



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil  
Curso de Graduação em Engenharia Civil

---

**GUILHERME DO CARMO VASCONCELOS**

CONSTRUÇÃO DE ATERROS COMPACTADOS COM REJEITO DE  
MINERAÇÃO FILTRADO

Ouro Preto

2021

Construção de aterros compactados com rejeito de mineração filtrado

**GUILHERME DO CARMO VASCONCELOS**

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 20 de agosto de 2021 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite – UFOP

Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho – UFOP

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V331c Vasconcelos, Guilherme do Carmo .  
Construção de aterros compactados com rejeito de mineração  
filtrado. [manuscrito] / Guilherme do Carmo Vasconcelos. - 2021.  
86 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite.  
Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes Oliveira Filho.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Aterros. 2. Aterros sanitários - Solos - Compactação. 3. Rejeitos  
(Metalurgia) . I. Leite, Adilson do Lago. II. Oliveira Filho, Waldyr Lopes. III.  
Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716

Construção de aterros compactados com rejeito de mineração filtrado

GUILHERME DO CARMO VASCONCELOS

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 20 de agosto de 2021 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.  
Banca examinadora:



---

Orientador: Prof. Dr. Adilson do Lago Leite – UFOP

XX

---

Coorientador: Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho – UFOP

XX

---

Membro: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

XX

---

Membro: Guilherme Henrique Dias Freitas – Eng. Civil Geotécnico

*Dedico este trabalho a todos os estudantes socioeconomicamente vulneráveis que conseguiram uma oportunidade de ingressar e de se formar em uma universidade de qualidade.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Eláidio e Lucira, por sempre estarem comigo e me apoiarem em todas as decisões. Sem vocês isso não seria possível. Aos meus irmãos João Vitor, Luiz Carlos e a minha tia Terezinha pelo excelente convívio e pela cumplicidade ao longo dos anos. À Fabiana, por estar sempre presente nos momentos de alegria e ser parceira nos momentos de dificuldades. Aos amigos, pelos momentos de lazer e experiências vividas.

Agradeço aos professores que sempre estiverem dispostos a contribuir com a minha formação e aprendizado. À Escola de Minas pelas oportunidades e ensinamentos cedidos ao longo destes anos de graduação. Ao meu orientador, professor Doutor Waldyr Lopes de Oliveira Filho, pela grande ajuda na produção deste trabalho e por estar sempre disposto a auxiliar os alunos que o procuram.

Agradeço ao Professor Doutor Adilson do Lago Leite pela oportunidade de contribuir como monitor de Mecânica dos Solos I por um ano, e, nesse tempo, obter um contato maior com as práticas laboratoriais. Agradeço aos Servidores Técnicos dos laboratórios de Mecânica dos Solos do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas (NUGEO/EM), pela parceria e prestatividade nas atividades práticas realizadas.

Agradeço aos Engenheiros Civis Erick Oliveira, Guilherme Cruz, Gustavo Melo, Leonardo Ferreira, Leonardo Padula, Leonardo Santos e aos demais engenheiros e profissionais do setor de barragens da Kinross – Paracatu (MG), pela oportunidade de estagiar e desenvolver conhecimentos práticos de engenharia geotécnica. À Tetra Tech, em especial à Christine Alfradique, Hiago Souza, Michelle Giorgini e a todos os colegas da antiga GEO. À Luana Ribeiro, pela amizade e parceria incomparável no dia a dia de trabalho.

Agradeço à Liga Acadêmica de Geotecnia da Escola de Minas (LAGEM) e todos os amigos que estiveram comigo nos dois anos de muito estudo, eventos geotécnicos e palestras que pude participar. À Fundação Gorceix, ao DETAP e a PRACE por todos os auxílios que foram fundamentais para minha formação e estadia em Ouro Preto.

## RESUMO

Novas técnicas de disposição de rejeito podem proporcionar ganhos para o setor de mineração. Devido a necessidade de se aproveitar ao máximo as áreas disponíveis em mineradoras e indústrias de beneficiamento para a disposição de resíduos e em virtude dos impactos socioambientais causados com a disposição do rejeito em barragens e, principalmente, pelos grandes impactos ocasionados por rupturas dessas estruturas. Nos dias atuais, as empresas têm estudado essas técnicas para que se possa evitar tais complicações e até dar um novo destino a esse material. Diante disso, a disposição de rejeito com maiores teores de sólidos tem se apresentado como uma boa opção. Para tal, a técnica de disposição de rejeitos filtrados pode se tornar uma boa alternativa, visto que, a partir desse processo, o material a ser depositado possui um baixo teor de umidade, se comparado ao rejeito depositado da maneira convencional. Esse pode ser mecanicamente compactado na intenção de alcançar um teor de sólidos maior e, conseqüentemente, um nível maior de segurança. Isto posto, o presente trabalho busca analisar algumas características importantes para a construção de aterros compactados com o uso de rejeitos filtrados de mineração, a partir de filtros prensa horizontais. Buscou-se na literatura as formas mais comuns de disposição de rejeito, noções de terraplenagem e informações a respeito dos equipamentos utilizados na confecção dos aterros compactados. Já no estudo dos trabalhos, procurou-se apresentar as metodologias de cada autor e os principais resultados encontrados por eles, sendo o primeiro em rejeito de bauxita e o segundo em rejeito de minério de ferro. Por fim, foi possível concluir com as semelhanças e diferenças entre cada material, bem como salientar medidas pertinentes para a construção dos aterros compactados.

Palavras-chaves: Aterro, Compactação, Terraplenagem, Rejeito Filtrado, Dry Stack.

## **ABSTRACT**

New tailings disposal techniques can provide gains for the mining sector. Due to the need to make the most of areas available in mining and processing industries for the disposal of waste and in view of the social and environmental impacts caused by the disposal of tailings in dams and, mainly, by the large impacts caused by the rupture of these structures. Nowadays, companies have been studying these techniques to avoid such complications and even give this material a new destination. Therefore, the disposal of tailings with higher solids contents has been presented as a good option. For this, the technique of disposal of filtered tailings can become a good alternative, since, from this process, the material to be deposited has a low moisture content, compared to the tailings deposited in the conventional way. This can be mechanically compacted to achieve a higher solids content and, consequently, a higher level of safety. Having said this, the present work seeks to analyze some important characteristics for the construction of compacted embankments with the use of filtered mining tailings, from horizontal press filters. The most common forms of tailings disposal, earthwork notions and information about the equipment used in the confection of compacted embankments were searched in the literature. In the study, we tried to present the methodologies of each author and the main results found by them, the first in bauxite tailings and the second in iron ore tailings. Finally, it was possible to conclude with the similarities and differences between each material, as well as highlight relevant measures for the construction of compacted embankment.

