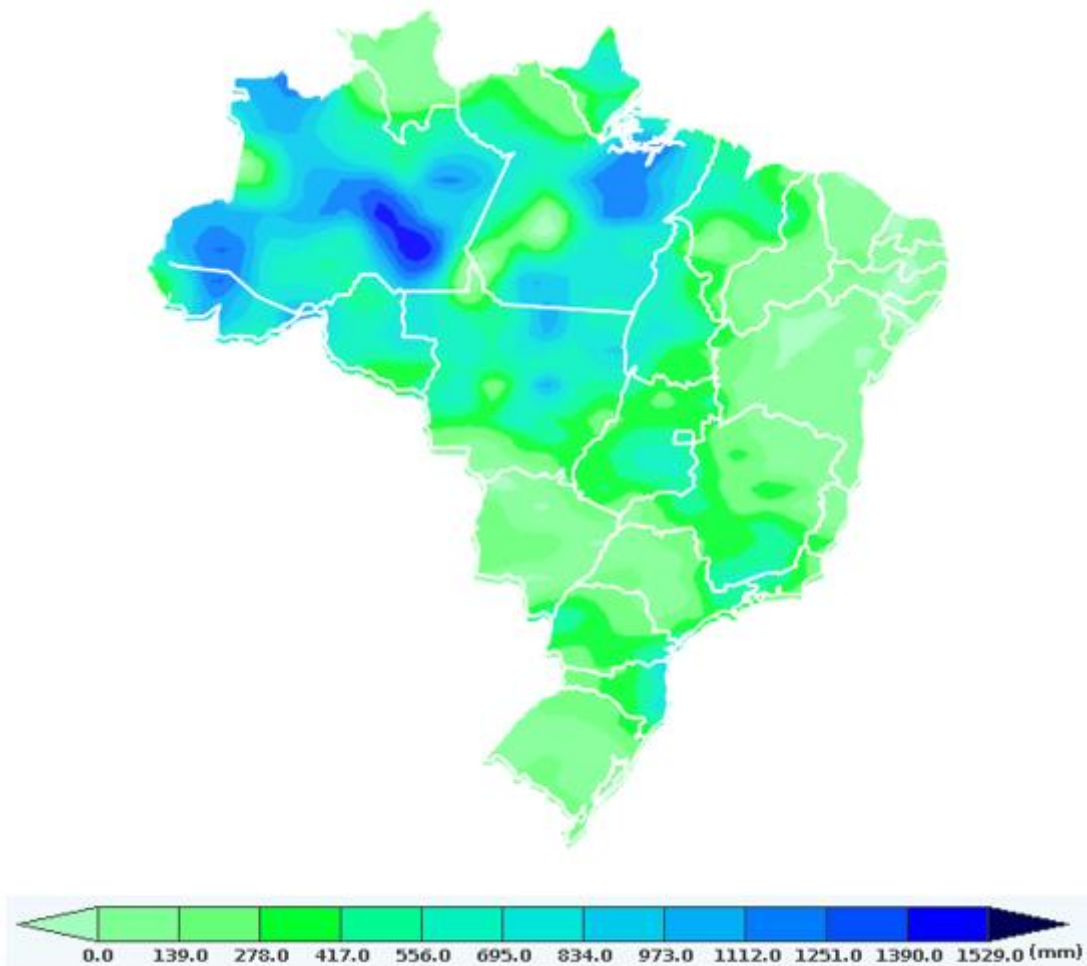
Em seu trabalho, Crystal (2018) destaca que se deve dar atenção especial para os sistemas de drenagem na base das pilhas, uma vez que o rejeito não se encontra seco e as camadas inferiores podem se tornar saturadas durante os alteamentos subsequentes. A autora complementa citando que as camadas inferiores podem usualmente ser formadas de materiais dispostos fora de especificação e com elevados teores de umidade, uma vez que são dispostas durante a fase inicial da estrutura, em que os filtros estão em processo de otimização.

Em contraponto, Davies (2011) observa que o teor de umidade ótimo de compactação dos rejeitos normalmente é similar à umidade residual do material e, portanto, a drenagem no sentido da fundação é lenta e limitada em questão de volume.

Outro possível problema relacionado ao sistema de rejeito filtrado é sua erodibilidade. De acordo com Portes (2013), uma forma de minimizar problemas relacionados com a erosão é a revegetação da pilha concomitante à sua execução.

No contexto brasileiro, nota-se que grande parte das áreas de exploração mineral em volumes significativos se localizam em regiões que apresentam em excedente hídrico durante o período chuvoso, ou seja, regiões em que, durante esse período, ocorrem taxas de precipitação maiores que as de evapotranspiração, como pode ser observado no mapa de excedente hídrico no período chuvoso de 12/2020 a 03/2021 apresentado na Figura 3-3. Dessa forma, durante períodos do ano, são esperadas dificuldades na operação das pilhas, com desafios na compactação das elevadas quantidades de rejeitos produzidos.

Figura 3-3 – Excedente hídrico no período chuvoso de 12/2020 a 03/2021.



Fonte: INMET, 2021

4. DRENAGEM EM PILHAS

4.1 Considerações gerais

As pilhas consistem em estruturas em que os materiais são depositados na fase sólida e, portanto, não aquosa. Hawley e Cuning (2017) introduzem o tema de drenagens em pilhas de estéril afirmando que na mineração a céu aberto em terrenos montanhosos, muitas vezes há necessidade, devido às limitações econômicas e de espaço, de colocar estéril em vales. Esses vales invariavelmente contêm riachos (perenes ou temporários) que devem ser desviados ao redor da instalação em um canal de desvio ou ao longo do fundo da pilha em um dreno construído com rochas. Um dreno de fundo pode ser a opção preferida onde um canal de desvio é de difícil construção e manutenção ou onde não seja viável interceptar fluxo suficiente para que o canal seja totalmente eficaz. Um exemplo de dreno de fundo de pilha é apresentado na Figura 4-1, na qual é possível observar a camada drenante e as camadas de transição.

Figura 4-1 - Dreno de fundo de pilha



Fonte: Adaptado de Hawley e Cuning (2017)

No âmbito da drenagem interna de pilhas de rejeito filtrado e compactado, Davies e Rice (2001) afirmam que se há controle do teor de umidade e do grau de compactação, a percolação na pilha é insignificante. Os autores ainda concluem recomendando que, ao invés de criar um sistema de drenagem complexo para

interceptar uma percolação que provavelmente nunca existirá, é mais apropriado que esses recursos sejam aplicados no manejo de águas superficiais.

4.2 Dimensionamento por Métodos Analíticos

4.2.1 Vazão de projeto

Para o dimensionamento de sistema de drenagem interno de pilhas de estéril, Saliba *et al.* (2010) afirmam que, até a data de elaboração de seu trabalho, o sistema de drenagem interna de pilhas de estéril no Brasil vinha sendo dimensionado segundo aplicação da lei de Darcy (1856), válida para regime de escoamento laminar, a partir de vazões de projeto pontualmente medidas ou empiricamente determinadas.

Em seu trabalho, Saliba *et al.* (2010) propõem que a vazão nominal a escoar pelo dreno é composta por uma parcela proveniente da recarga aplicada sobre a estrutura em questão (pilha, maciço, dique etc.) e da recarga aplicada à bacia de contribuição a montante, que se mostra no desaguamento em nascentes e na vazão de base de córregos em condições permanentes. E que a determinação destas parcelas pode ser feita por meio de monitoramento de vazões ou por balanço hídrico aplicado a estas áreas, situação mais comum na prática.

Com relação às pilhas de estéreis rochosos em vales, Hawley e Cuning (2017) sugerem que os drenos devem ser projetados para transmitir pelo menos o fluxo de uma tempestade de 24 h com tempo de retorno de 200 anos durante as operações. O autor ainda afirma que até 60% da precipitação em uma superfície de pilha de estéril pode se infiltrar no depósito e convergir para aos drenos de fundo. Em seu trabalho, o autor não cita a utilização de fatores de segurança.

Uma premissa utilizada por Saliba *et al.* (2010) no dimensionamento dos sistemas de drenagem é de que o gradiente hidráulico do dreno deve ficar restrito à declividade do terreno, entretanto, na atualização de seu trabalho, Saliba *et al.* (2016) afirmam que essa premissa para o gradiente hidráulico tem resultado em drenos excessivamente grandes. Isto porque, nesta hipótese, admite-se que toda a vazão coletada precisa ser conduzida pelo dreno, sem admitir que possa haver armazenamento na pilha. O autor ainda conclui que, considerando as

condutividades hidráulicas dos materiais que compõem a maioria das pilhas de estéril, em que predominam solos finos, dificilmente não haverá armazenamento na pilha.

Em sua revisão de metodologia para dimensionamento dos sistemas de drenagem internos das pilhas de estéril, Saliba *et al.* (2016) recomendam que seja utilizada a infiltração média anual, o que difere de Saliba *et al.* (2010), que recomendavam a utilização da infiltração mensal.

Por fim, ressalta-se que, até o momento de elaboração do presente trabalho, não existem normas nacionais ou internacionais vigentes que regulamentem projetos de pilhas de rejeitos. No cenário nacional, tem-se em vigor a norma NBR 13029 (ABNT, 2017) que especifica os requisitos mínimos para a elaboração e apresentação de projeto de pilha para disposição de estéril gerado por lavra de mina a céu aberto ou de mina subterrânea. No que diz respeito aos sistemas de drenagem das pilhas, a norma recomenda a utilização de um fator de segurança mínimo em seu dimensionamento de 1,5 para as vazões medidas e de 2,5 para vazões calculadas.

4.2.2 Balanço hídrico

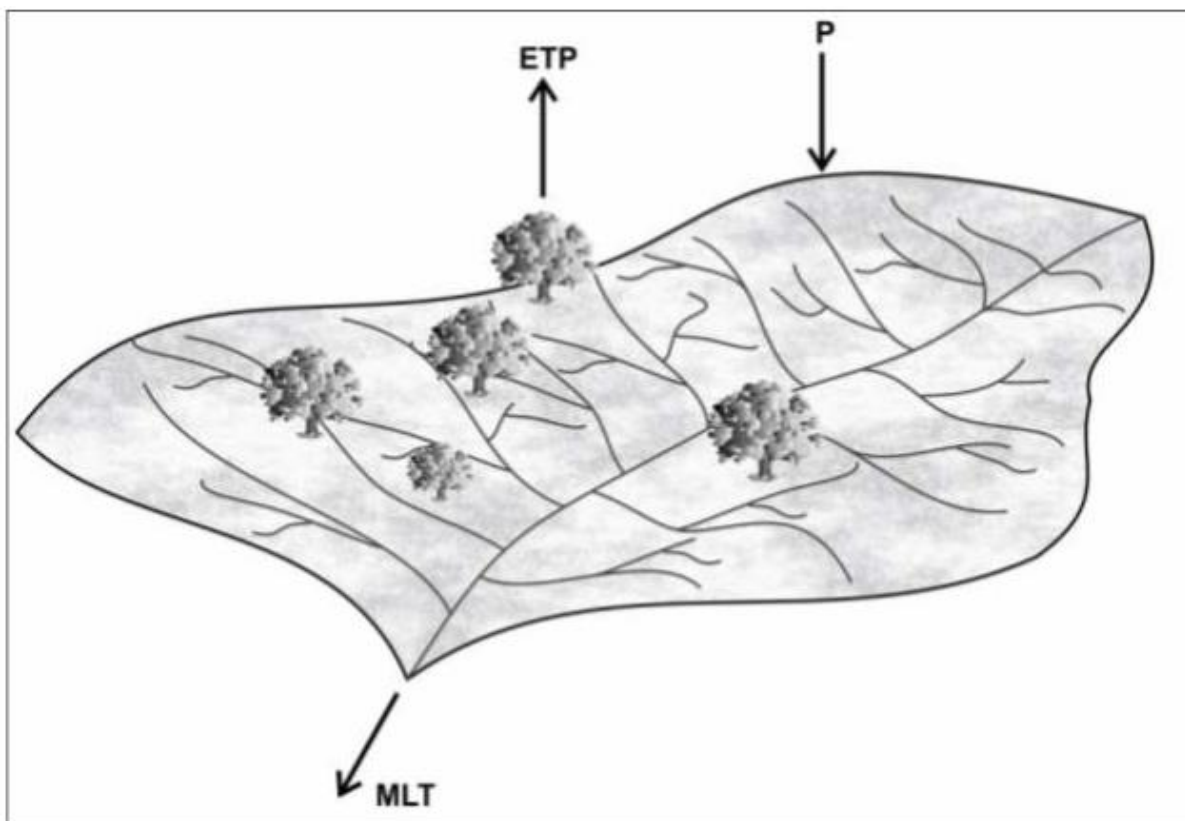
Para o dimensionamento das vazões no sistema de drenagem interno pelos métodos apresentados no item 4.2.1 (Saliba *et al.*, 2010 e Saliba *et al.*, 2016) é necessária a obtenção da infiltração na pilha e em sua área de contribuição. Um dos métodos utilizados para a obtenção desse parâmetro é o balanço hídrico.

Em linhas gerais, segundo Pinheiro (2011), o balanço hídrico representa a aplicação da equação da continuidade de massas, quando a matéria em análise é a água. O conceito de continuidade de massas estabelece que a quantidade de matéria que entra em um sistema é igual à quantidade de matéria que sai do mesmo, em um intervalo de tempo determinado ou para as condições médias de funcionamento das variáveis de entrada e saída.

Para o dimensionamento de pilhas, usualmente é considerado o balanço hídrico de bacias hidrográficas, em que, segundo Pinheiro (2011), para uma bacia com lençol freático estanque, sem comunicação com os reservatórios de água subterrânea das bacias adjacentes, considera-se como única variável de entrada a precipitação (P) e

como únicas variáveis de saída a evapotranspiração real (ETP) e a vazão média de longo termo (MLT). A Figura 4-2 ilustra esse conceito de balanço hídrico simplificado.

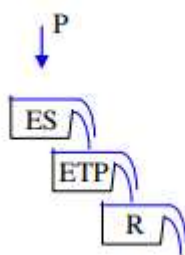
Figura 4-2 - Balanço hídrico de bacias hidrográficas



Fonte: Pinheiro (2011)

Saliba *et al.* (2010) apresentam um modelo esquemático conceitual para a determinação da recarga do terreno, no qual apenas após completos os reservatórios de escoamento superficial e de evapotranspiração, ocorrerá a recarga. Esse modelo é apresentado na Figura 4-3, onde P é a precipitação, ES o escoamento superficial, ETP a evapotranspiração e R a recarga para o aquífero, que eventualmente se direcionará para o dreno.

Figura 4-3 – Modelo conceitual de balanço hídrico



Fonte: Saliba *et al.* (2010)

O escoamento superficial usualmente é considerado como um percentual da precipitação, Pinheiro (2011) apresenta a tabela mostrada na Figura 4-4 como uma recomendação para o coeficiente de escoamento superficial.

Figura 4-4 - Coeficientes de escoamento superficial

TIPOLOGIA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO	COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL
Sem vegetação (solo exposto)	0,65 / 0,40
Campo natural (vegetação baixa)	0,50 / 0,30
Arbusto cerrado (vegetação média)	0,45 / 0,30
Floresta e matas densas	0,05 / 0,20
Áreas de cultivo (sem curvas de nível)	0,35 / 0,25
Cava	0,60 / 0,70
Pilhas de estéril (fase inicial, superfície exposta)	0,60 / 0,50
Pilhas de estéril (fase final, c/ cobertura vegetal)	0,50 / 0,30
Taludes de barragens gramados	0,50 / 0,30

Fonte: Pinheiro (2011)

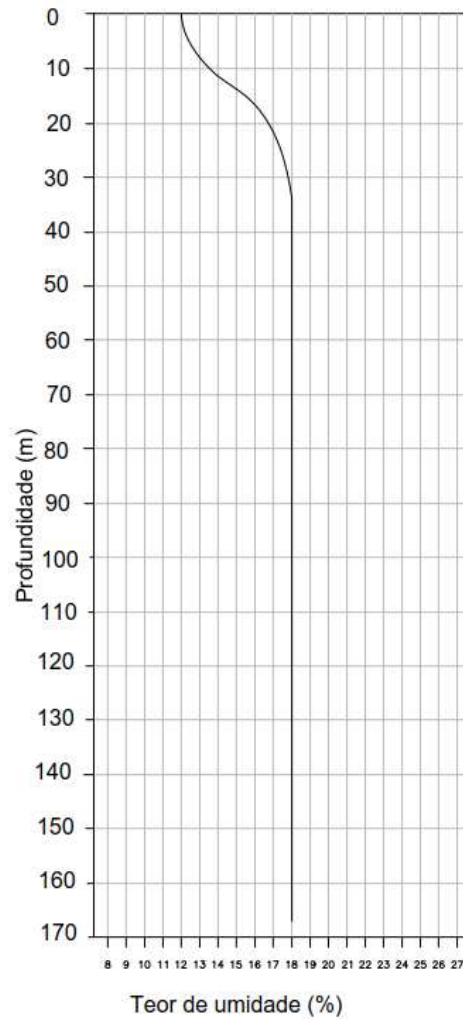
Para determinação dos parâmetros de evapotranspiração são utilizadas medições em estações meteorológicas, entretanto, segundo Reichardt e Timm (2004), estima-se a evapotranspiração potencial (ETP_{pot}) como o produto entre a evaporação medida em tanque classe A (E) e um fator de correlação (k) igual a 0,8 para áreas naturais e 0,7 para áreas de pilha.

4.3 ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO EM PILHAS DE REJEITO

A análise de percolação através de modelagem numérica permite, além de avaliar as vazões nos sistemas de drenagem, entender como ocorre o fluxo na estrutura estudada. No que se refere às análises de percolação em pilhas de rejeitos filtrados, AMEC (2009) realizou análises bidimensionais para uma pilha de rejeitos, localizada no estado do Arizona, Estados Unidos, região de clima semiárido. No estudo foi considerada a precipitação, a evaporação e o escoamento superficial no rejeito. O rejeito analisado possui granulometria silto-arenosa e é proveniente da mineração de cobre. No modelo foram considerados os teores de umidade na disposição e residuais do material, 18% e 11%, respectivamente. Como resultados dos estudos, pode-se destacar os seguintes pontos:

- Os resultados do modelo de infiltração mostram que a infiltração dos rejeitos da pilha seca se deve exclusivamente à drenagem de água presente nos poros do rejeito, à medida que, no modelo, o teor de umidade reduz do valor de disposição, de 18 %, para o valor de capacidade de campo, de 11 %. Esta observação indica que as influências da precipitação são insignificantes para a infiltração geral da pilha de rejeito filtrado; e
- O teor de umidade dos rejeitos reduz gradualmente ao longo do tempo; e
- A Figura 4-5 apresenta um perfil típico de teor de umidade com profundidade ao longo do tempo. Esta figura fornece uma ilustração da falta de recarga proveniente da precipitação nos rejeitos da pilha. Os metros superiores dos rejeitos da pilha funcionam como uma unidade de armazenamento e liberação, em que a umidade perdida na evaporação é reabastecida pela precipitação. As perdas por evaporação são evidenciadas pela redução do teor de umidade na superfície dos rejeitos da pilha.

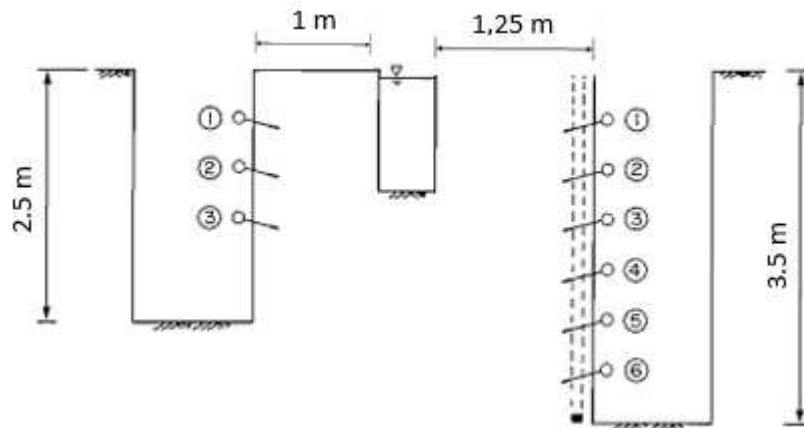
Figura 4-5 - Variação do teor de umidade com a profundidade



Fonte: Adaptado de AMEC (2009).

Em seu trabalho, Wong *et al.* (1988) realizaram uma comparação de dados obtidos em campo com análises de percolação em uma pilha de rejeitos de potássio. Em campo, escavou-se uma trincheira, que foi preenchida de água, e dois poços onde foram instalados instrumentos para medição da poro-pressão. O esquema dos ensaios é apresentado na Figura 4-6.

Figura 4-6 - Esquema de ensaios de campo



Fonte: Adaptado de Wong *et al.* (1988)

A partir dos ensaios e da modelagem apresentados por Wong *et al.* (1988), foi possível observar a diferença da chegada da franja de saturação para instrumentos instalados em diferentes cotas. A variação da poro-pressão com o tempo para os tensiômetros número 1 e número 6, instalados a uma profundidade de 0,5 m e 3 m, respectivamente, são apresentados na Figura 4-7 e na

Figura 4-8. Observa-se que o tempo para a chegada da franja de saturação variou de 25 minutos (tensiômetro 1) a 300 minutos (tensiômetro 6). O que mostra uma tendência de saturação das camadas superiores em eventos pluviométricos.

Figura 4-7 - Teste de infiltração - Tensiômetro 1

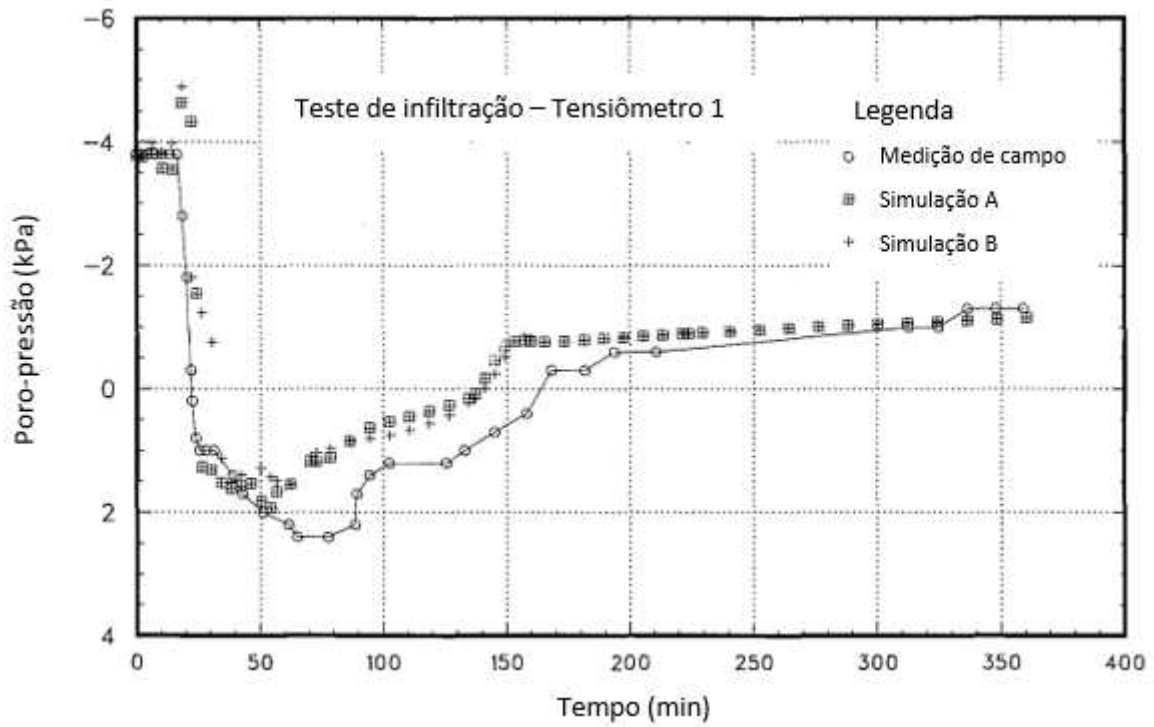
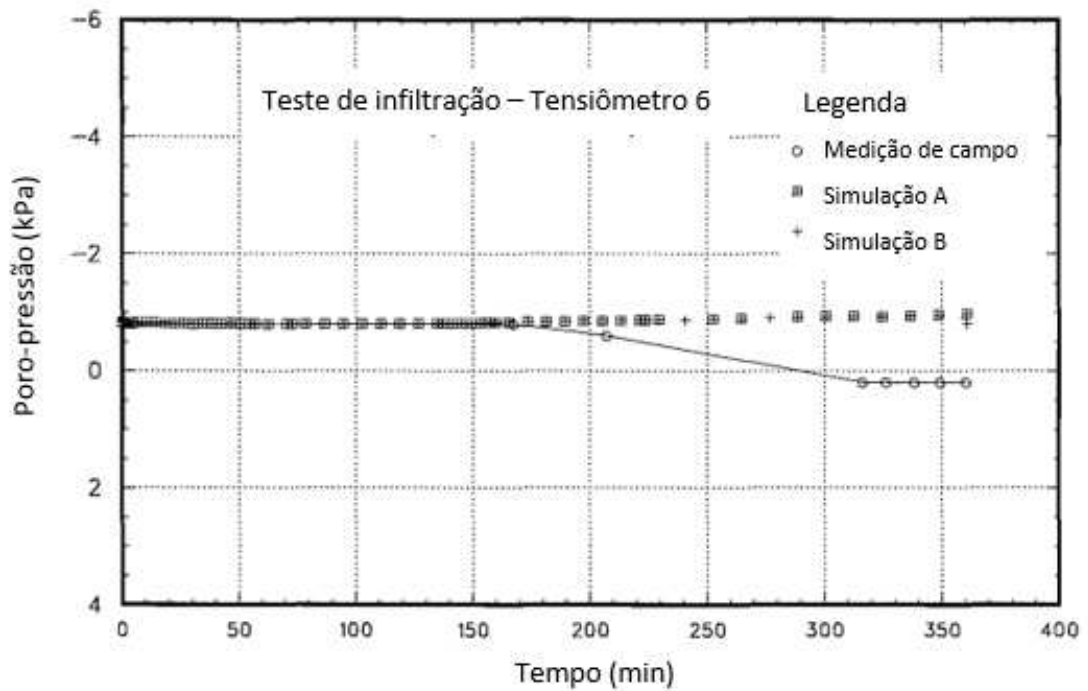
Fonte: Adaptado de Wong *et al.* (1987)

Figura 4-8 - Teste de infiltração - Tensiômetro 6

Fonte: Adaptado de Wong *et al.* (1987)

5. ESTUDO DE CASO

5.1 Contextualização

O estudo de caso desta pesquisa compreende a análise de percolação tridimensional de uma pilha de rejeito filtrado projetada no Quadrilátero Ferrífero. Esta análise foi realizada através do software RS3, desenvolvido pela empresa canadense Rocscience Inc.®. O presente capítulo descreve as principais características iniciais consideradas para a estrutura. Ressalta-se que os aspectos relativos à modelagem computacional são abordados no item 6.4 deste trabalho.

5.2 Pilha de Rejeito Filtrado de Minério de Ferro

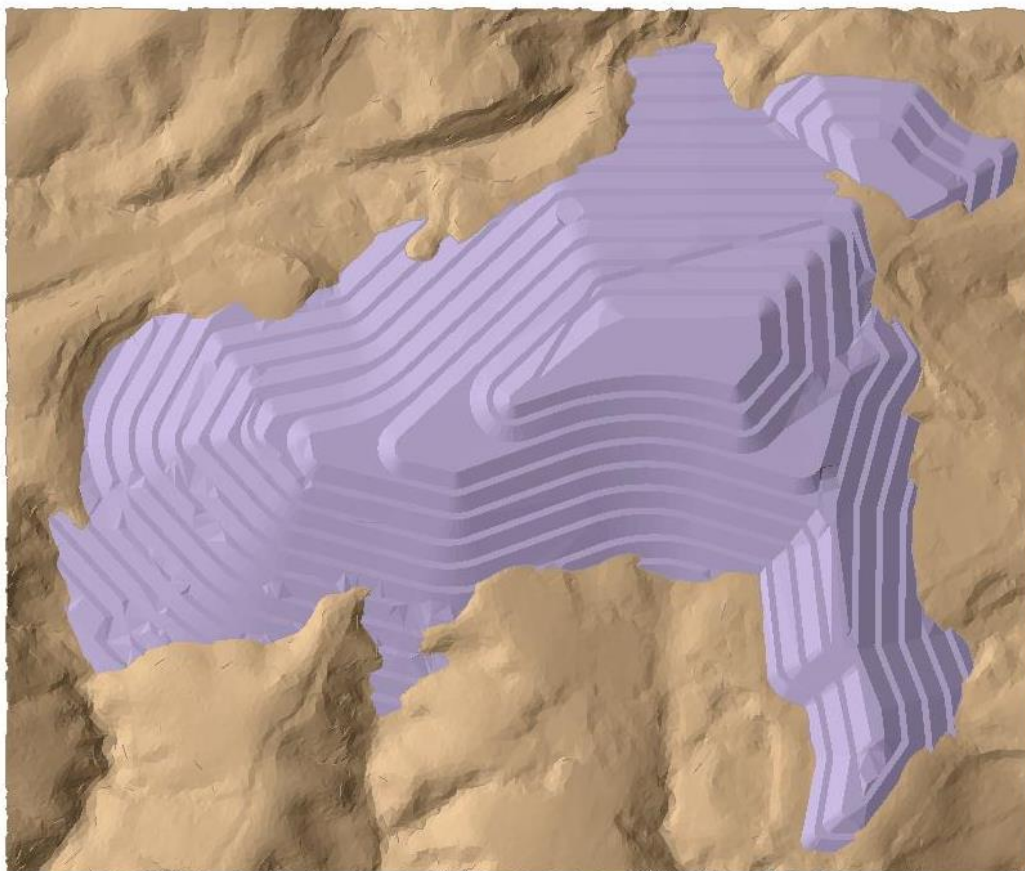
A pilha estudada no trabalho é uma estrutura projetada para o armazenamento de rejeitos filtrados e compactados gerados pelo beneficiamento do minério de ferro no Quadrilátero Ferrífero. A Tabela 5-1 apresenta um resumo das características principais do empilhamento. A Figura 5-1 ilustra a disposição da estrutura em planta.

Tabela 5-1 – Características principais da estrutura avaliada

Características Principais	
Material armazenado	Rejeito Filtrado
Localização	Quadrilátero Ferrífero, Brasil
Altura máxima (m)	161,00
Área total de ocupação (ha)	5,7
Inclinação geral do talude	1V:3,4H
Inclinação do talude entre bermas	1V:2,5H
Altura dos bancos (m)	10,00
Largura das bermas (m)	10,00
Largura dos acessos (m)	10,00
Inclinação dos acessos	10%

Fonte: O autor

Figura 5-1 – Planta da Pilha Avaliada.



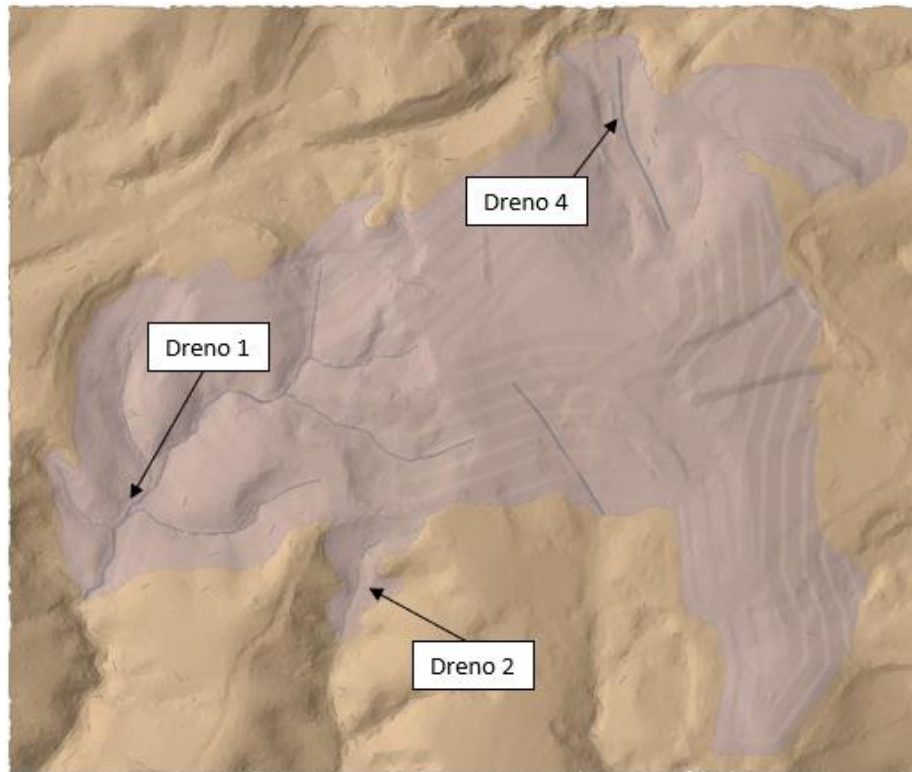
Fonte: O autor

5.3 Sistema de Drenagem Interno

Como apresentado no item 1.2, um dos objetivos da análise de fluxo é a avaliação do sistema de drenagem interno proposto para a estrutura. O sistema é subdividido em regiões devido à topografia da fundação da pilha.

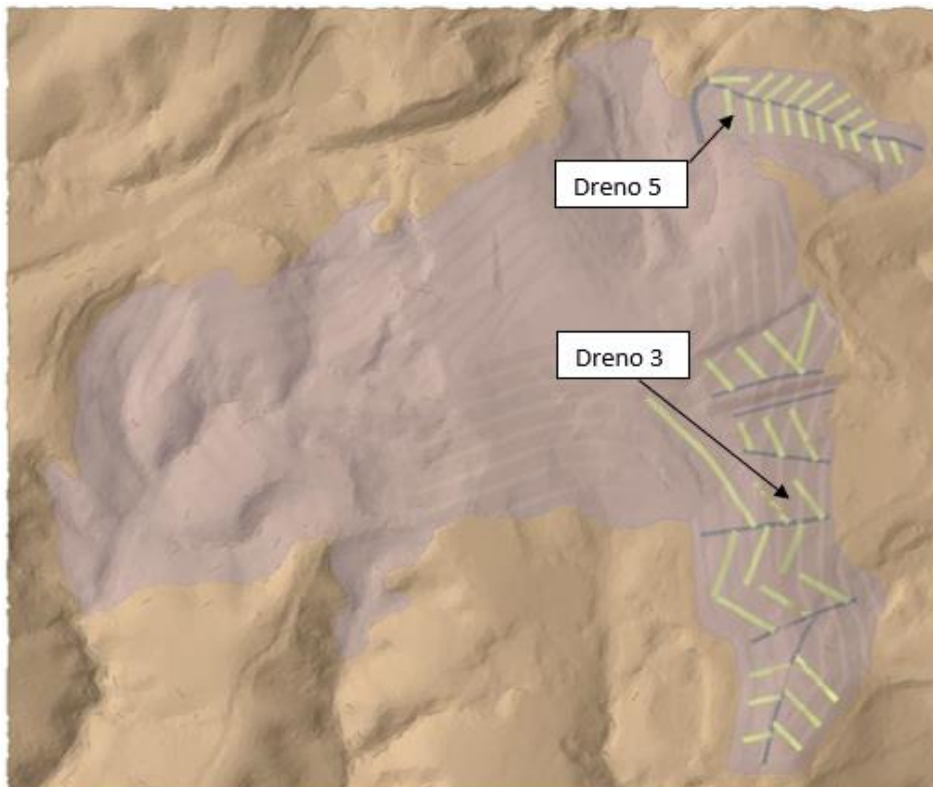
Com o objetivo de acompanhar a fundação natural, nos locais onde a pilha se localiza sobre talvegues foram propostos drenos trapezoidais de brita, que acompanham a declividade natural da fundação, conforme Figura 5-2. Enquanto nas regiões onde a pilha se localiza sobre platôs, optou-se por sistemas de drenagem do tipo espinha de peixe, conforme Figura 5-3.

Figura 5-2 - Drenos trapezoidais (Drenos 1, 2 e 4)



Fonte: O autor

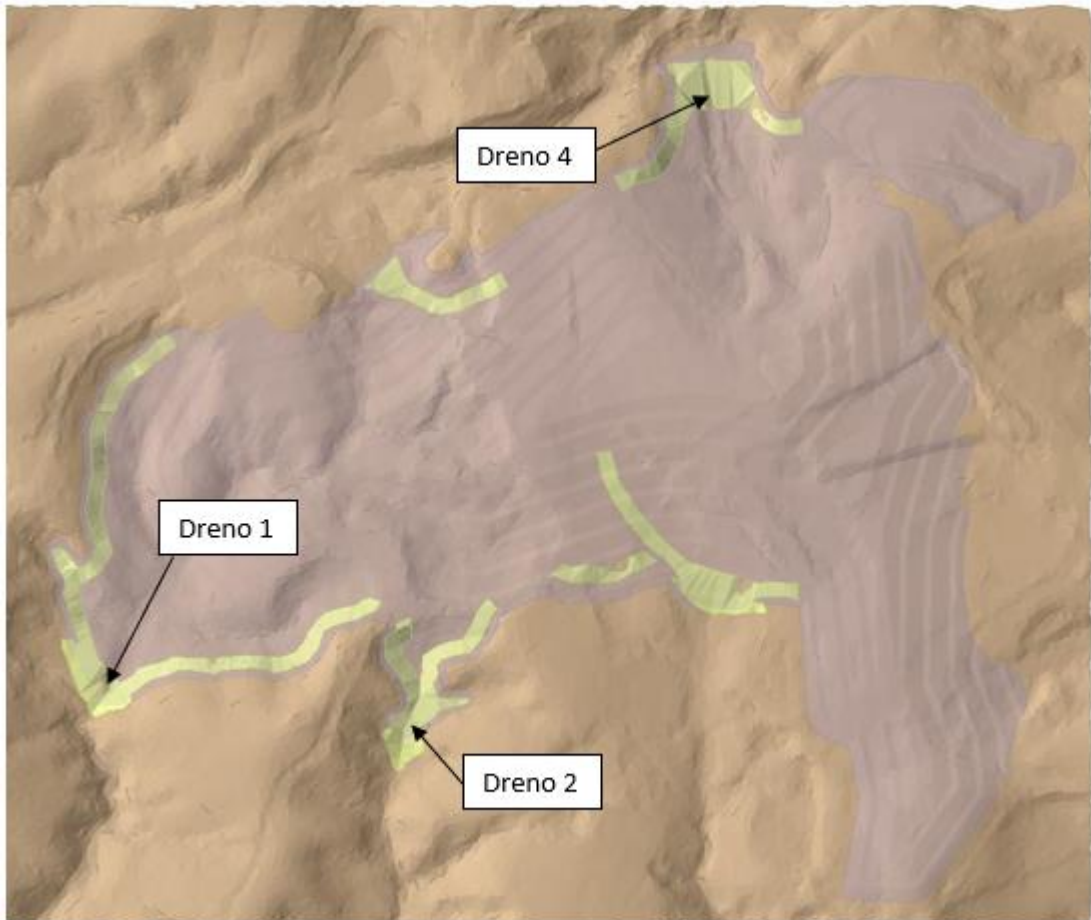
Figura 5-3 - Drenos espinha de peixe (Drenos 3 e 5)



Fonte: O autor

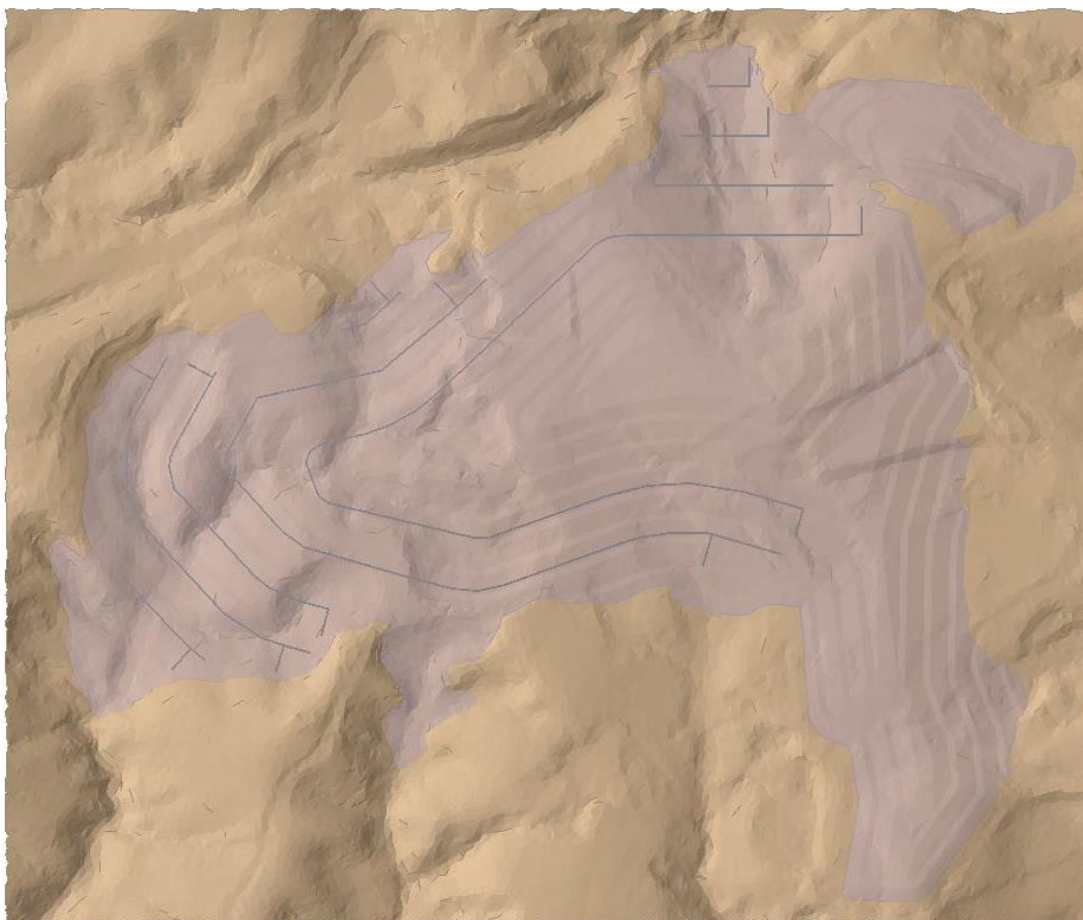
Também foram propostos tapetes drenantes de areia nas regiões próximas ao pé da pilha, conforme Figura 5-4 e um sistema de drenagem em níveis, onde são propostos drenos internos de brita a cada 2 bancos da pilha, apresentado na Figura 5-5 e cujo principal objetivo é evitar a saturação da face dos taludes da pilha.

Figura 5-4 - Tapetes de areia nas saídas de drenagem



Fonte: O autor

Figura 5-5 - Drenos de bancada



Fonte: O autor

O sistema de drenagem interno tem como um dos objetivos a captação de água proveniente de nascentes existentes na região. Foi realizado o cadastro de nascentes na região, no qual foram encontradas nascentes apenas na região oeste da pilha, todas localizadas nos talwegues e direcionadas para a mesma saída de drenagem (Dreno 1, Figura 5-2). A somatória das vazões medidas nas nascentes foi de 0,000497 m³/s. Essa vazão será utilizada para a calibração do modelo de percolação.

5.4 Dados Hidrológicos

Para o dimensionamento do sistema de drenagem de fundo através de modelos analíticos, apresentados no item 4.2, e através de modelagens numéricas, é necessária a determinação da recarga esperada. Os dados de precipitação foram

obtidos em estação meteorológica presente na região do empreendimento cujos dados são apresentados na Figura 5-6. A evapotranspiração média foi obtida no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e é apresentada na Tabela 5-2.