Keywords: Embankment, Compaction, Earthworks, Filtered Tailings, Dry Stack.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Modelo clássico do método de alteamento a montante. Inicia-se a construção por um dique de partida e a barragem passa por sucessivos alteamentos ao longo de sua vida útil no sentido de montante, sobre o rejeito anteriormente depositado.....5
- Figura 2: Modelo clássico do método de alteamento a jusante. Inicia-se a construção por um dique de partida e a barragem passa por sucessivos alteamentos ao longo de sua vida útil no sentido de jusante, sendo necessária uma maior área nessa região, bem como, um maior volume de material. ....5
- Figura 3: Modelo clássico do método de alteamento por linha de centro. Inicia-se a construção por um dique de partida e a barragem passa por sucessivos alteamentos ao longo de sua vida útil seguindo o eixo central do dique de partida, recebendo materiais tanto na região de montante quanto na de jusante.....5
- Figura 4: Estrutura de empilhamento drenado.....6
- Figura 5: Extração de argila.....7
- Figura 6: Cava resultante do processo de extração de argila, parcialmente preenchida com material estéril e posteriormente completada com solo superficial e areia por meio de aterro hidráulico.....8
- Figura 7: Exemplo de filtro-prensa horizontal. É possível observar as placas por onde o rejeito é filtrado, alinhadas de modo vertical e paralelas entre si. ....9
- Figura 8: Esquema simplificado de filtro-prensa. A figura divide em partes o processo que ocorre em cada uma das placas pertencentes ao filtro. Acompanhando as setas vermelhas, da esquerda para a direita, percebe-se que o material sólido fica retido no tecido filtrante, mas a água o transpassa, sendo posteriormente retirada. 11
- Figura 9: Range de aplicação do método de disposição de rejeito filtrado para diferentes minas estudadas. A região contendo os pontos das minas que aplicam o método de disposição de rejeito filtrado se encontra em destaque, a esquerda da figura. ....14

Figura 10: Zona não estruturante e estruturante em pilhas de rejeito filtrado. ....	17
Figura 11: Aspecto da curva de compactação do solo. ....	21
Figura 12: Influência da energia de compactação de um mesmo solo. ....	22
Figura 13: Estrutura de solos compactados. ....	22
Figura 14: Trator de esteiras equipado com lâmina. ....	24
Figura 15: Pá carregadeira. ....	25
Figura 16: Escavadeira hidráulica de esteira equipada com concha. ....	26
Figura 17: Motoniveladora realizando espalhamento do solo. É possível perceber, em sua região inferior-central, a lâmina realizando o trabalho. ....	27
Figura 18: Trator agrícola de pneu com grade, também conhecido como “ <i>girico</i> ”, realizando a escarificação de um solo para recebimento da próxima camada de compactação. ....	28
Figura 19: Caminhão basculante. ....	29
Figura 20: Caminhão pipa. ....	30
Figura 21: Rolo compactador pé-de-carneiro. ....	31
Figura 22: Rolo compactador liso vibratório. ....	32
Figura 23: Rolo compactador pneumático. ....	33
Figura 24: Compactador manual. ....	34
Figura 25: Condições previstas para testes no aterro experimental, onde é possível observar cada uma das três pistas com suas respectivas camadas. ....	38
Figura 26: Variação da umidade nas camadas da pista 1. ....	39
Figura 27: Variação da umidade nas camadas da pista 2. ....	40
Figura 28: Variação da umidade nas camadas da pista 3. ....	41
Figura 29: Filtro prensa piloto utilizado no processo de filtragem da amostra de rejeito de minério de ferro em forma de polpa, com 60% de sólidos (W/W). ....	43

Figura 30: Filtro prensa piloto. ....	45
Figura 31: Câmaras de filtragem pertencente ao filtro prensa piloto.....	45
Figura 32: Imagem a esquerda: Lançamento da polpa de rejeito no <i>sump</i> . Imagem da direita: Vista do processo de secagem natural do rejeito por evaporação, drenagem superficial e percolação pela fundação. ....	48
Figura 33: Imagem a esquerda: Retirada do rejeito do <i>sump</i> . Imagem a direita: Espalhamento e homogeneização de camadas no aterro experimental. ....	48
Figura 34: Espalhamento do rejeito e preparação do aterro experimental. A imagem da esquerda encontra-se uma motoniveladora e na imagem a direita um trator de pneu do tipo pá carregadeira equipada com grades em sua parte traseira. ....	49
Figura 35: Compactação do aterro experimental com rolo compactador pé-de-carneiro. ....	49
Figura 36: Curvas granulométricas dos ensaios dos blocos coletados.....	52
Figura 37: Pista 1 – Compilação das curvas de compactação de cada camada. ....	53
Figura 38: Pista 1 – 4,6,8 e 10 passadas.....	53
Figura 39: Pista 2 – Compilação das curvas de compactação do topo de cada camada. ....	54
Figura 40: Pista 2 – 4,6,8 e 10 passadas – TOPO.....	55
Figura 41: Pista 2 – Compilação das curvas de compactação da base de cada camada. ....	55
Figura 42: Pista 2 – 4,6,8,10 passadas – BASE. ....	56
Figura 43: Pista 3 – Compilação das curvas de compactação do topo de cada camada. ....	57
Figura 44: Pista 3 – 4,6,8 e 10 passadas – TOPO.....	58
Figura 45: Pista 3 – Compilação das curvas de compactação da base de cada camada. ....	59

Figura 46: Pista 3 – 4,6,8 e 10 passadas – BASE.....	59
Figura 47: Seção adotada para análise numérica.....	63
Figura 48: Análise granulométrica realizada no rejeito de minério de ferro - primeira etapa. ....	65
Figura 49: Curva de compactação com energia Proctor Normal, realizada em amostra de rejeito de minério de ferro - primeira etapa.....	66
Figura 50: Ensaio de compactação Proctor Normal - segunda etapa.....	67
Figura 51: Curvas de compactação advindas dos ensaios realizados para obtenção dos parâmetros planejados para a construção do aterro experimental - segunda etapa.....	68
Figura 52: Parâmetros planejados x parâmetros reais - segunda etapa.....	70
Figura 53: Massa específica seca em relação ao número de passadas do rolo compactador pé-de-carneiro - segunda etapa.....	73
Figura 54: Resultados das análises granulométricas das cinco amostras correspondentes aos cinco blocos extraídos em aterro experimental - segunda etapa. ....	74
Figura 55: Projeto básico da pilha de rejeito filtrado. ....	76
Figura 56: Modelo constitutivo sugerido para a pilha de rejeito filtrado e compactado. É possível identificar a zona estrutural em amarelo e a zona não-estrutural em lilás. ....	76