Figura 5-6 – Dados de Precipitação, em mm

Ano	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1981	81,5	87,5	208,0	61,0	17,0	47,0	0,0	39,0	60,0	183,0	394,0	267,5	1445,5
1982	418,5	108,5	380,5	27,0	38,0	10,0	32,0	16,0	17,0	201,5	107,5	316,0	1672,5
1983	322,0	252,0	296,0	161,0	107,0	28,0	36,5	5,0	157,5	228,0	184,0	317,5	2094,5
1984	127,5	41,0	114,0	81,0	4,0	0,0	11,0	109,0	83,0	78,0	259,0	356,5	1264,0
1985	493,5	249,5	212,0	42,0	12,0	0,0	0,0	5,0	83,0	165,0	228,0	243,0	1733,0
1986	253,5	205,0	136,0	26,0	46,5	16,5	89,0	99,0	4,0	38,0	225,5	376,5	1515,5
1987	114,0	149,0	298,5	66,0	141,5	10,0	5,0	5,0	64,0	112,0	139,0	365,0	1469,0
1988	209,0	183,0	160,0	65,0	35,0	10,0	0,0	0,0	71,0	138,5	228,0	205,0	1304,5
1989	136,0	177,5	151,0	49,0	37,0	48,0	62,0	25,0	102,0	117,0	267,0	335,0	1506,5
1990	81,5	140,0	126,0	84,0	56,0	0,0	46,0	44,0	51,0	123,0	172,0	195,0	1118,5
1991	567,5	264,0	257,0	156,0	18,0	6,0	1,0	2,5	87,0	127,5	209,0	149,0	1844,5
1992	545,0	179,0	163,0	93,0	26,0	0,0	0,0	48,5	127,0	114,0	300,5	370,0	1966,0
1993	304,0	208,0	155,5	117,0	36,5	26,0	0,0	9,0	71,0	161,5	191,0	230,0	1509,5
1994	379,5	77,0	283,0	43,0	102,0	15,0	0,0	0,0	2,0	104,0	150,0	370,0	1525,5
1995	273,0	104,5	251,0	81,0	32,0	15,0	0,0	0,0	47,0	215,0	183,0	299,0	1500,5
1996	152,5	244,8	245,0	83,0	40,0	3,0	1,0	11,0	113,5	97,0	390,0	295,0	1675,8
1997	455,0	140,0	208,0	107,0	18,0	49,0	2,0	1,0	74,5	112,0	183,0	173,0	1522,5
1998	341,5	202,0	88,0	8,0	59,0	3,0	2,0	62,0	22,0	217,0	153,0	223,0	1380,5
1999	182,0	239,0	156,0	16,0	12,0	7,5	5,0	0,0	53,0	134,5	231,0	173,0	1209,0
2000	357,0	157,0	136,0	28,5	11,0	1,0	16,0	48,0	77,0	96,7	348,3	328,3	1604,8
2001	183,9	49,1	193,0	43,3	74,5	0,0	7,0	20,5	80,5	132,6	385,0	313,5	1482,9
2002	281,0	349,5	139,5	12,0	44,5	0,0	39,0	19,5	136,5	66,5	287,0	377,5	1752,5
2003	422,0	75,0	279,0	43,0	31,0	0,0	1,0	27,5	11,0	40,0	247,0	407,0	1583,5
2004	275,0	296,0	184,0	152,0	61,0	20,5	44,0	0,0	0,0	102,0	183,0	394,0	1711,5
2005	434,5	203,0	353,5	67,5	91,0	15,0	17,5	44,0	106,0	84,0	279,0	378,0	2073,0
2006	197,0	166,0	200,5	49,0	34,5	9,0	0,0	37,5	112,5	168,5	219,1	285,6	1479,2
2007	380,0	155,5	43,0	126,5	21,0	0,0	3,6	0,0	25,8	194,4	177,8	293,6	1421,2
2008	305,9	220,5	230,9	97,8	1,0	9,5	0,0	24,8	82,3	51,9	198,2	723,2	1946,0
2009	335,4	236,4	219,6	97,0	7,0	48,9	5,1	49,4	122,4	213,0	154,3	252,5	1741,0
2010	330,7	112,9	156,9	58,3	41,9	2,1	0,7	0,0	38,2	205,3	343,8	368,6	1659,4
2011	229,6	174,4	303,2	62,5	1,9	20,7	0,0	3,0	4,5	179,6	320,0	489,4	1788,9
2012	441,6	50,3	143,5	82,3	79,5	29,3	0,0	2,6	39,7	56,7	217,1	154,4	1297,0
2013	482,5	138,5	219,0	95,2	70,3	41,3	5,7	18,0	52,7	152,0	165,2	329,7	1770,1
2014	143,0	20,2	153,4	147,2	17,6	11,8	41,4	17,0	26,6	50,8	371,2	123,2	1123,4
2015	138,6	337,4	287,0	41,8	49,6	26,2	11,6	14,8	95,8	99,6	237,6	131,0	1471,0
2016	443,8	133,1	261,8	47,2	9,8	61,6	0,4	17,8	62,6	46,4	390,4	320,8	1795,7
MÁXIMA	567,5	349,5	380,5	161,0	141,5	61,6	89,0	109,0	157,5	228,0	394,0	723,2	723,2
MÍNIMA	81,5	20,2	43,0	8,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	38,0	107,5	123,2	0,0
MÉDIA	300,5	170,2	205,3	72,7	41,2	16,4	13,5	22,9	65,7	128,0	242,2	303,6	131,8

Fonte: Documentação interna

Tabela 5-2 – Evapotranspiração média

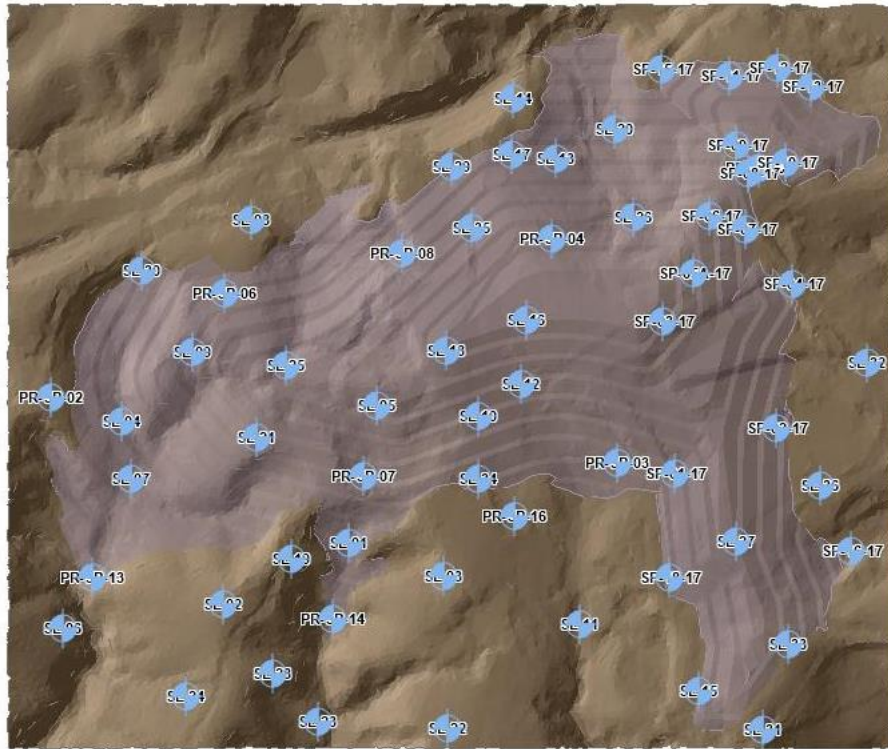
Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média (mm)	128	125	119	102	72	41	30	31	75	125	120	120

Fonte: INMET (2021)

5.5 Fundação da Pilha

Para a elaboração do modelo geológico-geotécnico utilizado na análise de percolação, foi realizada a modelagem no software Slide 3. As sondagens realizadas foram adicionadas ao modelo e o software realizou a interpolação dos contatos

Figura 5-8 - Sondagens utilizadas no modelo



Fonte: O autor

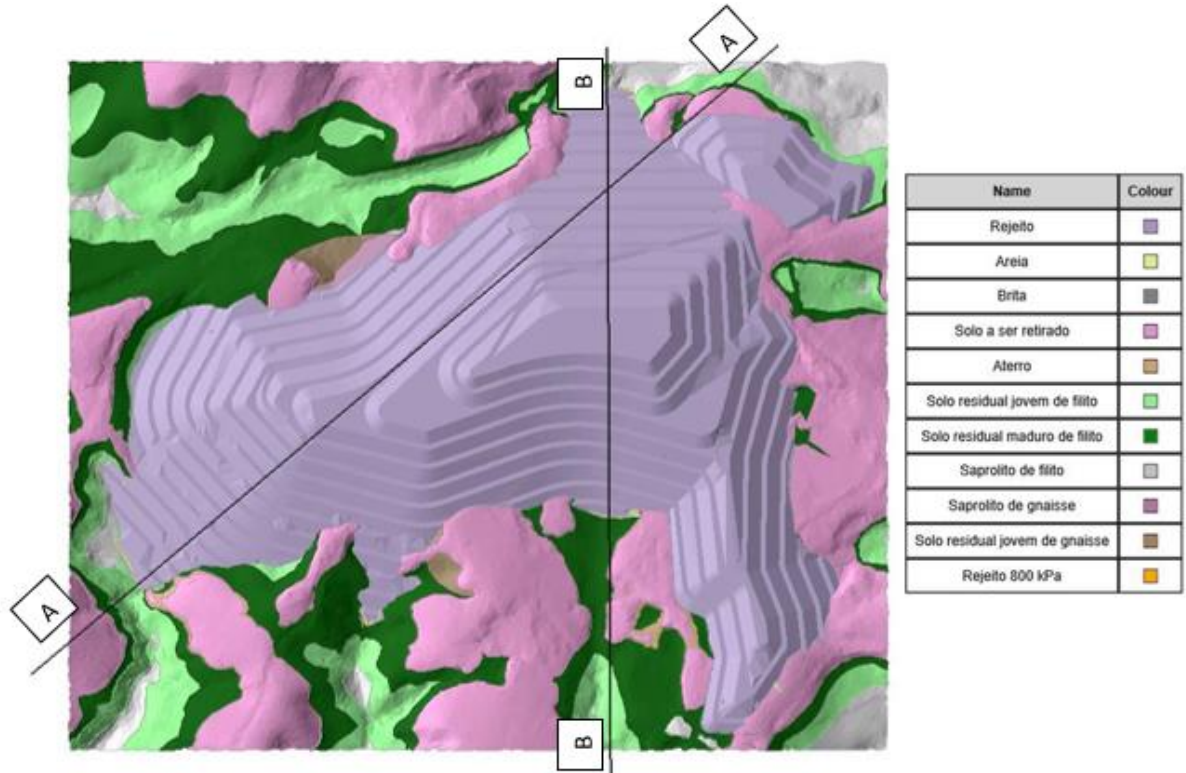
Os horizontes geológicos foram divididos em:

- Saprolito de gnaiss;
- Solo residual jovem de gnaiss;
- Saprolito de filito;
- Solo residual jovem de filito;
- Solo residual maduro de filito;
- Aterro; e
- Solos superficiais com NSPT < 7, denominados de *solo a ser retirado*.

Como resultado da modelagem da fundação, tem-se o modelo apresentado em planta na Figura 5-9 e em seções, na Figura 5-10 e na Figura 5-11. Observa-se que o modelo geológico ainda apresenta algumas áreas em que a falta de informações dificulta a interpretação e a definição dos limites de camadas em profundidade, que necessitam de confirmação por meio de investigações adicionais. Entretanto, como o objetivo da pesquisa foi o de realização da modelagem de fluxo, considera-se que

os solos superficiais mapeados permitem uma avaliação dessas condições na fundação da pilha.

Figura 5-9 - Planta do modelo geológico-geotécnico



Fonte: O autor

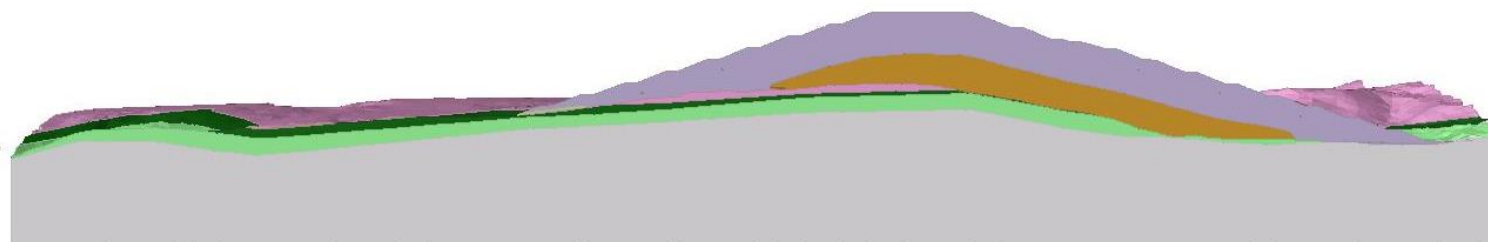
Figura 5-10 - Seção AA' do modelo geológico-geotécnico



Name	Colour
Rejeito	■
Areia	■
Brita	■
Solo a ser retirado	■
Aterro	■
Solo residual jovem de filito	■
Solo residual maduro de filito	■
Saprolito de filito	■
Saprolito de gnaiss	■
Solo residual jovem de gnaiss	■
Rejeito 800 kPa	■

Fonte: O autor

Figura 5-11 – Seção BB' do modelo geológico-geotécnico



Name	Colour
Rejeito	■
Areia	■
Brita	■
Solo a ser retirado	■
Aterro	■
Solo residual jovem de filito	■
Solo residual maduro de filito	■
Saprolito de filito	■
Saprolito de gnaiss	■
Solo residual jovem de gnaiss	■
Rejeito 800 kPa	■

Fonte: O autor

Foram realizados ensaios de infiltração nas sondagens executadas. Os resultados dos ensaios são resumidos na Tabela 5-3. Para as análises de percolação foram adotados os valores médios de permeabilidade obtidos nos ensaios de campo, apresentados na Tabela 5-4.

Tabela 5-3 - Ensaios de infiltração realizados

Sondagem	Litotipo	Permeabilidade (m/s)
PR-SP-02	Solo residual maduro de filito	1,10E-08
	Solo residual jovem de filito	1,16E-08
PR-SP-07	Solo residual maduro de filito	1,39E-08
	Solo residual jovem de filito	7,46E-09
	Saprolito de filito	2,40E-08
SP-14-17	Aterro	3,41E-08
	Solo residual jovem de filito	2,80E-08
SP-15-17	Aterro	3,52E-08
	Saprolito de filito	6,40E-08
SP-16-17	Solo a ser retirado	8,56E-08
	Solo residual jovem de filito	6,00E-09
	Saprolito de filito	4,20E-09
SP-18-17	Aterro	2,45E-07
	Solo residual maduro de filito	4,00E-08
	Solo residual jovem de filito	5,00E-08
PR-SP-04	Solo a ser retirado	1,30E-08
	Solo residual jovem de filito	3,00E-08
PR-SM-06	Aterro	3,23E-08
	Solo residual maduro de filito	4,33E-08
	Solo residual jovem de filito	2,37E-08
	Saprolito de filito	2,15E-08
PR-SM-07	Solo residual jovem de filito	2,07E-08

Fonte: O autor

Tabela 5-4 - Valores de permeabilidade adotados

Litotipo	k (m/s)
Aterro	9,40E-08
Solo a ser retirado	6,14E-08
Solo residual maduro de filito	3,19E-08
Solo residual jovem de filito	1,97E-08
Saprolito de filito	3,55E-08

Fonte: O autor

6. METODOLOGIA

6.1 Disposições Gerais

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos realizados para a caracterização geotécnica do rejeito de minério de ferro avaliado, estimativa dos parâmetros hidráulicos dos materiais utilizados nas análises, assim como a metodologia aplicada nos dimensionamentos por métodos analíticos e na elaboração do modelo numérico tridimensional.

6.2 Caracterização do Rejeito

Os ensaios de laboratório descritos a seguir foram realizados nos Laboratório de Mecânica dos Solos (LEC) do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa (UFV) e Laboratório de Geotecnia (LabGeo) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Os ensaios foram compilados por Carneiro (2021) e Oliveira (2021). Dessa forma, seguiu-se as recomendações das normas brasileiras e internacionais, apresentadas para grupo de ensaios, a seguir.

6.2.1 Ensaios de Caracterização Física

De acordo com Oliveira (2021), as amostras de rejeito foram preparadas seguindo as diretrizes da norma NBR 6457 (ABNT, 2016a). Em seguida, realizaram-se os ensaios de granulometria, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016e) e ISO/TS 17892-4 (CEN, 2004). Foram também determinados os limites de Atterberg, seguindo as recomendações das normas NBR 6459 (ABNT, 2016c) e NBR 7180 (ABNT, 2016d). E, por fim, obteve-se o peso específico dos grãos a partir do especificado na NBR 6458 (ABNT, 2016b) e ISO/TS 17892-3 (CEN, 2004).

6.2.2 Ensaios de Compactação

Segundo Oliveira (2021), os ensaios de compactação Proctor realizados no LabGeo foram conduzidos segundo a especificação LNEC E 197 (LNEC, 1966). Para tanto

utilizou-se um pilão de 4,54kg, em cinco camadas com vinte e cinco golpes uniformemente distribuídos na amostra disposta em um molde com 102,4 mm de diâmetro e 116,3 mm de altura. Enquanto os ensaios realizados no LEC, por sua vez, adotaram as especificações apresentadas na norma NBR 7182 (ABNT, 2016f). Utilizou-se a energia de Proctor Normal, correspondente à moldagem do corpo de prova em três camadas sucessivas em recipiente cilíndrico com aproximadamente 1.000 cm³ sob a ação de 26 golpes de um soquete de 2,5 kg, caindo de 30,5 cm de altura por camada.

6.2.3 Ensaios de Permeabilidade e Sucção Matricial

Conforme apresentado por Carneiro (2021), os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados nos mesmos corpos de prova moldados para a realização de ensaios triaxiais. Foram realizados quatro ensaios (um para cada grau de compactação) após o estágio de saturação, a 10 kPa de pressão efetiva de confinamento, e trinta ensaios foram realizados após o estágio de consolidação isotrópica, nas diferentes tensões efetivas de confinamento (100 kPa a 1900 kPa): oito espécimes com GC = 93%, oito com GC = 95%, oito com GC = 97% e seis com GC = 100%. Os testes realizados seguiram os procedimentos da ASTM D5084:2016 para carga constante.

Para a definição da curva de sucção matricial, segundo Carneiro (2021), foram realizados ensaios em amostras de rejeitos compactadas com 93% e 100% do Proctor padrão. Utilizou-se um total de três corpos de prova para cada grau de compactação. As curvas de retenção foram definidas utilizando a câmara de pressão de Richards (Figura 6-1) com cinco pontos de pressão negativa (-10 kPa, -30 kPa, -60 kPa, -100 kPa e -1500 kPa) de acordo com os procedimentos apresentados em Teixeira e Behring (2017).

Figura 6-1 - Câmara de Richard



Fonte: Carneiro (2021)

6.3 Dimensionamento por Modelos Analíticos

Conforme apresentado no item 1.2, buscou-se avaliar o sistema de drenagem interno proposto para uma pilha de rejeitos filtrados através do dimensionamento por modelos analíticos. Para a elaboração dessa análise, utilizou-se a metodologia apresentada no item 4.2.

O dimensionamento do sistema de drenagem em três etapas, sendo estas:

1. Análise dos dados hidrológicos da região;
2. Delimitação das áreas de contribuição;
3. Determinação dos coeficientes de escoamento; e
4. Cálculo da vazão de projeto.

6.4 Modelagem numérica

Conforme apresentado no item 1.2, buscou-se também avaliar o comportamento de uma pilha de rejeitos filtrados em uma análise de percolação transiente, considerando sucessivos períodos secos e chuvosos. Para a elaboração dessa análise, utilizou-se o *software* RS3 da empresa canadense Rocscience Inc.™.

A concepção e análise do modelo numérico ocorreu em três etapas, sendo estas:

1. Obtenção dos parâmetros geotécnicos do rejeito;
2. Estudo de malha e de tolerância de convergência do modelo;
3. Calibração das condições de contorno a serem empregadas nas análises;
4. Elaboração das análises de percolação com diferentes taxas de infiltração; e
5. Elaboração das análises de percolação com diferentes graus de compactação.

6.4.1 Calibração do Modelo Inicial

6.4.1.1 Disposições Gerais

Para calibração e validação dos parâmetros geotécnicos ensaiados foi realizada a modelagem da pilha em um estágio inicial, que considera apenas a vazão natural das nascentes medidas na fundação da pilha, apresentada no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Foi realizada uma análise de sensibilidade nas condições de contorno iniciais e do parâmetro de permeabilidade adotado no sistema de drenagem.

Também foi realizado um estudo de malha, no qual avaliou-se a influência que a quantidade de elementos e a tolerância do modelo possuem no resultado da modelagem, conforme se detalha no item 6.4.1.3.

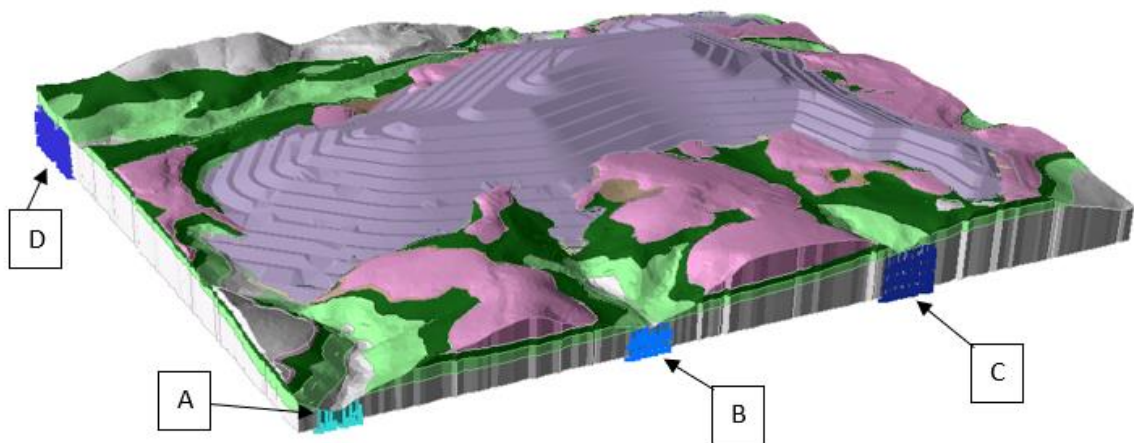
6.4.1.2 Condições de contorno

Para a definição das condições de contorno iniciais do modelo de percolação foram utilizados os níveis freáticos da fundação natural, obtidos nas sondagens realizadas, assim como a medição das vazões das nascentes cadastradas na fundação. As nascentes se localizam na região oeste da pilha, conforme apresentado no item **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, portanto, para a calibração das condições de contorno do modelo foi utilizada a vazão calculada pelo modelo na saída do sistema de drenagem dessa região da pilha (Dreno 1). As condições de contorno da fundação (A a C) são apresentadas na Figura 6-2 e

Figura 6-3, enquanto as condições de contorno no interior da pilha (D a F) são apresentadas na Figura 6-4, e referem-se a:

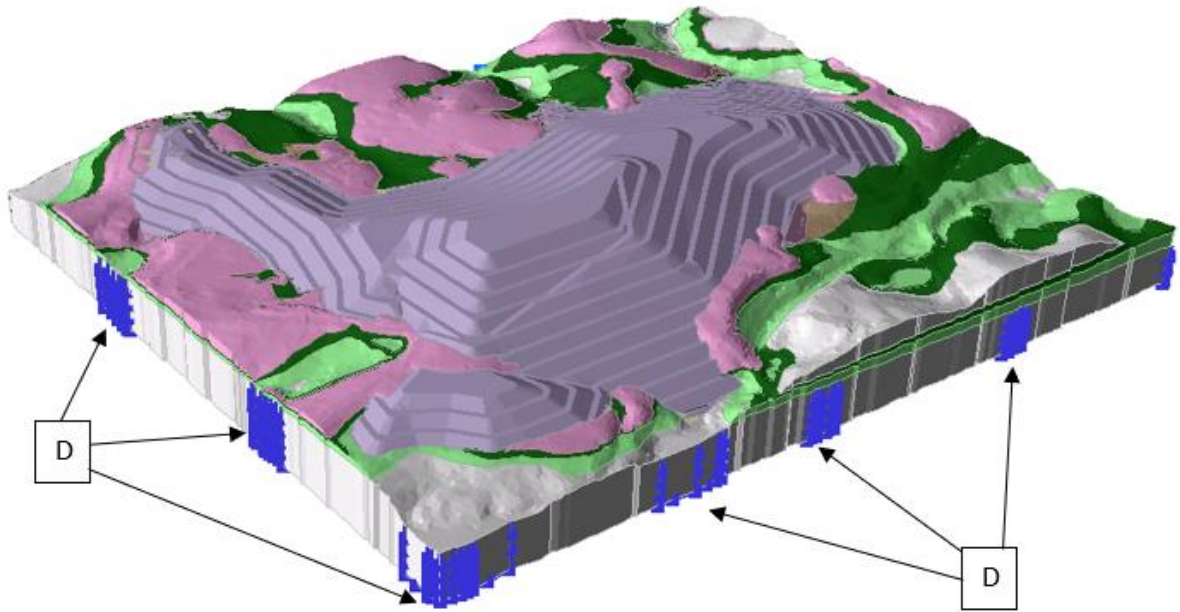
- A. Carga total = 865
- B. Carga total = 876
- C. Carga total = 885
- D. Carga total = 900
- E. Carga total = 940
- F. Carga total = 946

Figura 6-2 - Condições de contorno



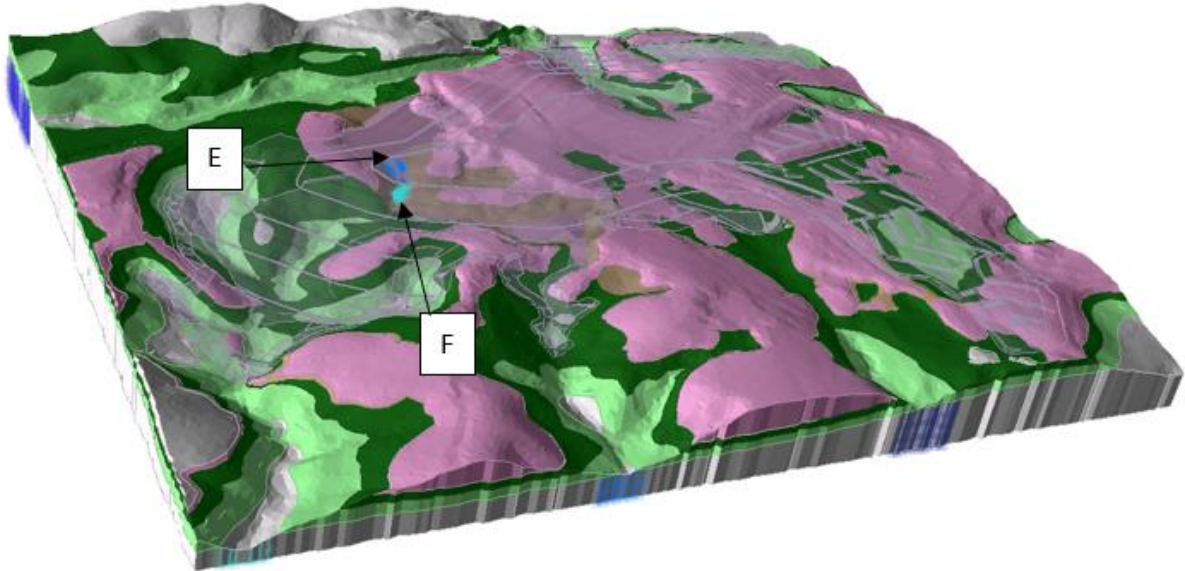
Fonte: O autor

Figura 6-3 - Condições de contorno



Fonte: O autor

Figura 6-4 - Condições de contorno interior da pilha



Fonte: O autor

Além das condições de contorno na fundação natural foi atribuída às faces da pilha de rejeitos uma condição de contorno de infiltração. Para a determinação da taxa de infiltração foram utilizados os estudos de balanço hídrico, portanto esse valor variou conforme a análise realizada.

6.4.1.3 Estudo de Malha e Tolerância

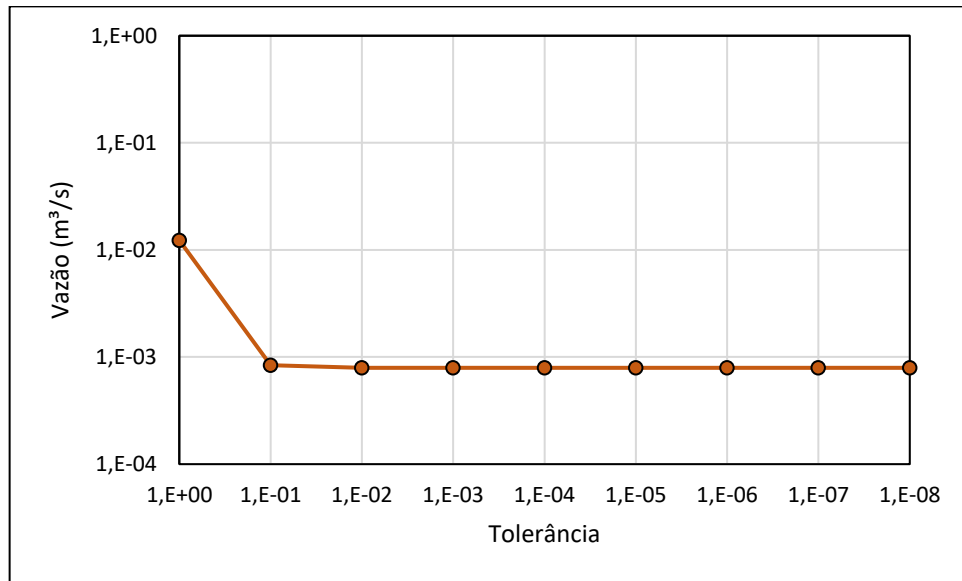
Para a avaliação da malha e da tolerância de convergência a serem utilizadas no modelo foram elaborados dois modelos de análise permanente. No primeiro modelo variou-se a tolerância de convergência do modelo, com uma malha pré-definida, enquanto no segundo variou-se a malha do modelo, com uma tolerância pré-definida. Em ambos os modelos o parâmetro de comparação entre as análises foi a vazão medida na saída do Dreno 1 e foram utilizadas as condições de contorno definidas no item 6.4.1.2. A variação da vazão com a tolerância do modelo é apresentada na Tabela 6-1 e na Figura 6-5, enquanto a análise de malha é apresentada na Tabela 6-2 e na Figura 6-6.

Tabela 6-1 - Análise da tolerância

Tolerância	Vazão (m ³ /s)
1	1,23E-02
0,1	8,36E-04
0,01	7,93E-04
0,001	7,93E-04
1E-04	7,93E-04
1E-05	7,93E-04
1E-06	7,93E-04
1E-07	7,93E-04
1E-08	7,93E-04

Fonte: O autor.

Figura 6-5 - Análise de tolerância



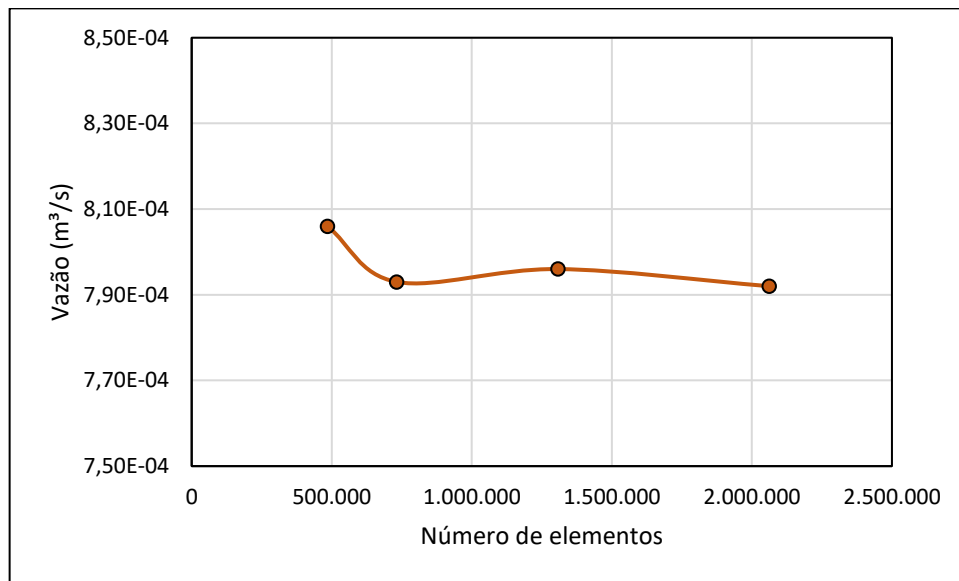
Fonte: O autor

Tabela 6-2 - Análise da malha

Elementos	Vazão (m³/s)
485.199	8,06E-04
732.444	7,93E-04
1.307.571	7,96E-04
2.062.370	7,92E-04

Fonte: O autor.

Figura 6-6 - Análise da malha



Fonte: O autor

Para o modelo tridimensional da pilha, após a realização dos estudos de malha e convergência e com o objetivo de otimizar o custo computacional das análises, optou-se por utilizar o modelo com 0,01 de tolerância e malha com 1.307.571 elementos, já que a análise de sensibilidade mostrou que os resultados obtidos com estes valores eram adequados.

6.4.2 Modelo da Pilha

6.4.2.1 Modelo geométrico

Para a elaboração do modelo tridimensional, importou-se as superfícies do terreno natural e da pilha, através de um arquivo no formato “*dwg*”. A inclusão dos contatos geológicos da fundação foi realizada através da introdução das sondagens realizadas na região da pilha, conforme apresentado no item 5.5, sua interpolação e geração da superfície de contato realizada pelo programa Slide, através de uma interpolação linear. Posteriormente, os contatos foram ajustados manualmente para melhor representar o conhecimento geológico-geotécnico existente.

6.4.2.2 Análises realizadas

Após a elaboração do modelo e definição das condições de contorno a serem utilizadas foram elaboradas as análises que objetivaram avaliar a influência da taxa de infiltração utilizada no balanço hídrico e do grau de compactação, tanto na vazão do sistema de drenagem, quanto na posição da superfície freática.

Para as análises que objetivaram avaliar a influência da taxa de infiltração, o grau de compactação do rejeito e, conseqüentemente, sua permeabilidade foram mantidos constantes. Da mesma forma, para a avaliação da influência do grau de compactação nas análises, a taxa de infiltração utilizada foi mantida constante.

As análises consistiram em um estágio inicial de regime permanente, no qual foram utilizadas as condições de contorno iniciais determinadas no item 6.4.1.2. Nos estágios subsequentes foi adotado o regime transiente, em que foi analisado um período de 10 anos, no qual, para cada ano, foram modelados dois estágios, um no período seco e outro no período chuvoso.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

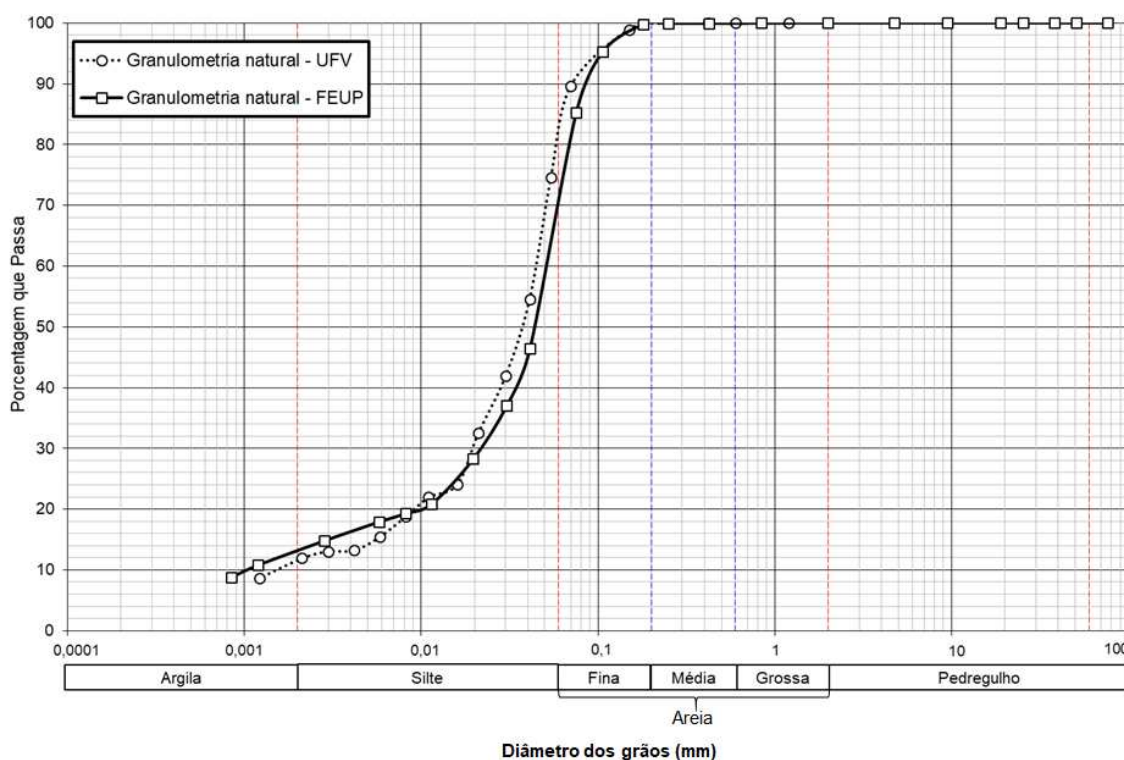
7.1 Parâmetros Geotécnicos

7.1.1 Caracterização Física

Para caracterização física do rejeito, realizaram-se os ensaios de granulometria, limites de Atterberg e massa específica dos grãos.

Oliveira (2021) apresenta os resultados dos ensaios, mostrados na Figura 7-1, em que tem-se as curvas granulométricas das amostras ensaiadas na Universidade Federal de Viçosa (UFV) e na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Figura 7-1 – Curvas granulométricas do rejeito.



Fonte: Oliveira (2021)

A granulometria determinada evidencia que o rejeito é composto predominantemente por silte, com 80 a 90% passando na malha #200 (0,075 mm), sendo classificado como um silte arenoso.

Observa-se, ainda, que as distribuições granulométricas das amostras se mostraram próximas, indicando a uniformidade do material ensaiado e validando as interpretações realizadas de forma conjunta dos resultados. Entretanto, destaca-se que amostras de rejeito ensaiadas em outros estudos desta mesma mina têm mostrado que há alguma variação na composição granulométrica dos mesmos, dependendo da frente de lavra do minério. No presente estudo de caso, a consideração desta variabilidade não foi possível, pela ausência de dados de ensaios.

Os ensaios de limite de plasticidade e limite de liquidez indicaram que os rejeitos estudados não são plásticos, em conformidade com o comportamento observado em outros rejeitos de minério de ferro.

A massa específica dos grãos variou entre 3,218 g/cm³ e 3,184 g/cm³, nas amostras de rejeito ensaiadas na UFV e na FEUP, respectivamente. Os valores se mostraram próximos, com uma média de 3,201 g/cm³.

A Tabela 7-1 resume os resultados da caracterização física das amostras do rejeito estudado.

Tabela 7-1 – Caracterização física do rejeito

Amostra	Fração granulométrica (%)			Limites de Atterberg		G _s (g/cm ³)
	Argila < 0,002 mm	Silte 0,002 - 0,06 mm	Areia 0,06 – 2,0 mm	LL (%)	LP (%)	
UFV	12	68	20	NP	NP	3,218
FEUP	13	58	29	NP	NP	3,184

NP = Não Plástico

Fonte: Oliveira (2021)

7.1.2 Compactação

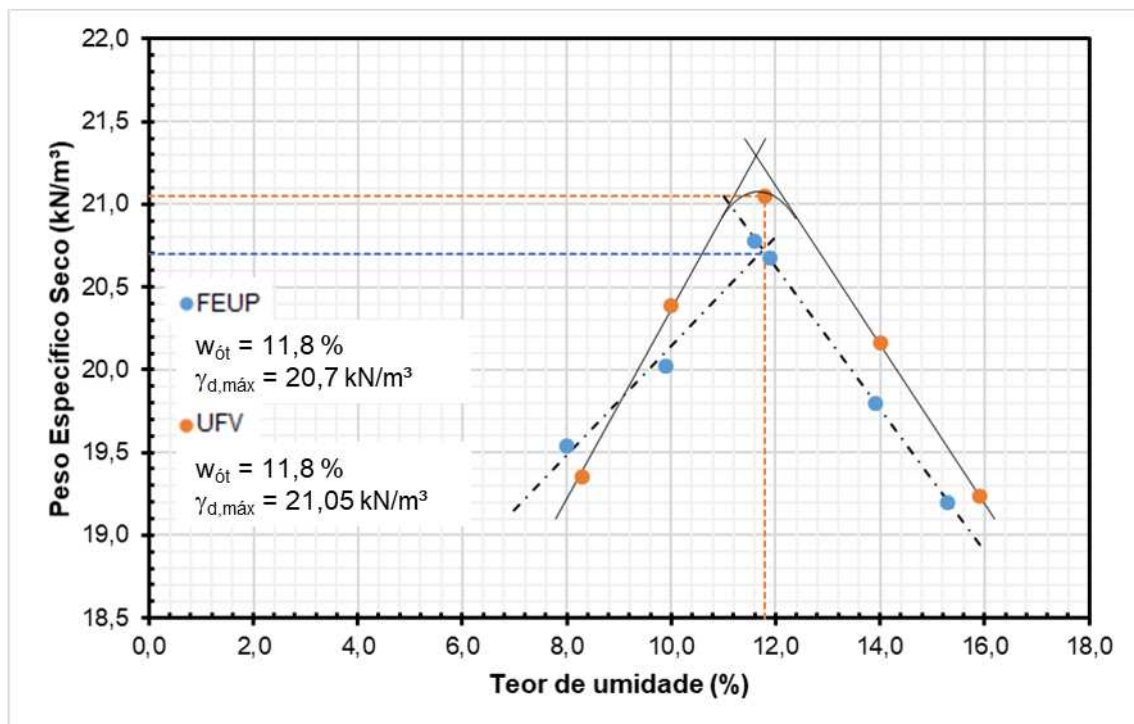
Os resultados dos ensaios de compactação são apresentados por Oliveira (2021). Na Tabela 7-2 e Figura 7-2 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de compactação Proctor realizados nos laboratórios LabGeo (FEUP) e LEC (UFV).

Tabela 7-2 – Resultados dos ensaios de compactação

Amostra	Teor de umidade	Peso específico aparente seco
	w (%)	γ_d (kN/m ³)
FEUP	8,00	19,54
	9,90	20,02
	11,90	20,68
	11,60	20,78
	13,90	19,80
	15,30	19,20
UFV	8,30	19,35
	10,00	20,39
	11,80	21,05
	14,00	20,16
	15,90	19,24

Fonte: Oliveira (2021)

Figura 7-2 – Curvas de compactação das amostras.



Fonte: Oliveira (2021)

Em ambas as amostras, observou-se um teor de umidade ótimo igual a 11,8%. Já o peso específico aparente seco máximo foi estimado em 20,7 kN/m³ e 21,05 kN/m³, para a amostra ensaiada na FEUP e na UFV, respectivamente.

A ligeira diferença apresentada nos valores de peso específico aparente seco máximo pode ser justificada por alguma variabilidade das amostras ou, ainda, pela variação na energia de compactação aplicada em cada ensaio.

7.1.3 Condutividade hidráulica e Sucção Matricial

Na Figura 7-3 são apresentados os resultados dos ensaios de permeabilidade em câmara triaxial, apresentados por Carneiro (2021), mas realizados em conjunto com o autor do presente trabalho.

Figura 7-3 - Permeabilidade determinada em câmaras triaxiais

GC	p' (kPa)	e ₀	k (m/s)
93%	10	0,64	4,09E-07
	100	0,61	3,69E-07
	200	0,61	2,88E-07
	400	0,58	1,38E-07
	807	0,57	2,90E-07
	800	0,57	4,10E-07
	1598	0,55	2,92E-07
	1603	0,56	3,53E-07
	1899	0,56	1,62E-07
95%	10	0,61	3,83E-07
	100	0,59	1,79E-07
	200	0,58	1,24E-07
	400	0,57	9,65E-08
	801	0,56	3,14E-07
	799	0,54	2,11E-07
	1600	0,52	1,65E-07
	1602	0,54	1,94E-07
1906	0,54	1,58E-07	
97%	10	0,58	3,43E-07
	100	0,57	1,46E-07
	200	0,56	1,09E-07
	400	0,55	8,54E-08
	801	0,53	1,76E-07
	801	0,52	2,13E-07
	1601	0,51	1,08E-07
	1600	0,52	1,58E-07
1901	0,50	1,65E-07	
100%	10	0,54	4,09E-07
	100	0,53	1,14E-07
	200	0,52	9,14E-08
	400	0,51	7,14E-08
	807	0,49	9,83E-08
	1605	0,49	6,23E-08
	1600	0,47	7,29E-08

Fonte: Carneiro (2021)

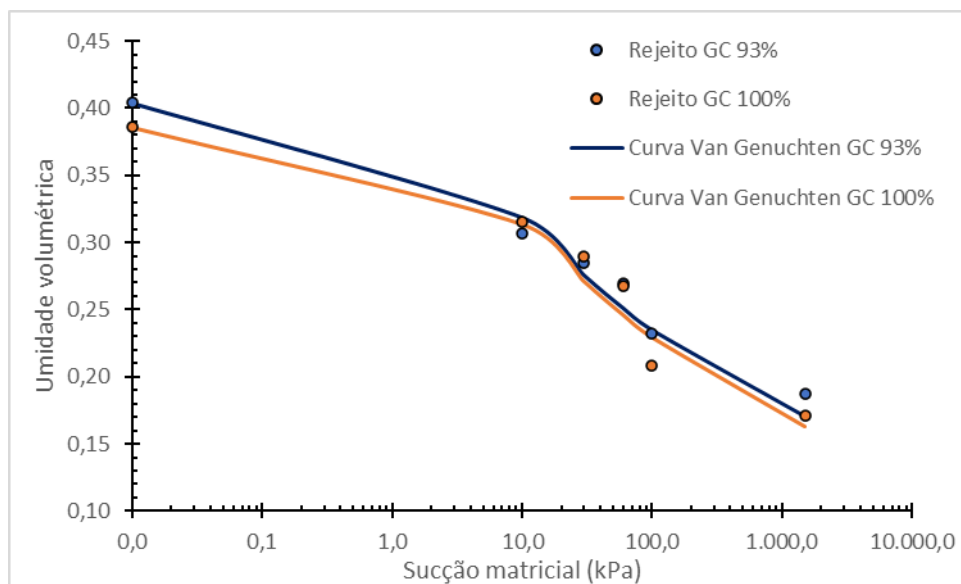
Na elaboração do modelo tridimensional, o rejeito foi separado em duas regiões, conforme apresentado no item 6.4, a primeira sujeita a tensões abaixo de 800 kPa e a segunda sujeita a tensões acima deste valor. Portanto, nas análises realizadas

foram utilizados os valores de permeabilidade referentes às tensões de 10 kPa e de 800 kPa.

Para a determinação dos parâmetros de percolação no rejeito em meio não saturado foi escolhido o modelo proposto por van Genuchten (1980), no qual, através dos ensaios descritos no item 6.2.3, foram traçados os gráficos que mostram a variação da umidade volumétrica com a sucção matricial do material.