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Número de golpes aplicados aos ensaios de compactação com energia Proctor Normal, com soquete de 2,5 kg. ....	47
Tabela 2: Número de passadas do rolo compactador para realização de testes de compactação de campo para obtenção de parâmetros a serem aplicados à construção do aterro experimental. ....	47
Tabela 3: Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização executados nas amostras coletadas do aterro experimental.....	51
Tabela 4: Resultado dos ensaios de compactação de campo na pista 1, realizados com a utilização de trator de esteira tipo D-6. ....	61
Tabela 5: Resultado dos ensaios de compactação de campo na pista 2, realizados com a utilização de trator de esteira tipo D-6. ....	62
Tabela 6: Resultado dos ensaios de compactação de campo na pista 3, realizados com a utilização de trator de esteira tipo D-6. ....	62
Tabela 7: Resumos dos resultados dos ensaios geotécnicos - primeira etapa. .	64
Tabela 8: Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação com variação da energia – segunda etapa.....	68
Tabela 9: Grau de compactação e teor de umidade obtidos nas amostras indeformadas aplicados ao aterro experimental - segunda etapa.....	69
Tabela 10: Resultados do índice de suporte Califórnia (ISC) - segunda etapa. .	71
Tabela 11: Resultados dos testes de compactação de campo realizados com rolo compactador pé-de-carneiro - segunda etapa.....	72
Tabela 12: Diretrizes operacionais sugeridas para o empilhamento rejeito de minério filtrado.....	75
Tabela 13: Diretrizes de projeto sugeridas para a geometria da pilha de rejeito filtrado. ....	75



## LISTA DE SIGLAS

$c$  – Coesão total

$c'$  – Coesão efetiva

CR – Compacidade relativa dos solos

CIU – Consolidado Isotropicamente não Drenado

CIUnat – Consolidado Isotropicamente não Drenado não Saturado

$e$  – índice de vazios

$e_{\max}$  – índice de vazios máximo

$e_{\min}$  – índice de vazios mínimo

FS – Fator de segurança

GC – Grau de Compactação

$G_s$  – Densidade das partículas sólidas

$h$  ou  $w$  – Teor de umidade

$h_{\text{ót}}$  ou  $w_{\text{ót}}$  – Teor de umidade ótimo

ISC – índice de suporte Califórnia

$k$  – Condutividade hidráulica ou coeficiente de permeabilidade

$k_{20^\circ\text{c}}$  – Permeabilidade a  $20^\circ\text{c}$

LL – Limite de liquidez

LP – Limite de plasticidade

$R_u$  – Razão de poropressão

S – Grau de saturação

$w_{\text{cp}}$  – Teor de umidade do corpo de prova

$\phi$  – Ângulo de atrito total

$\phi'$  – Ângulo de atrito efetivo

$\rho_s$  – Massa específica seca dos sólidos ou densidade dos sólidos

$\rho_{dmáx}$  – Massa específica seca máxima do solo

$\rho_{dmin}$  – Massa específica seca mínima do solo

$\rho_{dnatural}$  – Massa específica seca de campo

$\gamma_d$  – Peso específico seco do solo

$\gamma_{dmáx}$  – Peso específico seco máximo do solo

$\sigma'_p$  – Tensão normal efetiva de pré-adensamento

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	II
Resumo .....	III
Abstract.....	IV
Lista de Figuras .....	V
Lista de Tabelas.....	IX
Lista de Siglas.....	XI
Sumário .....	XIII
1 Introdução .....	1
1.1 Objetivo .....	2
1.1.1 Objetivos Específicos.....	2
2 Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Sistemas de Disposição De Rejeitos.....	3
2.1.1 Barragens de rejeito.....	4
2.1.2 Empilhamento drenado .....	5
2.1.3 Preenchimento de cavas desativadas.....	7
2.2 Disposição a Seco (dry stack) .....	8
2.2.1 Influência do clima .....	13
2.2.2 Drenabilidade .....	14
2.2.3 Transporte e disposição .....	16
2.2.4 Aspectos econômicos .....	18
2.3 Teoria geral da compactação .....	19

XIII

2.3.1	Esforço de compactação.....	19
2.4	Equipamentos Utilizados na Compactação .....	23
2.4.1	Unidades escavo-empurradoras .....	23
2.4.2	Unidades escavo-carregadoras .....	24
2.4.3	Unidades aplainadoras .....	26
2.4.4	Trator de pneu com grades .....	27
2.4.5	Unidades de transporte .....	28
2.4.6	Unidades compactadoras.....	30
2.5	Espessura das camadas .....	34
3	Materiais e Métodos.....	36
3.1	Primeira Análise – Aterro Com Resíduo Filtrado de Alumina (Lama Vermelha) .....	36
3.1.1	Arranjo experimental.....	37
3.1.2	Metodologia executiva .....	38
3.2	Segunda Análise - Sistema de Empilhamento de Rejeito de Minério de Ferro Filtrado e Compactado .....	42
3.2.1	Primeira etapa.....	42
3.2.2	Segunda etapa.....	43
3.3	Discussão dos Métodos.....	49
4	Resultados .....	51
4.1	Primeira Análise – Aterro Com Resíduo Filtrado de Alumina (Lama Vermelha) .....	51
4.1.1	Principais resultados dos ensaios de campo e laboratório .....	51
4.1.2	Resumo dos resultados dos testes de compactação de campo .....	60

4.1.3	Seção adotada para conformação do rejeito filtrado.....	63
4.2	Segunda Análise - Sistema de Empilhamento de Rejeito de Minério de Ferro Filtrado e Compactado .....	64
4.2.1	Resultados referentes à primeira etapa .....	64
4.2.2	Resultados referentes a segunda etapa (aterro).....	66
4.2.3	Seção adotada para conformação do rejeito filtrado.....	74
4.3	Discussão dos Resultados .....	77
5	Conclusões .....	79
5.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros .....	80
	Referências.....	82

# 1 INTRODUÇÃO

Todo e qualquer resíduo, seja ele rejeito ou estéril, deve ser disposto com planejamento. A escolha do local, por exemplo, deve ser feita seguindo dados que comprovem que o terreno é adequado e ideal para tal deposição. A disposição do material estéril e dos rejeitos leva em conta análises geotécnicas e deve prever ações a fim de evitá-las.

O rejeito é um material oriundo do processo de beneficiamento de minérios e o estéril é resultante da lavra, sendo que ambos não possuem valor econômico, a princípio, mas que atualmente já estão sendo reaproveitados, conforme mostram os estudos de Bosch (1987), Gomes (2009) e Ferrante (2014). Com a constante redução das reservas de alto teor e a necessidade de se trabalhar com teores cada vez mais baixos, a produção de rejeitos tem aumentado consideravelmente, bem como a possibilidade de reuso desse material.

Segundo Luz e Lins (2010), no final do século XIX e início do século XX, novas tecnologias surgiram na área de concentração de minérios. Assim, em decorrência da responsabilidade ambiental e social, houve a necessidade de se desenvolver novos estudos e conseqüentemente, tecnologias para o tratamento dos rejeitos, que possibilitem uma disposição alternativa às barragens, que são os métodos mais utilizados até os dias atuais (LUZ e LINS, 2010).