Os ensaios foram realizados nas tensões de sucção de 10 kPa, 30 kPa, 60 kPa, 100 kPa e 1500 kPa. Para a umidade volumétrica referente à tensão de sucção nula foi utilizada a umidade volumétrica do corpo de prova saturado, obtida através da umidade dos corpos de prova ensaiados por Carneiro (2021), com os valores de 40% e 34% para os corpos de prova com graus de compactação de 93% e 100%, respectivamente. A porosidade das amostras foi obtida através da medição do índice de vazios nos ensaios triaxiais apresentados por Carneiro (2021).

Figura 7-4 - Curva de van Genuchten GC 93% e 100%



Fonte: O autor

Em ambas as amostras os valores de umidade volumétrica calculados e medidos em ensaios laboratoriais não mostraram diferenças significativas. O resumo dos parâmetros de condutividade hidráulica e para o modelo de van Genuchten são apresentados na Tabela 7-3, em que, para os parâmetros de solos não saturados

para os graus de compactação de 95% e 97%, foram utilizados os parâmetros obtidos para os GC de 93% e 100%, respectivamente.

Tabela 7-3 - Resumo dos parâmetros hidráulicos do rejeito filtrado

GC (%)	K _{sat} (m/s)		Porosidade	van Genuchten		
	10 kPa	800 kPa		α	n	m
93	4,09E-07	3,5E-07	0,40	0,4	1,2	0,167
95	3,83E-07	2,6E-07	0,38	0,4	1,2	0,167
97	3,43E-07	1,9E-07	0,37	0,3	1,2	0,167
100	4,09E-07	9,8E-08	0,35	0,3	1,2	0,167

Fonte: O autor

7.2 Modelo Analítico

7.2.1 Balanço Hídrico

Para a elaboração do balanço hídrico foram utilizados os dados apresentados no item 5.4, em que a evapotranspiração foi multiplicada por um fator de 0,7, seguindo a recomendação de Reichardt & Timm (2004), apresentada no item 4.2.2. A taxa de escoamento recomendada por Saliba *et al.* (2010) para o cálculo de sistemas de drenagens de pilhas de estéril é de 0,45. Para a pilha projetada foi avaliada a influência da taxa de escoamento adotada, uma vez que o valor de 0,45 é recomendado para pilhas de estéril e não há uma recomendação para pilhas de rejeito. Para tal, foram elaborados balanços hídricos para os coeficientes de escoamento superficial (C) de 0,45, 0,55 e 0,65, valores próximos aos recomendados por Pinheiro (2011) para pilhas de estéril, apresentados na Figura 4-4.

O balanço hídrico é apresentado na Tabela 7-4, na qual são apresentados os valores mensais e a média anual de precipitação (P), evapotranspiração (ETS), escoamento superficial (ES) e infiltração (I).

Tabela 7-4 - Balanço Hídrico

	C	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média Anual
P (mm)	-	300,5	170,2	205,3	72,7	41,2	16,4	13,5	22,9	65,7	127,0	242,2	303,6	1581,2
ETP (mm)	-	89,8	87,4	83,0	71,2	50,7	28,8	20,8	22,0	52,2	87,4	83,9	84,1	-
ES (mm)	0,45	135,2	76,6	92,4	32,7	18,5	7,4	6,1	10,3	29,6	57,2	109,0	136,6	-
I (mm)	0,45	75,4	6,2	29,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	49,3	82,9	243,7
ES (mm)	0,55	165,3	93,6	112,9	40,0	22,7	9,0	7,4	12,6	36,1	69,9	133,2	167,0	-
I (mm)	0,55	45,4	0,0	9,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	25,1	52,5	132,4
ES (mm)	0,65	195,3	110,6	133,4	47,3	26,8	10,7	8,8	14,9	42,7	82,6	157,4	197,3	-
I (mm)	0,65	105,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,9	22,2	38,4

Fonte: O autor

Para o dimensionamento do sistema de drenagem interna através dos métodos analíticos apresentados no item 4.1 foi necessário a obtenção da vazão mensal máxima e anual média, obtidas através do balanço hídrico, e apresentadas na Tabela 7-5.

Tabela 7-5 - Infiltrações para dimensionamento por métodos analíticos

Coeficiente de escoamento	Máxima mensal (mm)	Média Anual (mm)
0,45	82,9	243,7
0,55	52,5	132,4
0,65	22,2	38,4

Fonte: O autor

7.2.2 Determinação da Vazão dos Sistemas de Drenagem

Para o cálculo da vazão de projeto é necessário a determinação da área de contribuição de cada dispositivo de drenagem, dividindo em contribuição de terreno natural e de pilha. O mapeamento das áreas de contribuição é apresentado na Figura 7-5, enquanto os valores das áreas de contribuição na Tabela 7-6. Há áreas de contribuição que não são direcionadas para os dispositivos de drenagem estudados, já que nestes locais está prevista a instalação de tapetes drenantes de areia, que não foram avaliados no presente estudo de caso.

Figura 7-5 - Áreas de contribuição



Fonte: O autor

Tabela 7-6 - Áreas de contribuição

Dreno	Área Pilha (m ²)	Área Terreno Natural (m ²)	Área total (m ²)
1	334224	77758	411982
2	21973	40891	62864
3	136846	0	136846
4	168733	5560	174293
5	48824	0	48824

Fonte: O autor

As vazões obtidas pelos métodos analíticos são apresentadas na Tabela 7-7. Para o coeficiente de escoamento superficial adotou-se o valor de 0,2, compatível com o apresentado na Figura 4-4.

Tabela 7-7 - Vazões obtidas

Dreno	C	Q (m ³ /s)	
		Máxima mensal (Saliba <i>et al.</i> , 2010)	Média Anual (Saliba <i>et al.</i> , 2016)
1	0,45	0,0155	0,0040
	0,55	0,0115	0,0028
	0,65	0,0076	0,0018
2	0,45	0,0032	0,0009
	0,55	0,0030	0,0008
	0,65	0,0027	0,0008
3	0,45	0,0044	0,0011
	0,55	0,0028	0,0006
	0,65	0,0012	0,0002
4	0,45	0,0057	0,0014
	0,55	0,0038	0,0008
	0,65	0,0018	0,0003
5	0,45	0,0016	0,0004
	0,55	0,0010	0,0002
	0,65	0,0004	0,0001

Fonte: O autor

A vazão obtida através da metodologia de Saliba *et al.* (2010) se mostrou, na média, 4,5 vezes superior à dimensionada utilizando a atualização proposta na metodologia,

apresentada por Saliba *et al.* (2016). O que está conforme o esperado, uma vez que a primeira metodologia utiliza a vazão máxima mensal, que é maior que a anual, utilizada pela segunda.

7.3 Modelagem numérica

7.3.1 Disposições Gerais

Neste item serão apresentados os resultados encontrados para as análises de percolação da pilha de rejeito filtrado referente ao estudo de caso do presente trabalho, descrito no item 5. Para facilitar a apresentação e compreensão dos resultados, dividiu-se os subitens a seguir de acordo com a análise realizada. Também foi elaborado um subitem final no qual são realizadas as comparações e discussão dos resultados obtidos nas análises.

Para a definição das taxas de infiltração utilizadas na modelagem numérica foram utilizados os resultados dos estudos mostrados no item 7.2.1. Foram obtidos valores de infiltração para os diferentes coeficientes de escoamento considerados (0,45, 0,55 e 0,65). Nos estágios referentes ao período chuvoso foi utilizada a média dos meses com maiores taxas de infiltração, enquanto para os estágios do período seco, os menores. Com isso, obteve-se as taxas de infiltração descritas na Tabela 7-8.

Tabela 7-8 - Taxas de infiltração

Número do Estágio	Infiltração (m/d)		
	0,45	0,55	0,65
1	0	0	0
2	0,00163	0,00088	0,00026
3	0	0	0
4	0,00163	0,00088	0,00026
5	0	0	0
6	0,00163	0,00088	0,00026
7	0	0	0
8	0,00163	0,00088	0,00026
9	0	0	0
10	0,00163	0,00088	0,00026
11	0	0	0
12	0,00163	0,00088	0,00026
13	0	0	0
14	0,00163	0,00088	0,00026
15	0	0	0
16	0,00163	0,00088	0,00026
17	0	0	0
18	0,00163	0,00088	0,00026
19	0	0	0
20	0,00163	0,00088	0,00026
21	0	0	0

Fonte: O autor.

7.3.2 Análises da Influência do Coeficiente de Escoamento

A seguir, encontram-se os resultados das análises de permeabilidade para a pilha compactada a 100% do grau de compactação, com variação do coeficiente de infiltração utilizado. Na Tabela 7-9 é apresentada a comparação das vazões obtidas através do modelo no dreno 1. Os demais drenos apresentaram vazão próxima a nula nas análises.

Tabela 7-9 - Vazão calculada no dreno 1 para diferentes coeficientes de escoamento

Coeficiente de escoamento	Q (m ³ /s)
0,45	0,000779
0,55	0,000762
0,65	0,000759

Fonte: O autor.

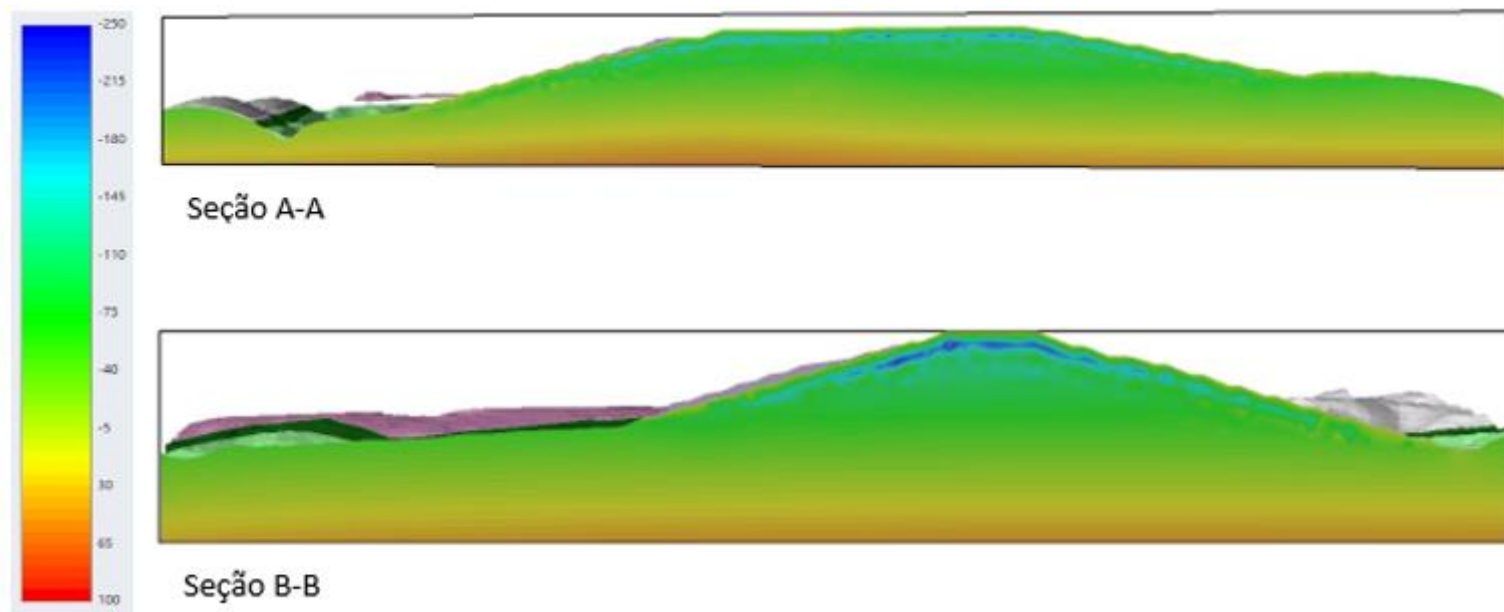
Observa-se que os resultados são muito próximos, mostrando que há pouca influência dos coeficientes de escoamento sobre as vazões de saída. As vazões obtidas com coeficiente de escoamento de 0,65 representa uma diminuição de 2,54% quando comparada à vazão obtida com 0,45.

Os subitens a seguir apresentam os resultados obtidos no estágio 20, que tem como condição de contorno na pilha a infiltração, ou seja, simula o período chuvoso no décimo e último ano de simulação.

7.3.2.1 Coeficiente de escoamento de 0,45

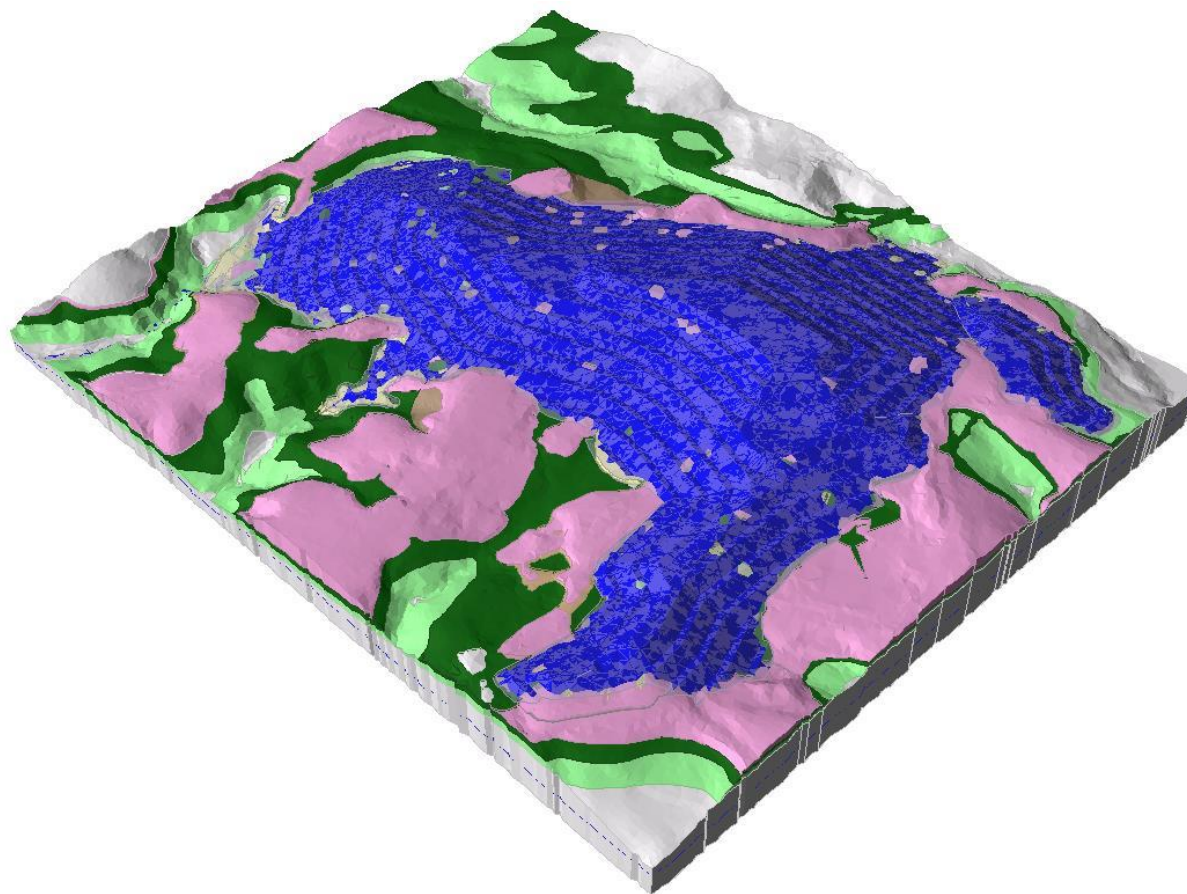
A seguir, encontram-se os resultados das análises de percolação da pilha compactada a 100% do grau de compactação e 0,45 de coeficiente de escoamento. Na Figura 7-6 é apresentada a carga hidráulica no modelo, na qual é possível notar que a pilha se encontra em estado não saturado, com carga hidráulica negativa. Nas seções, nota-se um aumento na carga hidráulica (ainda negativa) próximo à superfície do terreno. Na Figura 7-7 é mostrada a isosuperfície de carga hidráulica igual a zero, em que é possível observar a saturação superficial da pilha nos períodos chuvosos. Por fim, na Figura 7-8 é destacada a posição da freática no modelo, que se encontra em sua fundação.

Figura 7-6 - Carga hidráulica – Análise com coeficiente de escoamento de 0,45



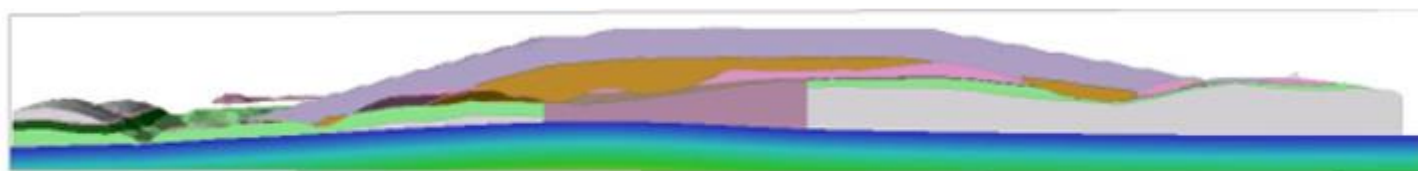
Fonte: O autor

Figura 7-7 - Isosuperfície de poro-pressão 0 – Análise com coeficiente de escoamento de 0,45

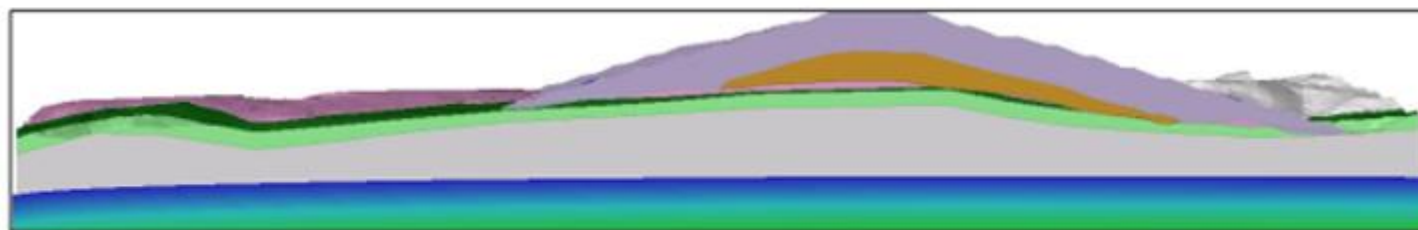


Fonte: O autor

Figura 7-8 - Localização do nível freático – Análise com coeficiente de escoamento de 0,45



Seção A-A



Seção B-B

Fonte: O autor

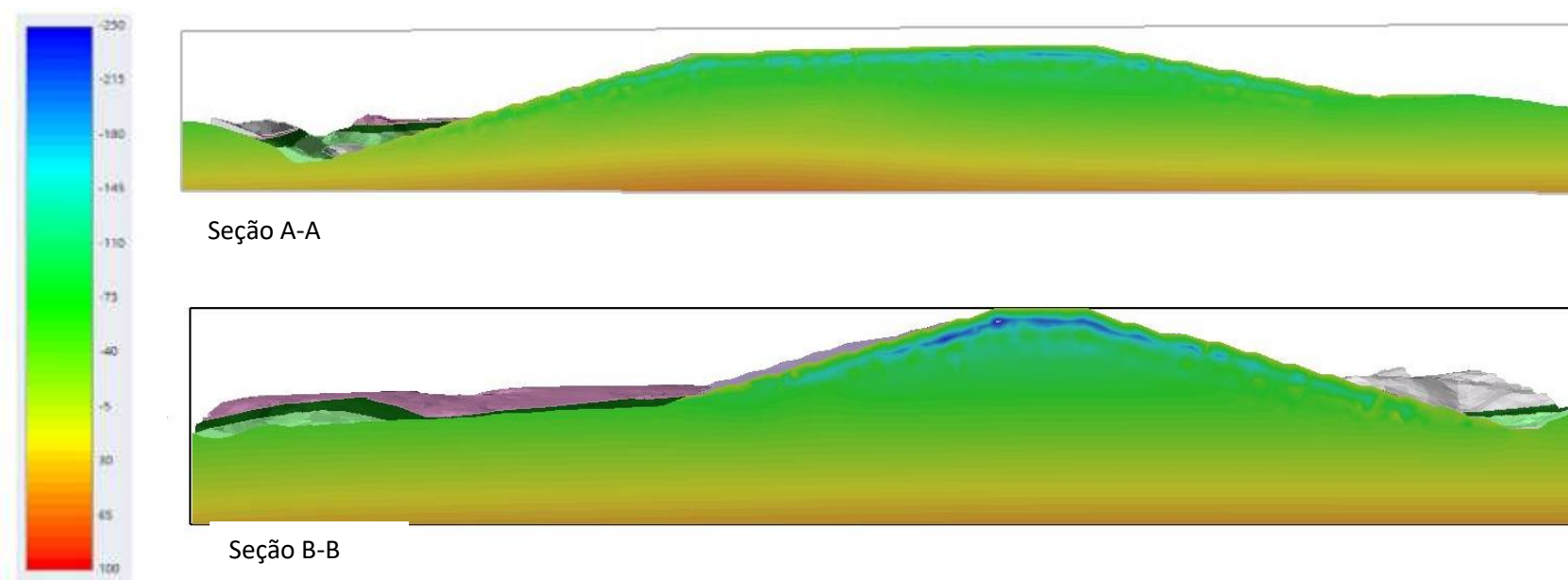
Na análise com coeficiente de escoamento de 0,45 foi possível notar que não há a formação de uma superfície freática no interior da pilha de rejeitos. Entretanto é possível notar uma tendência de saturação das camadas superficiais da pilha.

A vazão obtida no Dreno 1 é próxima à vazão das nascentes presentes na região, enquanto para os demais drenos a vazão obtida foi próxima a nula, o que indica que a contribuição da precipitação na vazão do sistema de drenagem interno é pequena.

7.3.2.2 Coeficiente de escoamento de 0,55

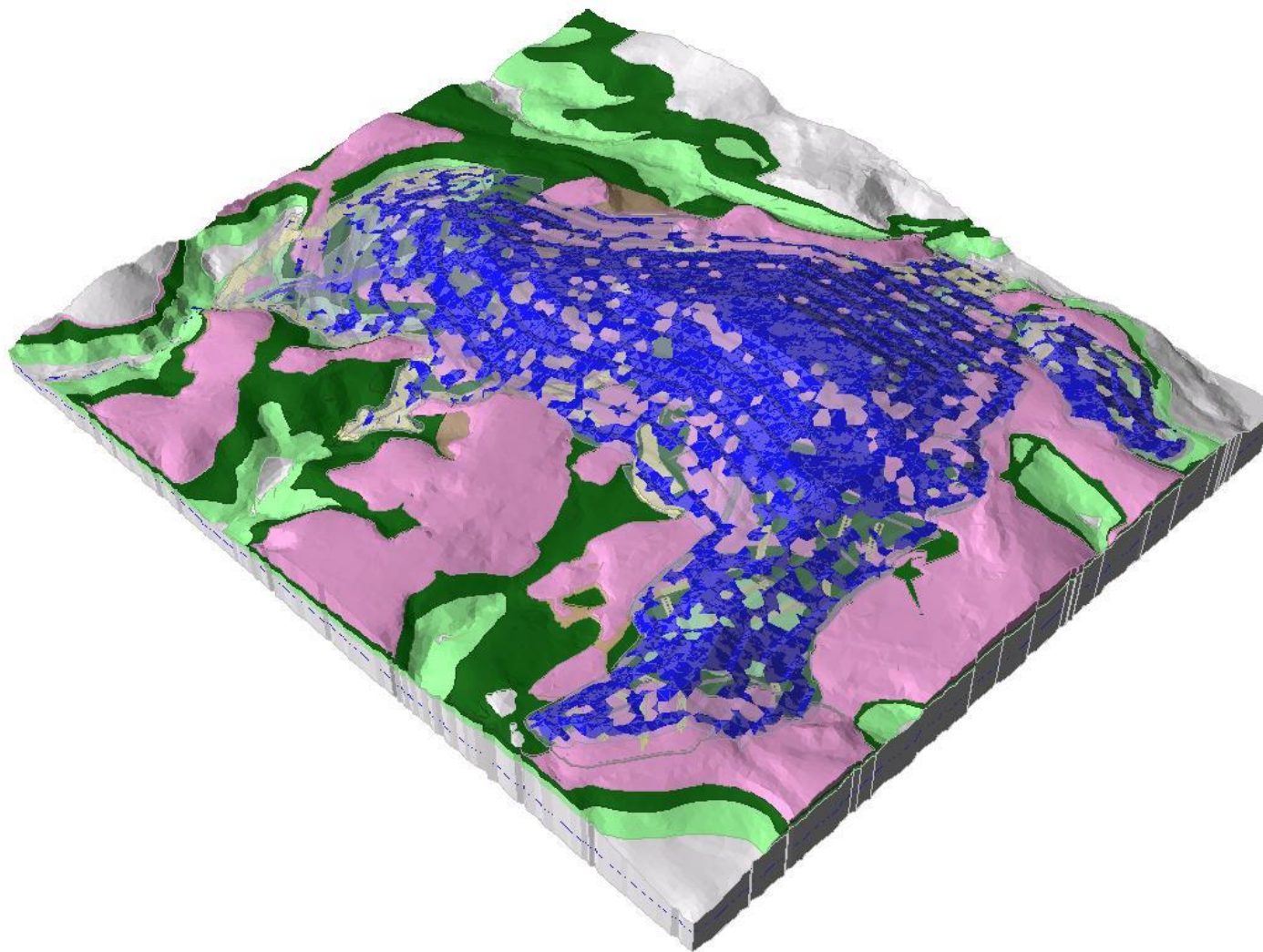
A seguir, apresentam-se os resultados das análises de percolação da pilha compactada a 100% do grau de compactação e 0,55 de coeficiente de escoamento. Na Figura 7-9 é apresentada a carga hidráulica no modelo, na qual é possível notar que a pilha se encontra em estado não saturado, com carga hidráulica negativa. Nas seções, nota-se um aumento na carga hidráulica (ainda negativa) próximo à superfície do terreno. Na Figura 7-10 é mostrada a isosuperfície de carga hidráulica igual a zero, em que é possível observar a saturação superficial em alguns locais da pilha nos períodos chuvosos. Por fim, na Figura 7-11 é destacada a posição da freática no modelo, que se encontra em sua fundação.

Figura 7-9 - Carga hidráulica – Análise com coeficiente de escoamento de 0,55



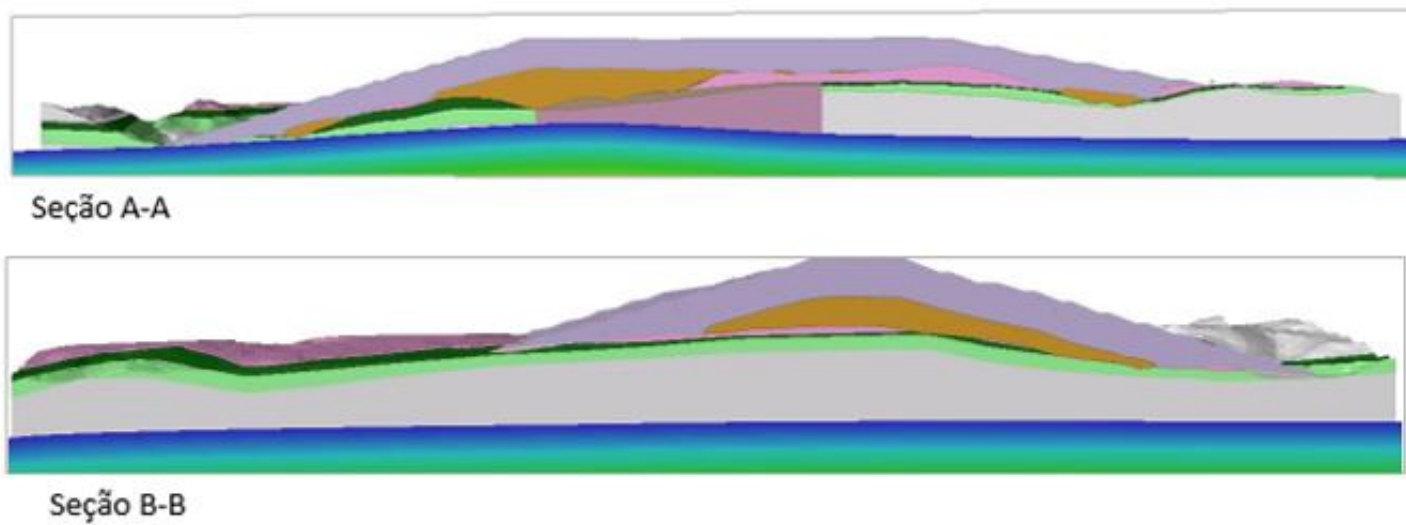
Fonte: O autor

Figura 7-10 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com coeficiente de escoamento de 0,55



Fonte: O autor

Figura 7-11 - Localização do nível freático – Análise com coeficiente de escoamento de 0,55



Fonte: O autor

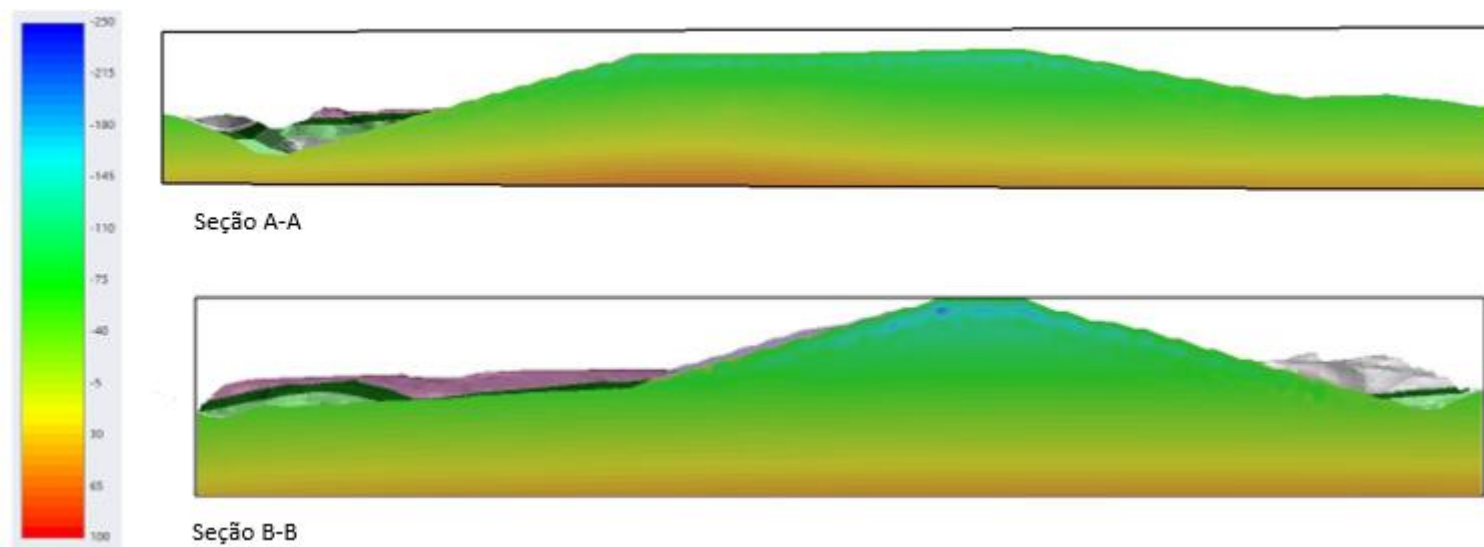
Assim como na análise com coeficiente de escoamento de 0,45, ao utilizar o coeficiente de 0,55 foi possível notar que não há a formação de uma superfície freática no interior da pilha de rejeitos. Entretanto é possível notar que a tendência de saturação das camadas superficiais da pilha diminuiu quando comparado com a análise que utiliza o coeficiente de 0,45.

Da mesma forma que na análise anterior, a vazão obtida no Dreno 1 é próxima à vazão das nascentes presentes na região, enquanto para os demais drenos a vazão obtida foi próxima a nula, o que indica que a contribuição da precipitação na vazão do sistema de drenagem interno é pequena.

7.3.2.3 Coeficiente de escoamento de 0,65

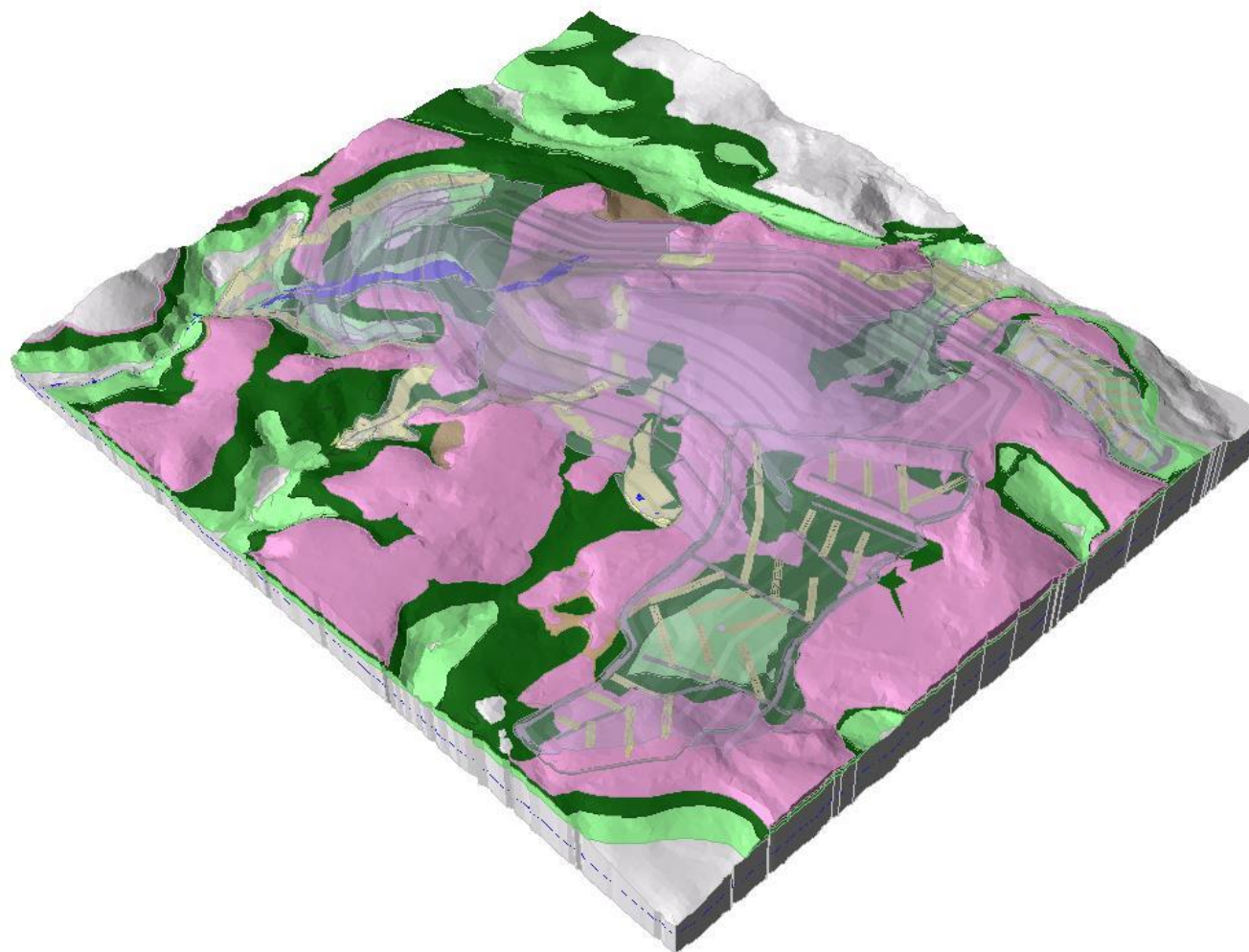
A seguir, apresentam-se os resultados das análises de percolação da pilha compactada a 100% do grau de compactação e 0,65 de coeficiente de escoamento. Na Figura 7-12 é apresentada a carga hidráulica no modelo, no qual é possível notar que a pilha se encontra em estado não saturado, com carga hidráulica negativa. Nas seções, nota-se um aumento na carga hidráulica (ainda negativa) próximo à superfície do terreno. Na Figura 7-13 é mostrada a isosuperfície de carga hidráulica igual a zero, em que não é observada a saturação superficial da pilha, apenas. Por fim, na Figura 7-14 é destacada a posição da freática no modelo, que se encontra em sua fundação.

Figura 7-12 - Carga hidráulica – Análise com coeficiente de escoamento de 0,65



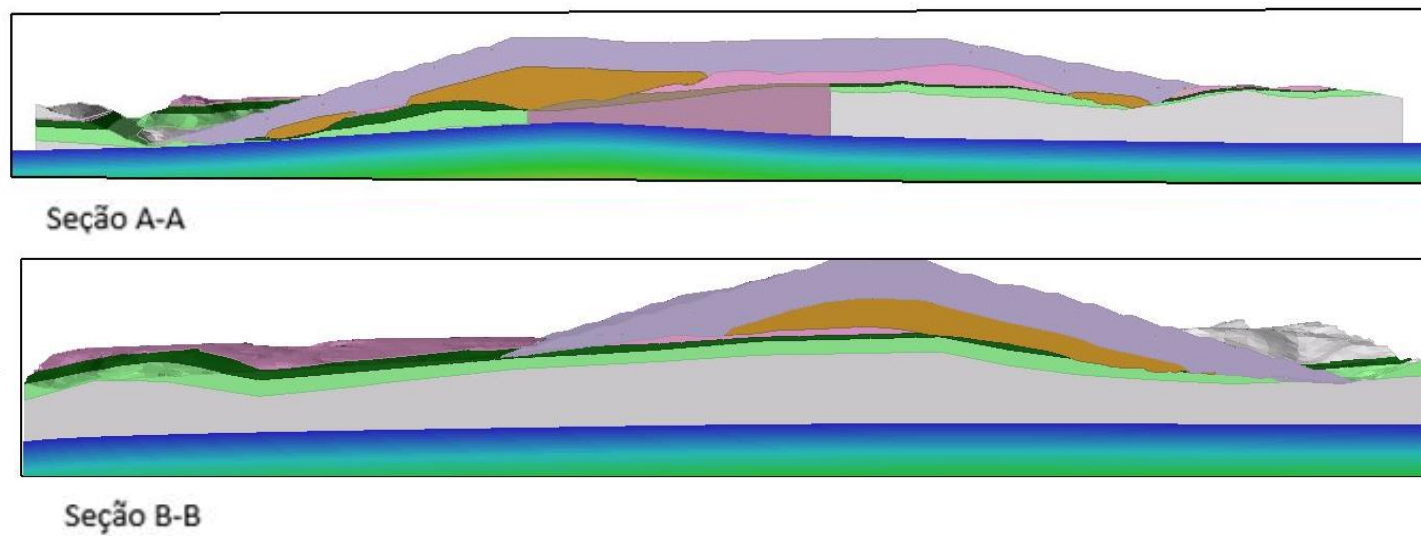
Fonte: O autor

Figura 7-13 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com coeficiente de escoamento de 0,65



Fonte: O autor

Figura 7-14 - Localização do nível freático – Análise com coeficiente de escoamento de 0,65



Fonte: O autor

Assim como nas análises anteriores, ao utilizar o coeficiente de 0,65 foi possível notar que não há a formação de uma superfície freática no interior da pilha de rejeitos. Entretanto é possível notar que não há mais a tendência de saturação das camadas superficiais da pilha, como nas análises anteriores.

Da mesma forma que nas análises anteriores, a vazão obtida no Dreno 1 é próxima à vazão das nascentes presentes na região, enquanto para os demais drenos a vazão obtida foi próxima a nula, o que indica que a contribuição da precipitação na vazão do sistema de drenagem interno é pequena.

7.3.3 Análise da Influência do Grau de Compactação

A seguir, apresentam-se os resultados das análises de permeabilidade para a pilha com taxa de infiltração de 0,45 e grau de compactação variável. Na Tabela 7-10 é apresentada a comparação das vazões obtidas através do modelo no dreno 1. Os demais drenos apresentaram vazão nulas nas análises.

Tabela 7-10 - Vazão calculada no dreno 1 para diferentes graus de compactação

Grau de compactação (%)	Q (m ³ /s)
93	0,000778
95	0,000777
97	0,000778
100	0,000779

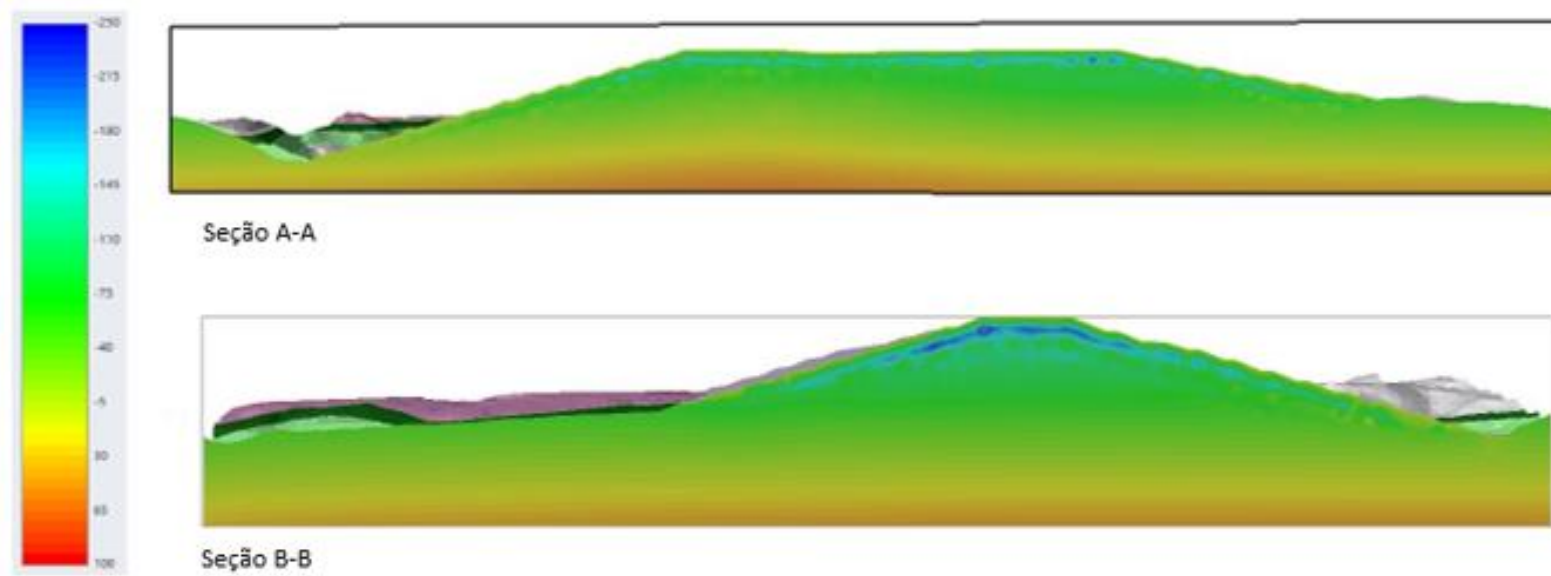
Fonte: O autor.

Observa-se que as vazões obtidas com os diferentes graus de compactação foram próximas.

A seguir apresentam-se os resultados obtidos no estágio 20, que tem como condição de contorno na pilha a infiltração, ou seja, simula o período chuvoso no décimo e último ano de simulação.

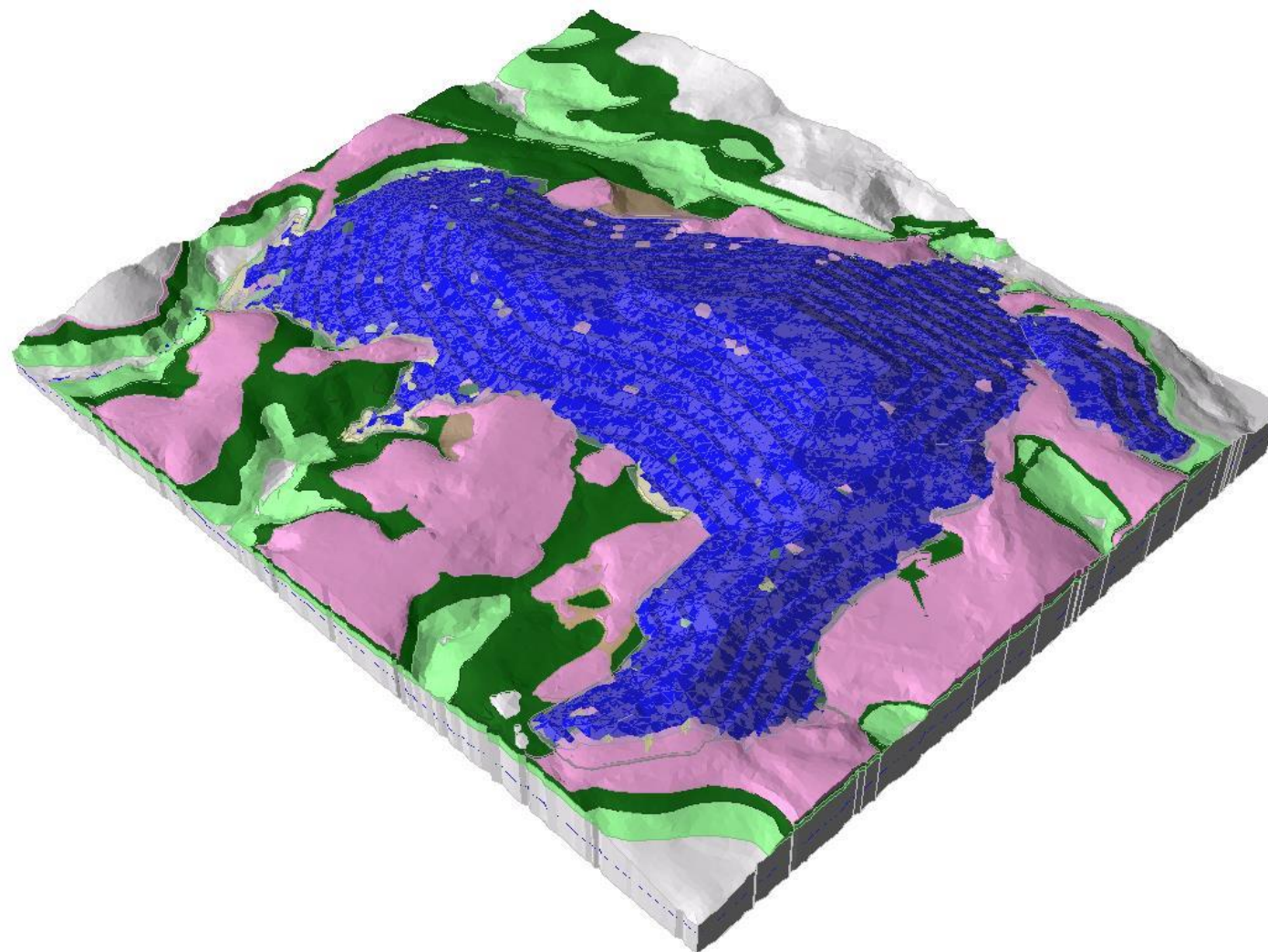
Foram escolhidas as mesmas duas seções para avaliação dos resultados (Figura 5-9).