Além disso, após os recentes rompimentos catastróficos de barragens de rejeito das minas Germano e Córrego do Feijão, ocorridos em Mariana (2015) e Brumadinho (2019), ambas localizadas no estado de Minas Gerais, novas alterações nas leis que regem as estruturas foram feitas, e, portanto, os debates e estudos acerca de métodos alternativos para se dispor tais materiais foram intensificados.

O presente trabalho abordará as possibilidades de criação de aterros compactados utilizando rejeitos de mineração filtrados (dry stack), apresentando as características dos materiais que poderiam ser utilizados para esse fim, bem como resultados encontrados por autores em diferentes tipos de rejeitos, elencando suas semelhanças e diferenças.

## **1.1 Objetivo**

O trabalho visa mostrar os processos para se obter um material filtrado nas devidas condições para a construção de aterros compactados, a partir de dois trabalhos práticos realizados em rejeitos de mineração distintos, e, assim, examinar os desafios encontrados pelos engenheiros de minas e apresentar, de acordo com a expertise da engenharia civil, algumas práticas que podem ser vantajosas para aplicação de técnicas que podem auxiliar na tomada de decisões relacionadas a disposição de rejeitos por meio do processo filtrado.

### **1.1.1 Objetivos Específicos**

- Analisar as características físicas do rejeito filtrado que poderá ser destinado à construção de aterros compactados;
- Apresentar os desafios e as possíveis soluções destinadas à indústria de mineração na tratativa dos rejeitos;
- Examinar as semelhanças e diferenças entre os dois trabalhos executados em rejeitos diferentes.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Sistemas de Disposição De Rejeitos**

A metodologia tradicional de disposição de rejeitos em forma de polpa requer grandes áreas para disposição e apresenta grande impacto ambiental. Por esse motivo, as empresas têm enfrentado grandes dificuldades para licenciarem seus investimentos. A proximidade de áreas urbanas e a pressão pública também corrobora com a necessidade de se buscarem novas alternativas a essa metodologia (GUIMARÃES, 2012).

Em outubro de 2020, uma nova lei que regulamenta o funcionamento das barragens no Brasil foi publicada, sejam elas direcionadas para represar água nos reservatórios de usinas hidrelétricas, para a retenção de rejeitos provenientes da mineração ou para armazenamento de outros resíduos. A entrada em vigor da Lei Nº 14.066 foi responsável por diversas mudanças na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), que ocasionaram uma série de obrigações para os empreendedores que administram tais estruturas.

Diversos pontos importantes foram alterados no quesito gestão das barragens, com o intuito de evitar novas catástrofes com a disposição mais convencional de materiais. São exemplos dessas mudanças, os novos instrumentos adicionados ao Plano Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), as novas áreas de risco no entorno de uma barragem, o fim das barragens pelo método a montante no país, a inclusão obrigatória do Plano de Ação Emergencial (PAE) no planejamento de segurança em caso de represas com alto e médio dano potencial associado ou de alto risco, a critério do órgão fiscalizador, dentre outros.

Na disposição dos rejeitos, além dos aspectos intrínsecos da construção e da segurança, é necessário que o reservatório formado para conter o material seja estanque para impedir a infiltração dos efluentes danosos à qualidade das águas como soluções contendo cianetos, metais pesados ou com pH muito ácido (IBRAM et al., 2016). Nesses casos, IBRAM (2016) informam que é de grande importância que

sejam realizadas as investigações geológico-geotécnicas, podendo ser necessária a impermeabilização dos solos.

Existem várias formas de se dispor os rejeitos obtidos pelos processos minerários, alguns mais comuns e outros nem tanto. Cada um deles possui suas características, o que faz de uma alternativa mais adequada para um determinado empreendimento que a outra, bem como os riscos ambientais e sociais associados. Além disso, existem as possíveis utilizações futuras desse material e o custo dessa operação. A seguir, ressaltam-se algumas dessas maneiras.

### **2.1.1 Barragens de rejeito**

A disposição de rejeitos em reservatórios contidos por barramentos, as chamadas barragens de rejeito, é a maneira mais utilizada até os dias de hoje. Essas barragens podem ser construídas utilizando-se solos obtidos próximo ao local de construção, e nesse caso são classificadas como barragens convencionais (IBRAM, 2016). IBRAM (2016) dizem que elas podem ser erguidas utilizando até mesmo o próprio rejeito decorrente do processo minerário, adquirindo a classificação de barragens de contenção alteadas com rejeitos.

As barragens de contenção de rejeitos são estruturas construídas gradativamente ao longo do tempo, com o objetivo de redução de custos com o destino do rejeito, obtidas através de alteamentos consecutivos dessa estrutura (IBRAM, 2016). Assim, constrói-se um dique de partida e a barragem passa por alteamentos até que seja finalizada a sua construção, comportando em cada uma das etapas um volume maior de material no seu reservatório.

Conforme os exemplos a seguir, o alteamento pode ser feito utilizando a técnica a montante (Figura 1), jusante (Figura 2), por linha de centro (Figura 3) ou também pela associação de mais de um deles.



Figura 1: Modelo clássico do método de alteamento a montante. Inicia-se a construção por um dique de partida e a barragem passa por sucessivos alteamentos ao longo de sua vida útil no sentido de montante, sobre o rejeito anteriormente depositado.

Fonte: IBRAM (2016).

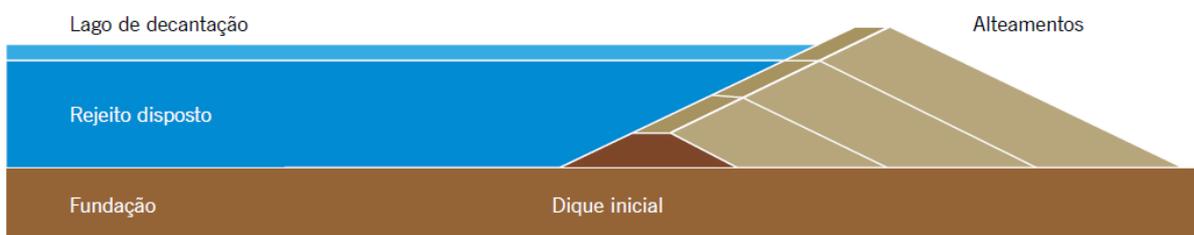


Figura 2: Modelo clássico do método de alteamento a jusante. Inicia-se a construção por um dique de partida e a barragem passa por sucessivos alteamentos ao longo de sua vida útil no sentido de jusante, sendo necessária uma maior área nessa região, bem como, um maior volume de material.

Fonte: IBRAM (2016).