Figura 7-15 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 93%



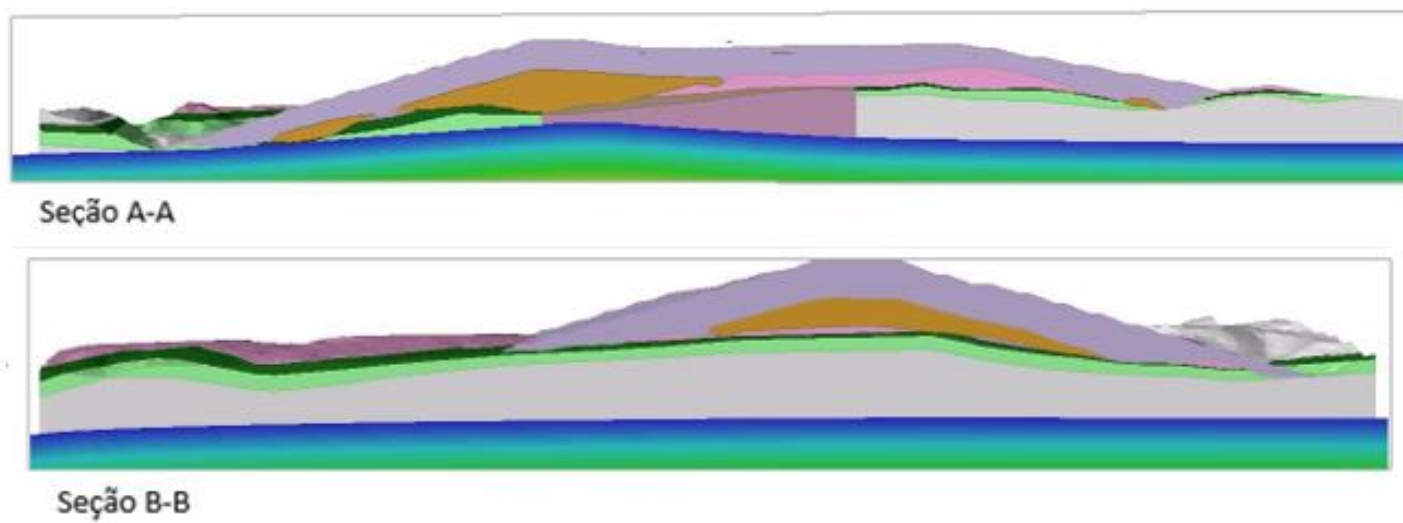
Fonte: O autor

Figura 7-16 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com grau de compactação de 93%



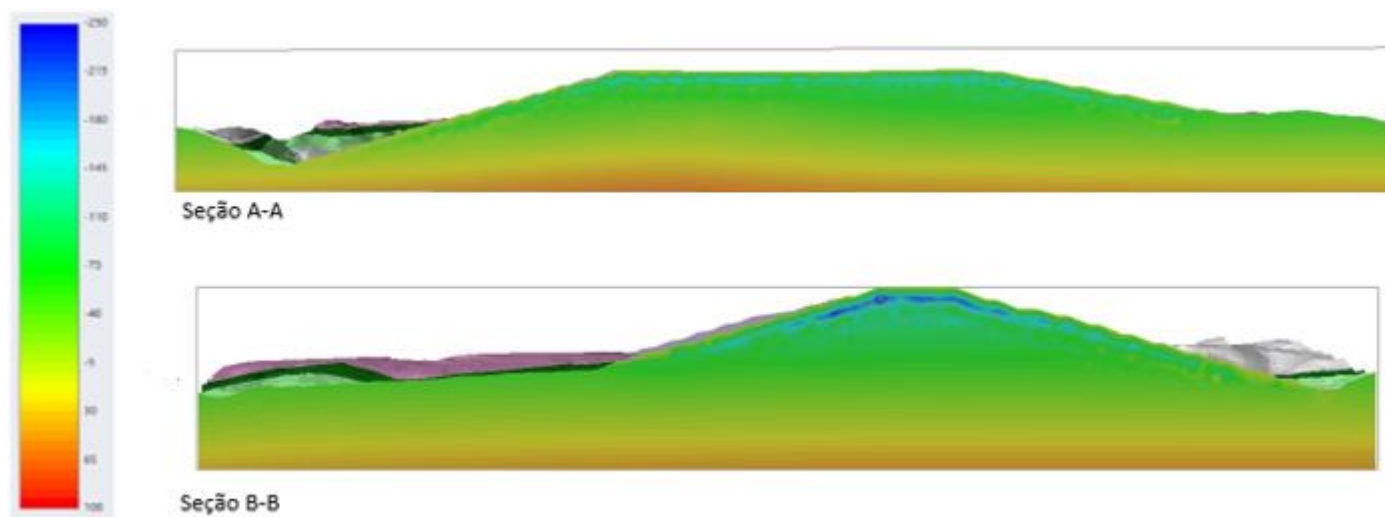
Fonte: O autor

Figura 7-17 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 93%



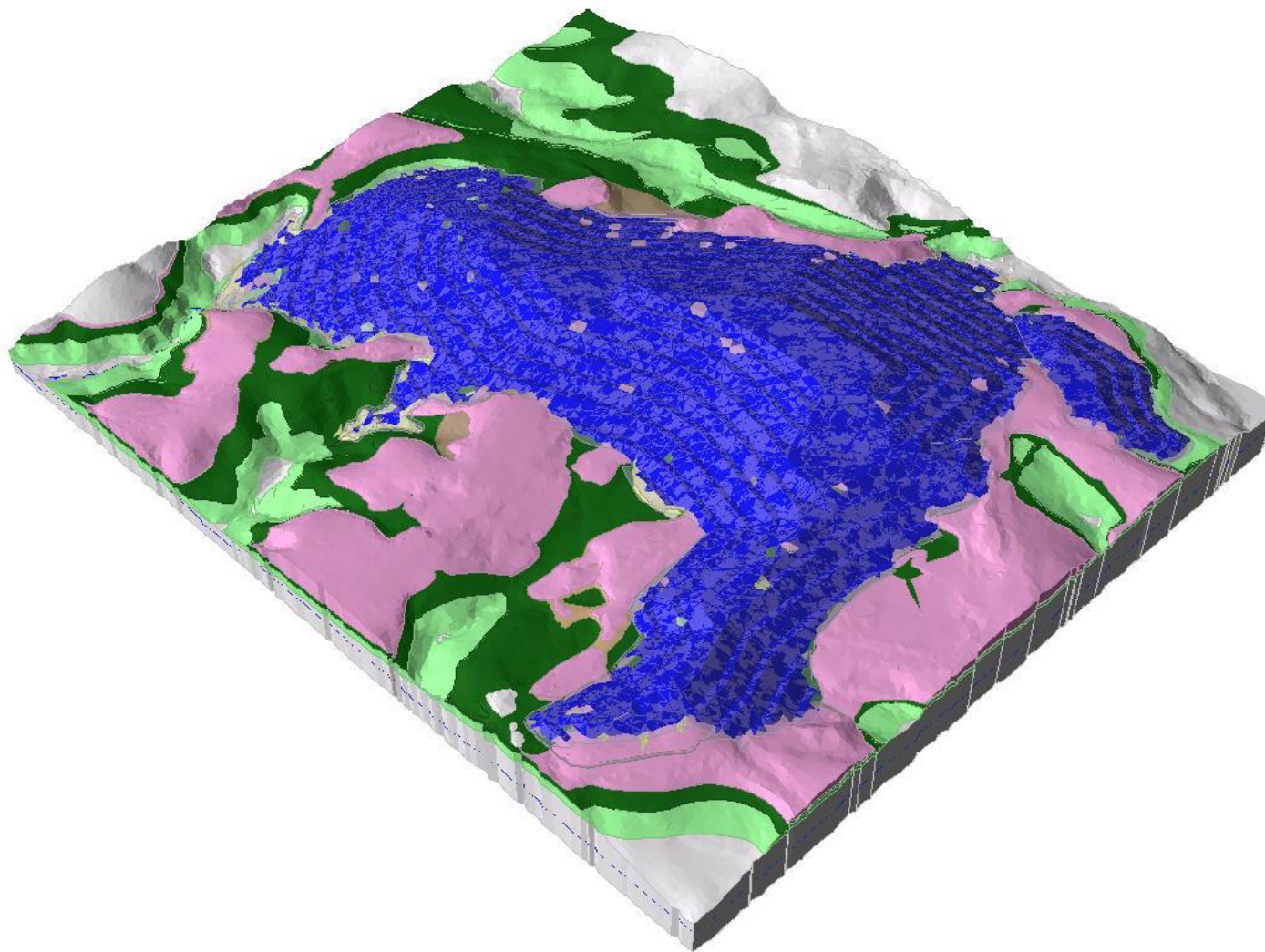
Fonte: O autor

Figura 7-18 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 95%



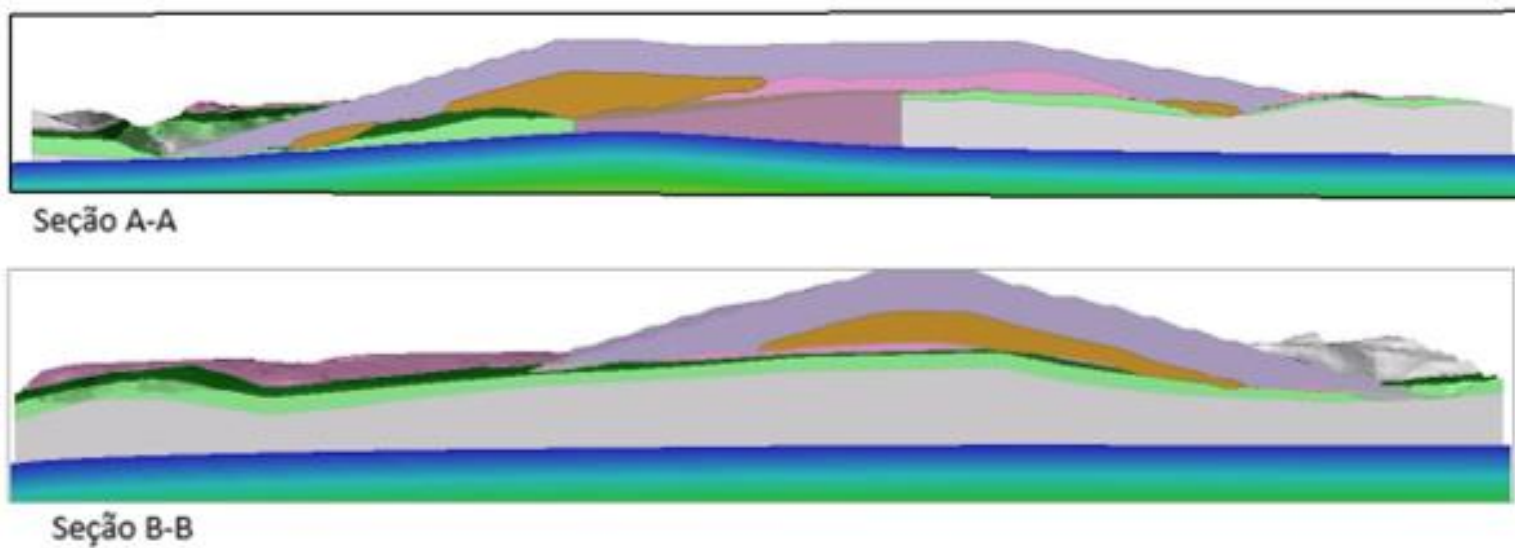
Fonte: O autor

Figura 7-19 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com grau de compactação de 95%



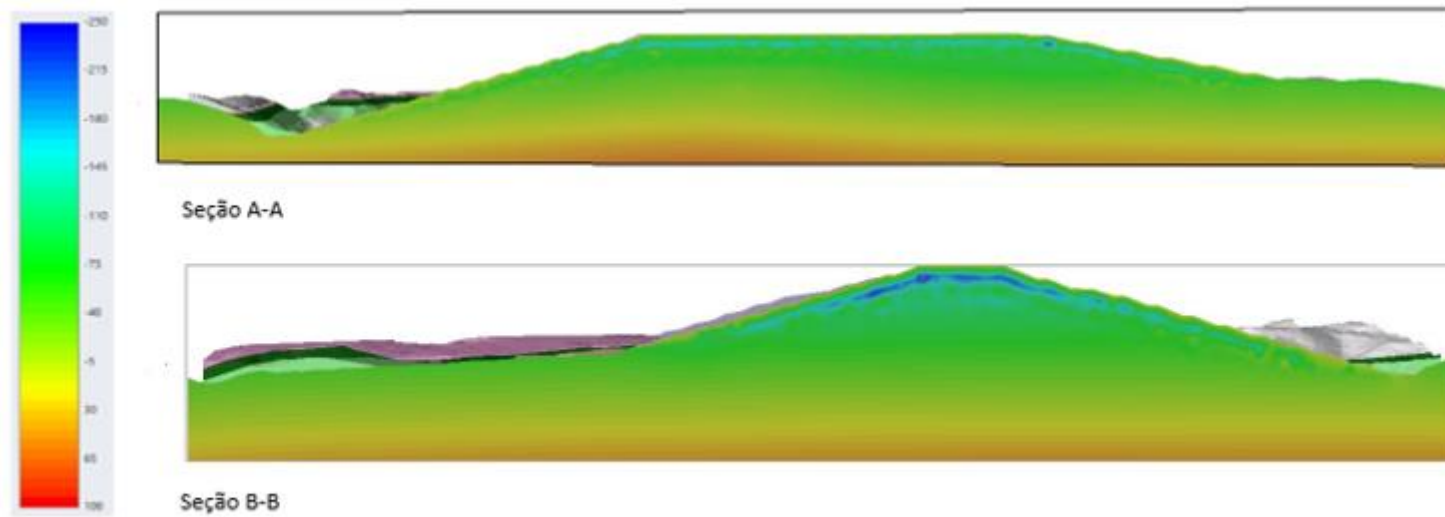
Fonte: O autor

Figura 7-20 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 95%



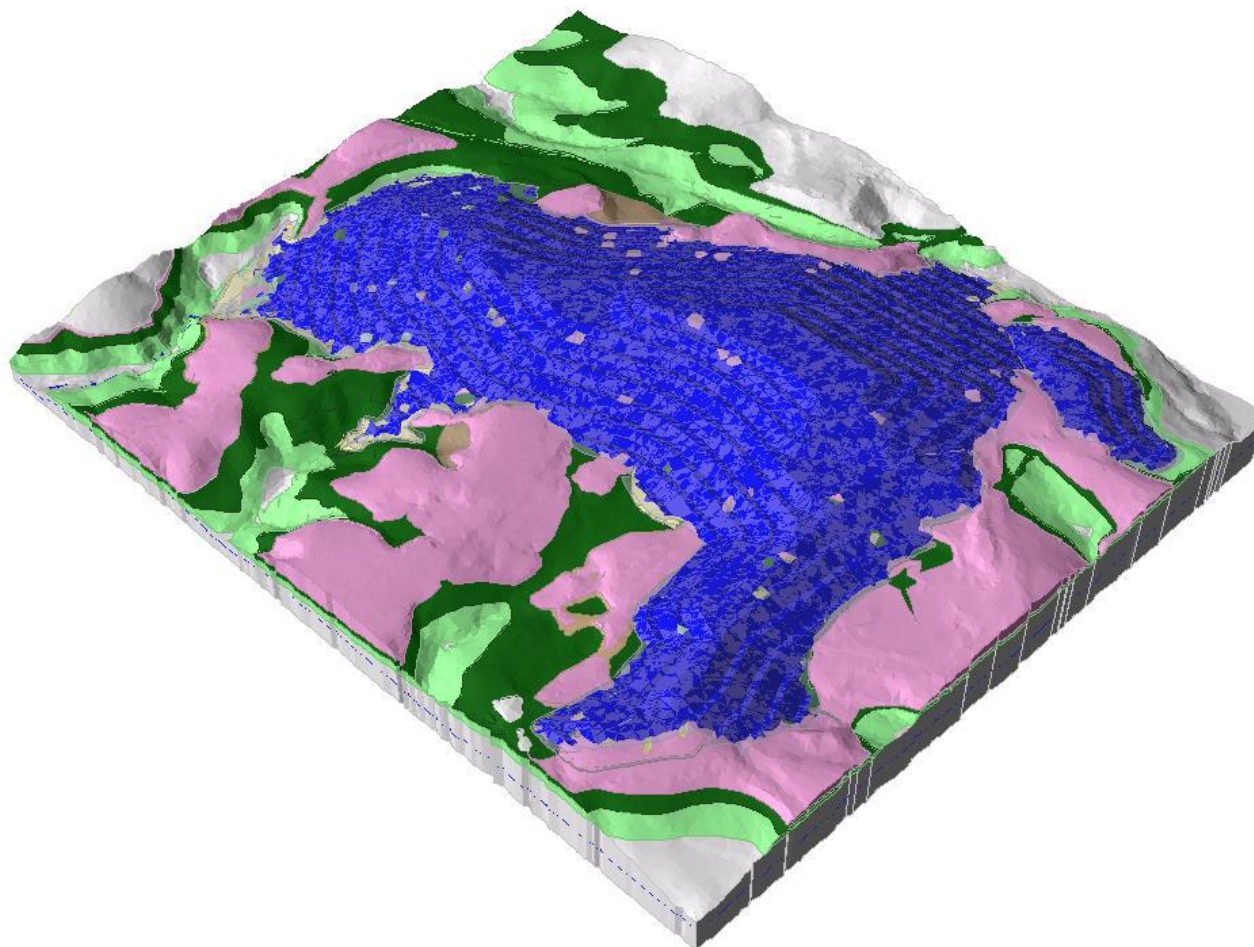
Fonte: O autor

Figura 7-21 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 97%



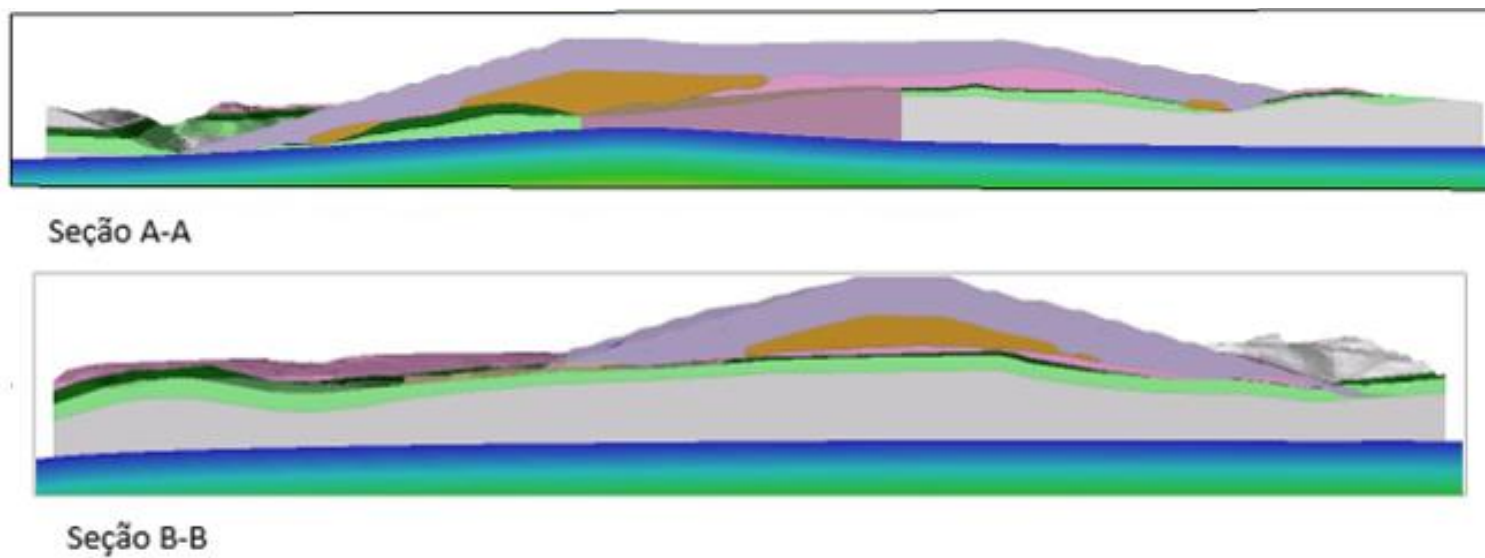
Fonte: O autor

Figura 7-22 - Isosuperfície de poro-pressão nula – Análise com grau de compactação de 97%