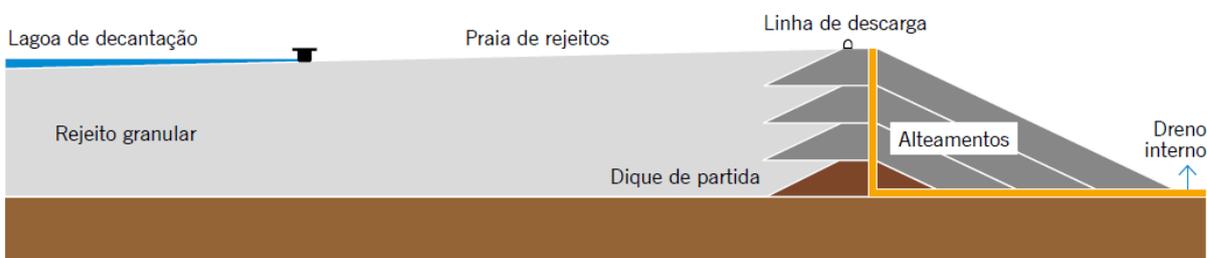


Figura 3: Modelo clássico do método de alteamento por linha de centro. Inicia-se a construção por um dique de partida e a barragem passa por sucessivos alteamentos ao longo de sua vida útil seguindo o eixo central do dique de partida, recebendo materiais tanto na região de montante quanto na de jusante.

Fonte: IBRAM (2016).

### 2.1.2 Empilhamento drenado

Neste método, adota-se uma estrutura em que ela funcionará de maneira drenante, possibilitando-se a passagem da água de maneira estritamente gravitacional e subvertical no interior do material (OLIVEIRA-FILHO, 2017). Segundo

Oliveira-Filho (2017), o empilhamento drenado libera a água através de um sistema de drenagem interna à estrutura, com grande capacidade de vazão e, portanto, esse método não é adequado a rejeitos finos, mas pode ser bastante interessante no caso de rejeitos arenosos.

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015), no presente método, os rejeitos são depositados em forma de pilha sob locais de meia encosta, como mostra a Figura 4, ou em vales confinados que possuam certo tipo de sistema de drenagem interna, em geral, na fundação do reservatório. A drenagem de fundo permite o fluxo hídrico no interior do reservatório e o resultado é um depósito praticamente livre do acúmulo de poropressões o que resulta em uma maior estabilidade para os taludes do empilhamento (OLIVEIRA-FILHO & ABRÃO, 2015).

Uma característica interessante desse método é a possibilidade de utilização do próprio rejeito na elevação da estrutura, que é comumente realizada pelo método de alteamento a montante (OLIVEIRA-FILHO & ABRÃO, 2015).



Figura 4: Estrutura de empilhamento drenado.  
Fonte: IBRAM (2016).

### 2.1.3 Preenchimento de cavas desativadas

O método de disposição em cavas, também conhecido como “disposição em pit”, baseia-se no lançamento do rejeito em cavas exauridas ou em cavas que ainda estão em atividade, não sendo necessária a construção de nenhuma estrutura para contê-los, pois a cava o comportará em seu interior (ERAZO LOZANO, 2006) e (PORTES, 2013). Ritcey (1989) descreve que esse tipo de disposição possibilita boa estabilidade e drenagem, além de uma mínima poluição do ar.

As principais vantagens desse método, segundo Portes (2013), dizem respeito a possibilidade de recuperação de áreas já lavradas, ao mesmo tempo em que ocorre o processo de extração do material. O autor também cita a redução do impacto ambiental e visual, pois de certa maneira, há a “recuperação” da área anteriormente degradada, conforme é mostrado a seguir nas Figuras Figura 5 e Figura 6.



Figura 5: Extração de argila.  
Fonte: BITAR (1997).



Figura 6: Cava resultante do processo de extração de argila, parcialmente preenchida com material estéril e posteriormente completada com solo superficial e areia por meio de aterro hidráulico.

Fonte: BITAR (1997).

As principais desvantagens se dão pela logística de extração do material devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava, o pouco volume disponível para disposição de rejeitos dado o grande volume ocupado pela estrutura de contenção, como também os problemas de percolação e estabilidade (VICK, 1983).

## **2.2 Disposição a Seco (dry stack)**

A filtragem é um processo que pode ser aplicado ao rejeito, que consiste na separação dos sólidos e dos líquidos e é feita através de um meio filtrante onde o rejeito, em formato de polpa, é forçado a passar pressionado por esse meio, que por sua vez, retém as partículas sólidas e possibilita a passagem do líquido (PORTES, 2013).

Os rejeitos podem ser filtrados a seco ou a úmido e dessa forma adquirirão diferentes saturações. O primeiro é detentor de um grau de saturação que gira em

torno de 70 a 85%, já o segundo, como o próprio nome sugere, adquire grau de saturação próximo de 100% (PORTES, 2013).

De acordo com Oliveira-Filho e Abrão (2015), os rejeitos são espessados até determinada consistência, por meio dos espessadores, e, após isso, são filtrados utilizando-se filtros a vácuo ou de pressão positiva. Por esse meio, a água derivada das etapas de espessamento e filtragem pode ser reutilizada nos demais processos minerários. O teor de umidade do produto da filtragem, que recebe o nome de torta filtrante (filter cake), é um dos fatores principais para o manejo futuro desse material (OLIVEIRA-FILHO & ABRÃO, 2015).

Segundo Guimarães (2011), a aplicação de força é necessária para que a filtragem ocorra e essa pode ser obtida de diversas maneiras, como por exemplo a gravidade, o vácuo, a centrifugação ou a pressão. No processo de obtenção de minério de ferro, o mais comum é a utilização de filtros que operem a vácuo, sendo esses filtros convencionais e filtros horizontais de correia, como o exemplo da Figura 7, mas também são encontrados outros tipos de filtros, como é o caso dos filtros de pressão (GUIMARÃES, 2011).

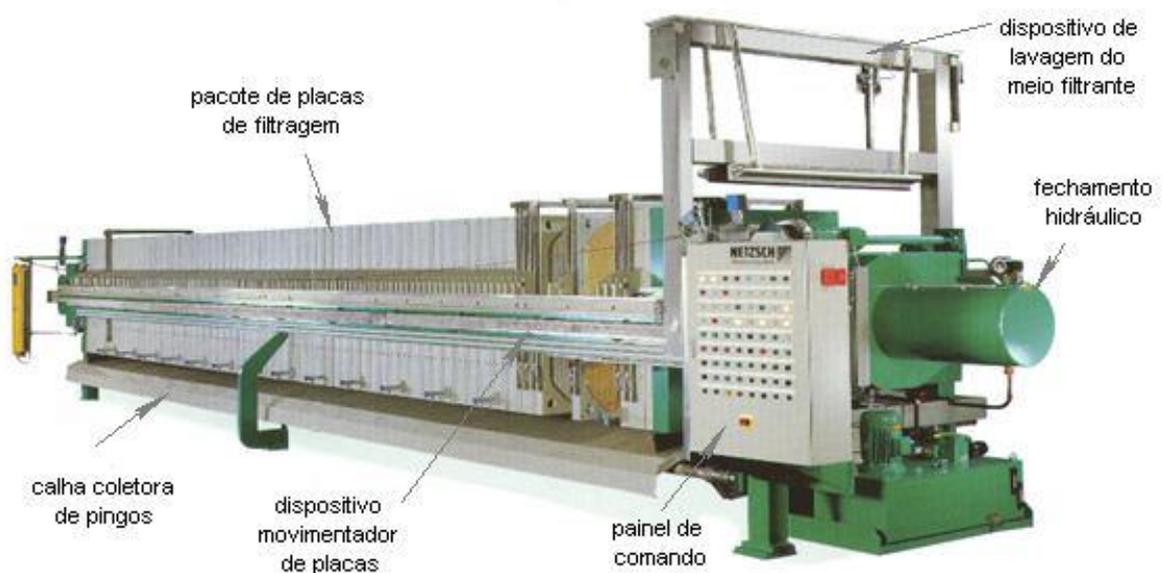


Figura 7: Exemplo de filtro-prensa horizontal. É possível observar as placas por onde o rejeito é filtrado, alinhadas de modo vertical e paralelas entre si.

Fonte: NETZSCH (Modificado).

Segundo Alves (2020), o filtro prensa é formado por várias placas que, reunidas, formam câmaras entre outras placas vizinhas e a superfície de cada uma dessas placas recebe um revestimento de tecido filtrante. As placas são agrupadas e prensadas a partir da ação de pistões, enquanto a polpa de rejeito é bombeada sob alta pressão para o interior das câmaras (ALVES et al., 2020).

O rejeito em forma de polpa que está entre as placas é forçado entre elas e assim, o fluido filtrado atravessa o tecido filtrante, fluindo através dos poros por meio da gravidade, localizado na base de cada placa, e, após, esse líquido é recolhido por meio de canaletas (ALVES, 2020). De acordo com Alves (2020), o material sólido fica retido no tecido, formando as tortas, e é descarregado após esse processo, realizado a partir da separação entre as placas. A Figura 8 exemplifica as camadas de um filtro-prensa horizontal.

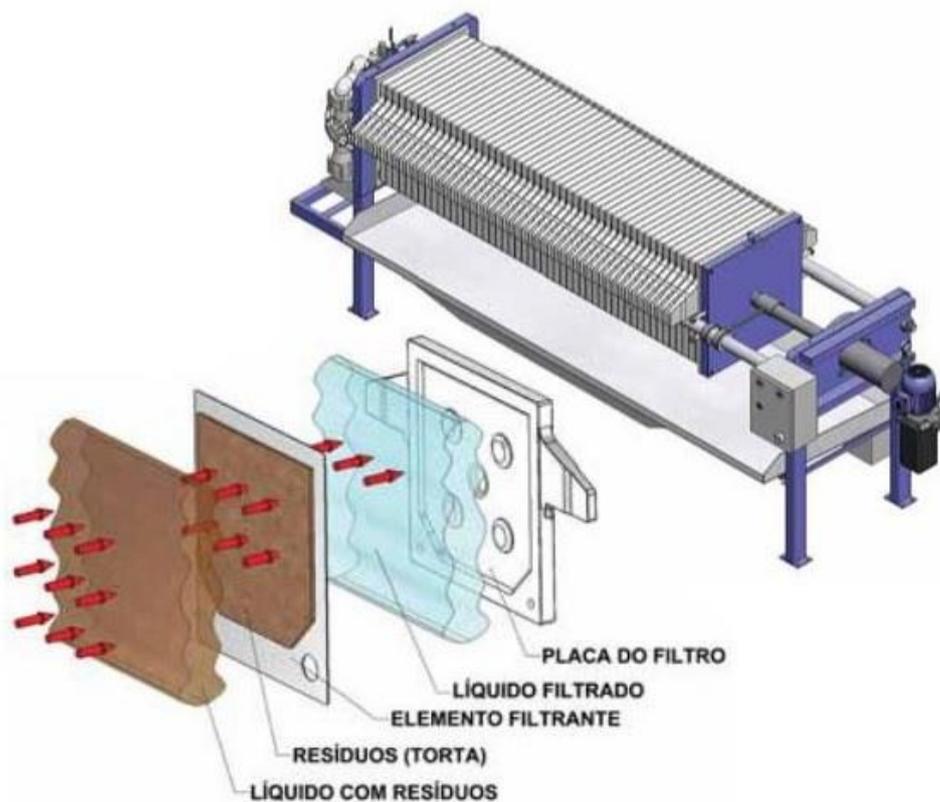


Figura 8: Esquema simplificado de filtro-prensa. A figura divide em partes o processo que ocorre em cada uma das placas pertencentes ao filtro. Acompanhando as setas vermelhas, da esquerda para a direita, percebe-se que o material sólido fica retido no tecido filtrante, mas a água o transpassa, sendo posteriormente retirada.

Fonte: BOMAX (2014) (Modificado).

De acordo com Davies (2011) o método de filtragem de rejeito produz um material com um teor de umidade pré-determinado assim que ele deixa a planta de filtragem, o que permite seu transporte, e, posteriormente, sua deposição e compactação. Filtrados, os rejeitos mais secos são transportados em caminhões ou em transportadoras de correias até o local de disposição final, onde esses são lançados, espalhados e compactados em camadas ou dispostos em formas de pilhas (GOMES, 2009).

Em geral, após a deposição e compactação do material, esse se transforma em uma estrutura autoportante, não necessitando de contenção para a pilha formada, apesar que, em alguns casos, pode ser necessária a construção de uma estrutura de

pequeno porte no perímetro da pilha, que dependerá das características de umidade e plasticidade de depósito (DAVIES, 2011), para retenção de fluidos superficiais.

Segundo Oliveira-Filho e Abrão (2015) e Peixoto (2012), após o transporte e descarga do material no local, esse é espalhado e compactado com o auxílio de equipamentos próprios para terraplanagem até atingir a obtenção dos parâmetros necessários. Esse método proporciona várias configurações geométricas para os depósitos de rejeito filtrado, a depender do terreno onde serão depositados, podendo ser em forma de pilha ou aterro, em uma encosta ou um vale (OLIVEIRA-FILHO & ABRÃO, 2015) e (PEIXOTO, 2012).

O rejeito filtrado, em geral, apresenta umidade pouco abaixo da condição saturada, não devendo apresentar-se muito úmido nem muito seco (DAVIES, 2011). Conforme apresentado por Davies (2011), o teor de umidade deve ter valor que permita a compactação e a integridade estrutural da pilha, além de proporcionar ganhos no que diz respeito à gestão da água.

A recuperação da água do processo da planta de beneficiamento é um dos grandes benefícios da filtragem de rejeito, podendo ser reutilizada para outros fins (GUIMARÃES et al., 2012) e (MINING MAGAZINE, 2017). Guimarães et al. (2012) e Crystal et al. (2018), nos mostram que a filtragem de rejeitos é uma prática usual nas minerações localizadas em regiões de clima árido e, que essa prática objetiva reduzir as perdas de água, devido à escassez desse elemento nessas regiões que também são marcadas pela alta evaporação, o que aumenta a possibilidade de que a pilha permaneça não saturada, favorecendo, assim, a estabilidade dela.