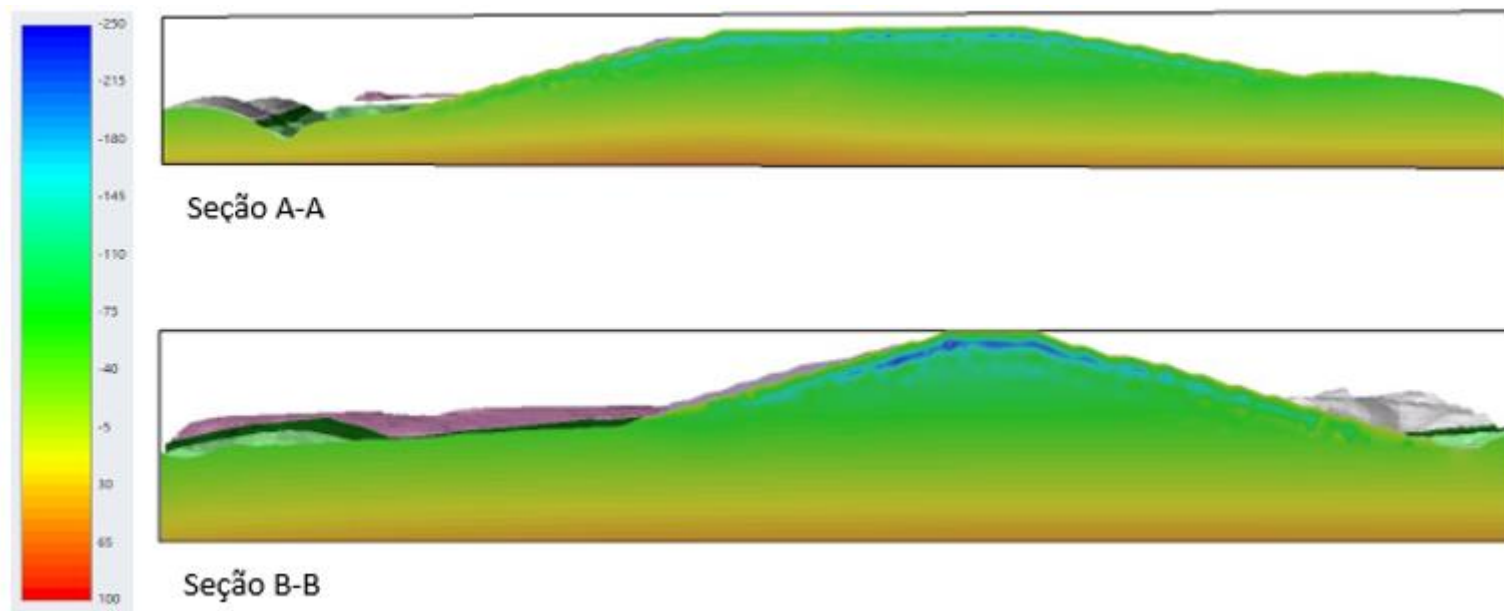
Fonte: O autor

Figura 7-23 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 97%



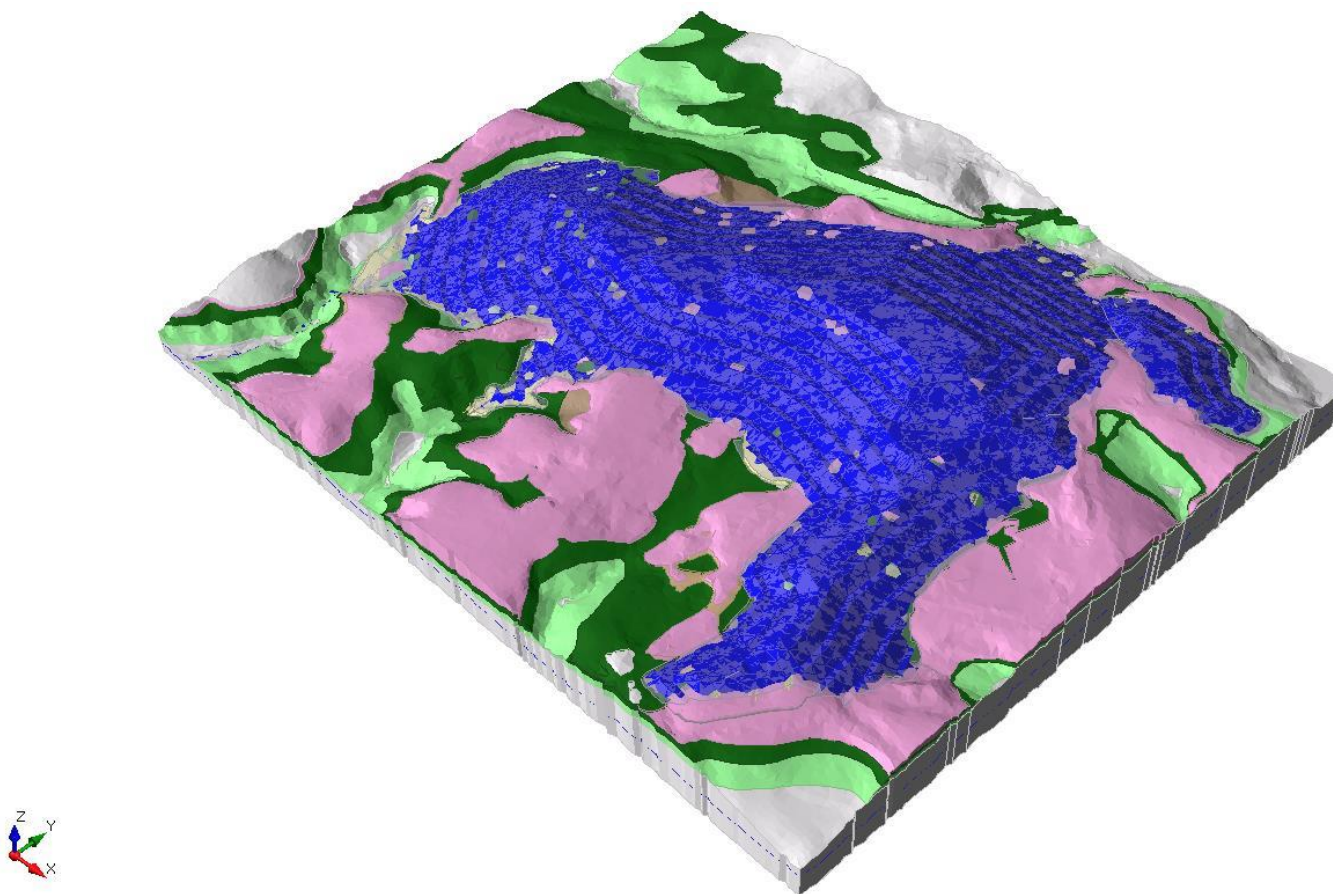
Fonte: O autor

Figura 7-24 - Carga hidráulica – Análise com grau de compactação de 100%



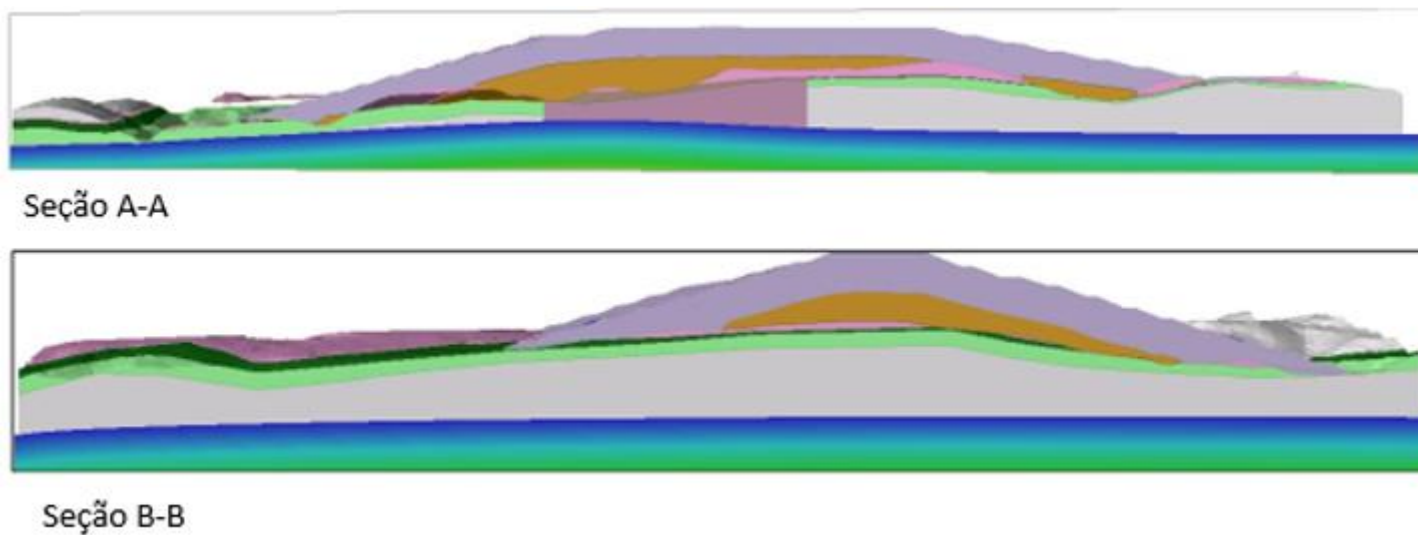
Fonte: O autor

Figura 7-25 - Isosuperfície de poro-pressão 0 – Análise com grau de compactação de 100%



Fonte: O autor

Figura 7-26 - Localização do nível freático – Análise com grau de compactação de 100%



Fonte: O autor

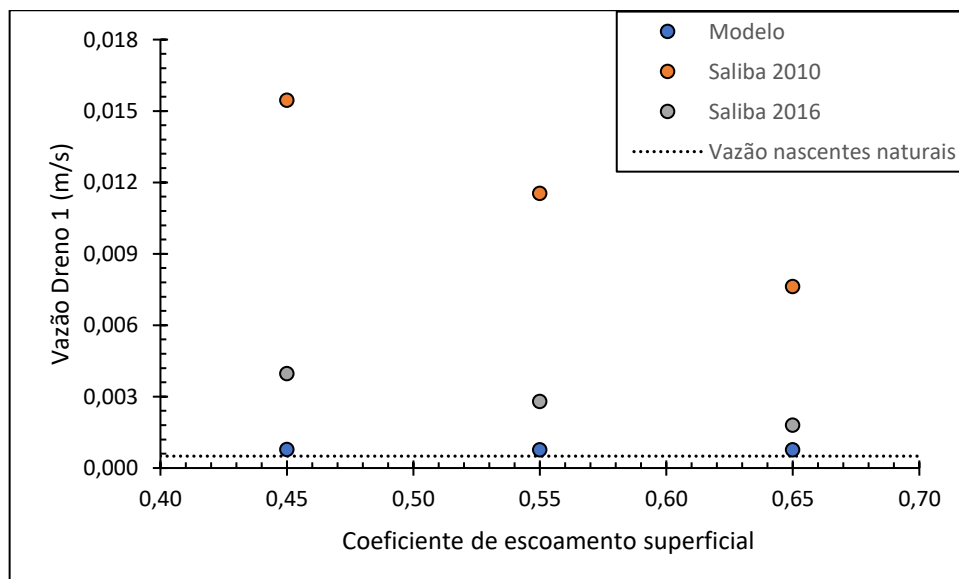
Ao analisar as vazões obtidas no sistema de drenagem interno e a superfície freática na pilha, foi possível concluir que, a variação dos graus de compactação avaliados (93%, 95%, 97% e 100%) não resultou em influências significativas nas análises de percolação realizadas. Cabe ressaltar, as metodologias analíticas apresentadas no item 4.2 não têm como parâmetro de entrada nenhuma característica física do material da pilha e, portanto, o grau de compactação do rejeito não possui influência nas vazões calculadas.

7.4 Análise dos Resultados e Considerações Gerais

Os resultados apresentados para as análises de percolação realizadas neste estudo de caso buscaram caracterizar a influência do grau de compactação, coeficiente de escoamento e metodologia de dimensionamento do sistema de drenagem interno de pilhas de rejeito.

As vazões no sistema de drenagem e as cargas hidráulicas obtidas permitem avaliar o comportamento hidráulico da pilha. A Figura 7-27 apresenta o resumo comparativo entre as vazões no dreno 1 obtidas através do dimensionamento pelos métodos analíticos propostos por Saliba *et al.* (2010) e Saliba *et al.* (2016) e as vazões obtidas no modelo numérico.

Figura 7-27 - Comparação entre vazões obtidas no dreno 1



Fonte: O autor

Analisando os resultados da Figura 7-27, nota-se que a metodologia de determinação da vazão apresentada por Saliba *et al.* (2010) resulta em uma maior vazão estimada, o que é de se esperar, uma vez que o método utiliza a máxima vazão mensal da série histórica, enquanto o dimensionamento pelo método de Saliba *et al.* (2016) utiliza a média anual. O primeiro método resultou em uma vazão que, na média, é igual a 4,5 vezes a vazão dimensionada por Saliba *et al.* (2016).

Outra conclusão resultante dos estudos é de que o coeficiente de escoamento superficial adotado possui uma influência maior nos métodos analíticos que na modelagem numérica, o que mostra a importância da correta definição desse parâmetro e da elaboração do balanço hídrico.

O dimensionamento da vazão no sistema de drenagem através da modelagem numérica resultou em valores menores que as obtidas através dos métodos analíticos, em que a vazão obtida se aproximou à medida nas nascentes naturais da região da pilha, que foram utilizadas na calibração do modelo. Isso indica que a contribuição da infiltração na pilha para o sistema de drenagem interno é pequena. Outra observação que corrobora essa observação é a baixa vazão obtida nos demais sistemas de drenagem internos, que não possuem condição de contorno para vazão natural em sua modelagem.

Portanto, ao dimensionar a vazão no sistema interno de drenagem através da modelagem numérica tridimensional, obtém-se uma redução na seção necessária para o escoamento quando comparado com os métodos propostos por Saliba *et al.* (2010) e Saliba *et al.* (2016). Entretanto, ressalta-se que para a correta modelagem da estrutura é necessário o estudo da região de implantação da pilha, principalmente no cadastro de nascentes e avaliação da superfície freática na fundação.

Nas análises, a pilha de rejeitos permaneceu em um estado não saturado, com um aumento na saturação apenas nas camadas superiores devido à precipitação. Nas análises com coeficiente de escoamento igual a 0,45 houve a saturação superficial da pilha (Figura 7-7). Nas análises com coeficiente de 0,55 houve uma redução na saturação superficial da pilha, enquanto para o coeficiente de 0,65 não se observou saturação superficial.

A saturação superficial da pilha tende a não apresentar riscos à estrutura após sua construção, uma vez que é pequena e localizada nas faces dos taludes e, além

disso, desaparece no período seco, o que está em conformidade com os estudos elaborados por AMEC (2009), apresentados no item 4.3, em que o teor de umidade das camadas superficiais analisadas sofreu variações durante os períodos secos e chuvosos.

Entretanto, a saturação das camadas superficiais pode oferecer riscos à estrutura caso ocorra durante seu período construtivo, uma vez que, após um evento de precipitação, o rejeito pode se encontrar próximo à saturação e a compactação das camadas posteriores pode criar bolsões de materiais saturados ou próximos à saturação no interior da pilha. A consideração desta situação está sendo realizada em um estudo em desenvolvimento, referente à análise de estabilidade da mesma pilha.

Com relação ao grau de compactação do rejeito na pilha, este não apresentou diferenças significativas no resultado do modelo de percolação, já que as vazões obtidas nos sistemas de drenagem e as pressões neutras na estrutura foram equivalentes.

8. CONCLUSÕES

O estudo se propôs a avaliar o comportamento hidráulico de uma pilha de rejeitos compactados, assim como comparar metodologias para o dimensionamento de seu sistema de drenagem interno. Para tal, realizou-se o dimensionamento das vazões do sistema de drenagem interno da estrutura por dois métodos analíticos e por meio de análises de percolação em modelos tridimensionais.

De posse dos resultados, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A variação do grau de compactação do rejeito resultou em uma pequena diferença nos parâmetros de solos não saturados obtidos.
- Observou-se uma grande influência do coeficiente de escoamento superficial no dimensionamento dos sistemas de drenagem por modelos analíticos, o que não foi observado no modelo numérico, que apresentou vazão próxima à das nascentes cadastradas na região.
- Nas análises por modelos numéricos observou-se a tendência de saturação das camadas superficiais da pilha, o que pode ocasionar na presença de camadas saturadas ou próximas da saturação no interior de pilhas de rejeito após o período chuvoso, fenômeno que deve ser considerado em análises de estabilidade.
- As análises numéricas indicam que não há a formação de um nível freático no interior da pilha, ficando este restrito à fundação. Ou seja, a pilha funciona como um empilhamento realmente drenado.
- O grau de compactação adotado na análise mostrou pouca influência na vazão dos sistemas de drenagem, na freática obtida no modelo e na saturação superficial da pilha. Apesar disso, um maior grau de compactação da pilha pode resultar em um maior coeficiente de escoamento superficial, diminuindo a possibilidade de saturação superficial da pilha.

Em geral, a utilização de modelos tridimensionais em análises geotécnicas está em crescimento, uma vez que conseguem suprir algumas limitações de modelos bidimensionais, como a modelagem de drenos em talwegues, como o apresentado

no estudo de caso. Os resultados obtidos neste estudo mostraram a viabilidade e o potencial de utilização deste tipo de análise, em especial em pilhas localizadas em regiões de relevo acidentado, no qual análises bidimensionais dificilmente conseguem representar as condições reais de campo.

No entanto, ainda há na literatura poucos estudos de sistemas de drenagem de pilhas em modelos tridimensionais. Os modelos existentes, como o estudo de caso apresentado, ainda necessitam de validação através da medição e acompanhamento histórico da vazão nos sistemas de drenagem e dos instrumentos de verificação do nível freático e piezometria das pilhas de rejeito a serem construídas.

Entende-se ainda que outra contribuição deste trabalho foi a determinação de parâmetros geotécnicos de solos não saturados para rejeitos de ferro filtrados compactados, avaliando a influência do grau de compactação nos mesmos. Esse material poderá ser utilizado em pesquisas futuras, para análises comparativas ou estimativas iniciais de valores na ausência de ensaios de campo ou laboratório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (Brasil). Sistema de Gestão de Segurança de Barragem de Mineração (SIGBM). Brasília, DF: ANM, 2021. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Mapa>. Acesso em: 05 jan. 2022.

AMEC Earth and Environmental Inc. 2009. Rosemont Copper Company Dry Stack Tailings Storage Facility Final Design Report. Project No. 84201191. Prepared for Rosemont Copper Company. Englewood, Colorado: AMEC Earth and Environmental, Inc. April 15.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.

_____ NBR 13029: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2017.

_____ NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016a.

_____ NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2016b.

_____ NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016c.

_____ NBR 6508: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm: Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

_____ NBR 7180: Determinação do Limite de Plasticidade. Rio de Janeiro, 2016d.

_____ NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica - Procedimento. Rio de Janeiro, 2016e.

_____ NBR 7182: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016f.

CARDOSO JUNIOR, CR. Estudo do comportamento de um solo residual de gnaiss não saturado para avaliar a influência da infiltração na estabilidade de taludes. 2006. 172 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CARNEIRO, J. J. V. Characterization of Iron Ore Tailings and Evaluation of the Effect of Compaction and Confining Pressures on its Behavior. 2021. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021.

COOLING, D.J. Improving the sustainability of residue management practices — alcoa world alumina australia. Paste, p. 3–16, 2007.

CRUZ, P.T., Materon, B., Freitas, M. (2009). Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. Oficina de Textos, Belo Horizonte, MG, Brasil. 448 p.

CRYSTAL, C.; HORE, C.; EZAMA, I.. Filter-Pressed Dry Stacking: design considerations based on practical experience. In: Tailings and Mine Waste, 2018, Keystone. Proceedings [...] . [S.L.]: Colorado State University, 2018. p. 209-219.

DARCY, H. (1856). Les Fontaines publiques de la ville de Dijon (The Public Fountains of the City of Dijon), Tradução para o inglês de Patricia Bobeck, Kendall/Hunt Publishing Co., 2004. 598 p

DAVIES, M.; RICE, S. An alternative to conventional tailing management – “dry stack” filtered tailing. In proceedings of Tailings and Mine Waste, Balkema, 2001

DAVIES, Michael. Filtered Dry Stacked Tailings – The Fundamentals. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON TAILINGS AND MINE WASTE, 15., 2011, Vancouver Bc. Proceedings [...] . Vancouver: Norman B. Keevil Institute Of Mining Engineering, 2011. p. 1-9.

FREDLUND, D.G.; XING,A. Equation for the soil-water characteristic curve. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp 517 p, 1994.

HAWLEY, M., & CUNNING, J. (2017). Guidelines for mine waste dump and stockpile design. CSIRO Publishin

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. Brasília, DF, 128p, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. Normais Climatológicas. 2021. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/>. Acesso em: 5 jan. 2022.

KLOHN CRIPPEN BERGER (2017). Study of Tailings Management Technologies, MEND report 2.50.1, October 2017

LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL – PORTUGUAL (LNEC). E 197: Solos – Ensaio de compactação. Lisboa, 1966.

LARA, J.L.; LEÓN, E. Design and operational experience of the Cerro Lindo filtered tailings deposit. Australian Centre for Geomechanics, Perth, Australia, 2011.

LARA, J.L.; PORNILLOS, E. U.; MUÑOZ, H.E. Geotechnical-geochemical and operational considerations for the application of dry stacking tailings deposits - State-of-the-art. n. August, 2013.

LEPS, T. M. (1973). Flow through rockfill. In: Hirschfeld, R. C. Poulos, S. J. (ed.), Embankment Dam Engineering. Casagrande Volume. John Wiley & Sons, New York, NY, USA. p. 87-105.

LI, B. Garga, V. K. Davies, M. H. (1998). Relationships for non-Darcy flow in Rockfill. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 124, n. 2. p. 206-212.

NERY, Kellen Dias. Compactação De Um Resíduo Da Produção De Alumina (Lama Vermelha) Desaguado Por Filtro Prensa Compactação De Um Resíduo Da Produção De Alumina (Lama Vermelha) Desaguado Por Filtro. 2013.

OLIVEIRA, A. (2021) Análise Tensão-Deformação Em Uma Pilha De Rejeito Filtrado De Grandes Dimensões. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021

Pinheiro, M. C. (2011) Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração. Porto Alegre: ABRH. 308 p;

PINTO, Carlos de Souza. Curso Básico Mecânica dos Solos. 3. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006.

PORTES, A. M. C. Avaliação da Disposição de Rejeitos de Minério de Ferro nas Consistências Polpa e Torta. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes). UFMG, Belo Horizonte, MG. 180p, 2013.

REICHARDT, K. Timm, L. C. (2004) Solo, Planta e Atmosfera. Conceitos, Processos e Aplicações, 1ª ed., Ed. Manole, Barueri, SP, Brasil. 478 p. 2004.

SALIBA, A.P.M., Gimenez, E. A., Mafra, J. Q. M., Resende, M.F. (2010). Metodologia para dimensionamento de drenos de fundo de pilhas de estéril. COBRAMSEG 2010. Associação Brasileira de Engenharia Geotécnica e Mecânica dos Solos – ABMS, Gramado, 2010.

SALIBA, A.P.M., Gimenez, E. A., Mafra, J. Q. M., Resende, M.F. (2016). Revisão de Metodologia para Dimensionamento de Drenos de Fundo de Pilha de Estéril. COBRAMSEG 2016. Associação Brasileira de Engenharia Geotécnica e Mecânica dos Solos – ABMS, Belo Horizonte, 2016.

SCHAAP, M; LEIJ, F, Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with the Mualem-van Genuchten Model. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 64, pp 843 – 851, 2000.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the water permeability of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892 – 898, 1980.

WATSON, A.; CORSER, P.; PARDO, E. G.; CHRISTIAN, T. L.; VANDEKEYBUS, J. A comparison of alternative tailings disposal methods — the promises and realities. *Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste*, [S.L.], p. 499-514, out. 2010. Australian Centre for Geomechanics, Perth.

WONG, D; BARBOUR, S; FREDLUND, D. Modelling of flow through potash tailings piles. *Canadian Geotech Journal*, Vol 25, pp. 292-305, 1988.