O método de filtragem também pode ser aplicado com sucesso em locais onde há grande ocorrência de atividade sísmica, onde o método convencional pode ser contraindicado (DAVIES, 2011). Segundo Davies (2011), regiões de clima muito frio onde o manejo de águas não é simples e locais onde a topografia inviabiliza as construções de barragens, também são possíveis para a aplicação do referido método.

Davies (2011) cita ainda questões sociais e de legislação que podem limitar a implantação de estruturas convencionais de contenção de rejeito, fazendo com que o

método de disposição de rejeito filtrado também possa ser indicado. Exemplos dessas situações seriam, portanto, locais onde existam grandes dificuldades de se obter licença ambiental para construção de barragens; locais onde ocorra intensa pressão social contra a construção de barragens; empreendimentos próximos a cidades, comunidades, tribos etc. (DAVIES, 2011).

### **2.2.1 Influência do clima**

De acordo com SLR Consulting (2016), pode-se dizer que locais que possuem alta média de precipitação anual encontram dificuldades na aplicação do método de deposição de rejeitos filtrados. A frequente ocorrência de chuvas faz com que o material aumente consideravelmente sua umidade e ao mesmo tempo dificulte a trafegabilidade das vias e da pilha de rejeitos, além de fazer com que o sistema de drenagem necessite de maior robustez (SLR, 2016).

Os estudos de Mend (2017) apontam que, a aplicação do método tem sido aplicada com sucesso em minas com produção de rejeito inferior a 50 mil toneladas diárias e em locais de alta taxa anual de evaporação e/ou baixa média de precipitação anual, conforme é possível observar na Figura 9 abaixo.

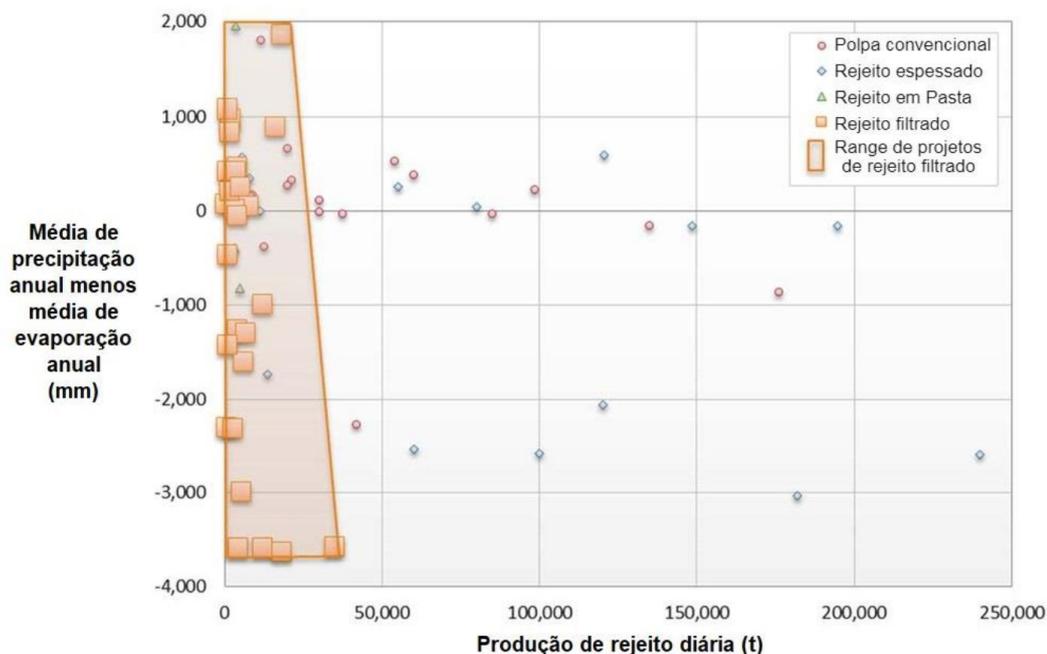


Figura 9: Range de aplicação do método de disposição de rejeito filtrado para diferentes minas estudadas. A região contendo os pontos das minas que aplicam o método de disposição de rejeito filtrado se encontra em destaque, a esquerda da figura.

Fonte: MEND (2017).

### 2.2.2 Drenabilidade

Crystal et al. (2018) afirmam que quase todo rejeito é filtrável, pois são raros os casos em que esses apresentam gipsita (gesso) em quantidades significantes que impeçam sua filtragem. Quantidades significantes das frações silte e argila reduzem a drenabilidade do rejeito, os tempos de ciclo do processo de filtragem, aumenta a possibilidade de colmatação do filtro e dificultam na obtenção do teor de umidade necessário (CRYSTAL et al., 2018).

Ainda segundo Crystal et al. (2018), é de extrema importância para a disposição de rejeito filtrado avaliar antecipadamente o potencial de variabilidade da distribuição granulométrica do rejeito a ser trabalhado e da sua porcentagem de sólidos em massa da alimentação do filtro durante a vida útil da mina. A taxa de filtragem cresce com a redução do ciclo de filtragem, todavia, deve-se levar em conta que a redução do tempo

de cada ciclo poderá resultar em uma torta filtrada, mas com teor de umidade acima do requerido ou então, na obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a sua retirada (GUIMARÃES, 2011).

O aumento da temperatura da polpa pode favorecer na retirada de água do material, pois ocorre uma redução da viscosidade do filtrado (GUIMARÃES, 2011). Porém, ainda de acordo com Guimarães (2011), é possível realizar o aumento da temperatura por meio da aplicação de vapor superaquecido, mas essa atividade é demasiadamente dispendiosa e não é comum em operações industriais.

Guimarães (2011) salienta que, polpas com concentração de sólidos mais elevada favorecem a filtração e a maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima no material a ser utilizado para garantir o desempenho esperado. Assim, é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtração (GUIMARÃES, 2011).

Segundo Guimarães (2011), rejeitos que apresentam distribuição granulométrica mais grosseira formam tortas com maiores interstícios e, portanto, o líquido atravessa com maior facilidade, o que favorece o tempo de filtração e reduz a umidade da torta. As lamas podem apresentar um efeito negativo no processo de filtração e entupir o meio filtrante e por essa razão, algumas vezes são adicionados floculantes nos tanques com o intuito de reduzir esse efeito e aumentar a taxa de filtração (GUIMARÃES, 2011).

Davies (2011) e Williams et al. (2017) afirmam que as variações mineralógicas e granulométricas que poderão ser encontradas durante a vida útil da mina podem ser analisadas ainda na fase de projeto e que cada tipo de rejeito apresenta um comportamento único durante o processo de filtração. Esse processo deverá ser capaz de lidar com mudanças futuras nas características do rejeito, a partir de ações com mínimo impacto nos custos (DAVIES, 2011).

Crystal et al. (2018) definem que, o material que detenha teor de umidade acima de 18% está fora das especificações, dependendo da umidade alvo da planta de filtração. De modo a atingir uma maior flexibilidade na operação e poder ainda assim, trabalhar com esse tipo de material, é recomendado a existência de uma empilhadeira

radial e uma grande área que permita a estocagem temporária, em torno de 8 (oito) a 10 (dez) dias, para secagem por evaporação de parte da umidade presente nessa classe de material (CRYSTAL et al., 2018).

Para minimizar a infiltração de água na pilha, os autores citam a necessidade de bermas de segurança com pontos para drenagem, além de superfície de topo em desnível suficiente para evitar empoçamento, mesmo em locais de clima árido (CRYSTAL et al., 2018). Davies (2011) afirma a necessidade de dois sistemas de drenagem: um para impedir que ocorra contato da água do entorno com a pilha de rejeitos filtrados e outro para coletar a água da própria pilha, com o intuito de evitar a problemas relacionados ao aumento da poropressão e à erosão da pilha de rejeitos filtrados.

### **2.2.3 Transporte e disposição**

Segundo Chrystal et al. (2018), o transporte do material filtrado pode ser realizado por caminhões ou por correia transportadora, sendo decidido entre um ou outro, frequentemente, por aspectos econômicos. O transporte de rejeito filtrado feito por caminhões tende a ser economicamente viável quando a produção diária não ultrapassa 10 mil toneladas (CRYSTAL et al., 2018).

Outra questão a ser analisada na escolha de caminhões para transportar os rejeitos filtrados é a trafegabilidade, visto que o material filtrado geralmente se encontra com umidade próxima a ótima para a compactação, e, em períodos chuvosos, o aumento da umidade do material já depositado pode dificultar ou impossibilitar a trafegabilidade de caminhões sobre o aterro (DAVIES, 2011). Ainda segundo Davies (2011), o grau de compactação necessário para garantir o tráfego eficiente de caminhões é constantemente maior que o necessário para atingir a estabilidade geotécnica do aterro.

Para Crystal et al. (2018), uma das opções mais comuns é a disposição de finas camadas de rejeito filtrado, o que permite a evaporação pela ação de ventos e da radiação solar, o que faz aumentar a densidade e compactação do material, conseqüente, ocorre o aumento da estabilidade física do aterro. É preferível realizar essa prática associada a filtragem de rejeitos mais finos separadamente, o que pode

representar uma diminuição nos custos de operação (CRYSTAL et al., 2018). Conforme Chrystal et al. (2018), a classe de rejeitos mais fina e desafiadora apresentará torta filtrante com maior umidade e, portanto, os autores sugerem a disposição desse tipo de material em zonas não estruturais do depósito final.

A zona estrutural é uma região mais externa do depósito e é onde o material que atende a critérios mais rigorosos é depositado e tratado, principalmente o que tange sua umidade e compactação (CRYSTAL et al., 2018). Já a classe de rejeito filtrado fora dessas especificações é destinada à zona não-estrutural, localizada numa porção mais interna do depósito, como mostra a Figura 10 abaixo.

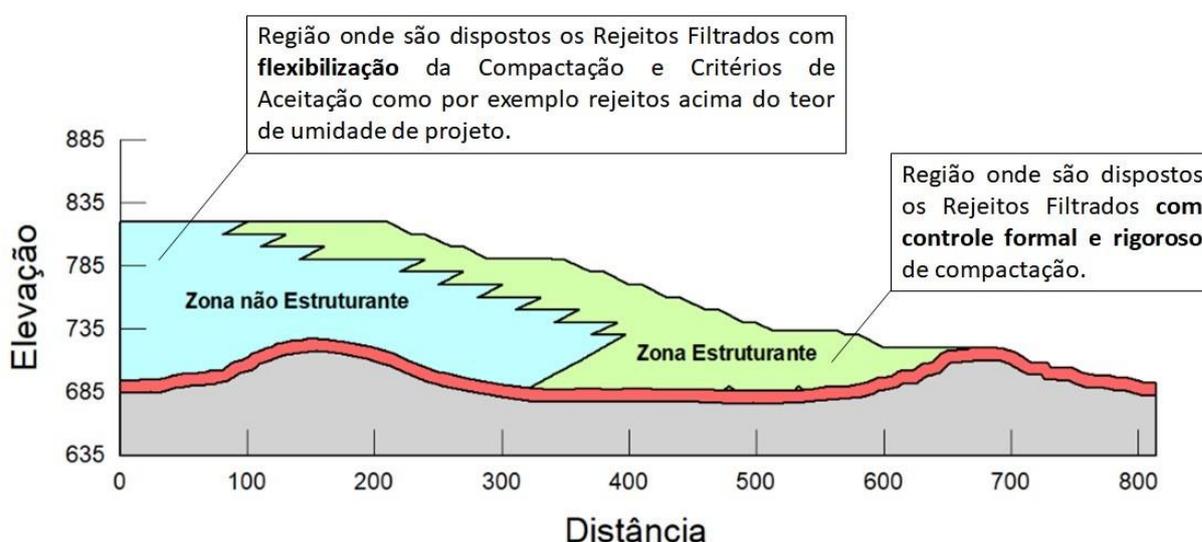


Figura 10: Zona não estruturante e estruturante em pilhas de rejeito filtrado.

Fonte: INSTITUTO MINERE (2021).

Davies (2011) e Oliveira-Filho e Abrão (2015) destacam que uma prática indicada a locais com a estação chuvosa bem definida consiste em dispor os rejeitos na parte mais externa durante a estação seca, realizando a compactação desse material de acordo com as especificações de aterros similares à construção de uma estrutura de contenção. Dessa forma, os rejeitos pertencentes à zona estrutural, terão a função como a de espaldares para a contenção dos rejeitos filtrados que serão depositados na zona não-estrutural do depósito, durante a estação chuvosa, e esse material poderá ser simplesmente lançado e/ou espalhado, ou apenas ligeiramente

compactado na porção mais interna da pilha de rejeitos filtrados (DAVIES, 2011) e (OLIVEIRA-FILHO & ABRÃO, 2015).

#### **2.2.4 Aspectos econômicos**

A disposição de rejeitos filtrados vem provando ser uma alternativa bastante interessante para o manejo e disposição de rejeitos de mineração, inclusive para taxas de produção de rejeito superiores a 30 mil toneladas por dia (CRYSTAL et al., 2018). De acordo com Crystal et al. (2018), os desenvolvedores têm procurado aumentar o tamanho das placas (de 2x2m a 5x5m) e reduzir os custos operacionais, utilizando meios filtrantes mais duráveis e em processos mais eficientes.

Fatores como a distância média de transporte, a locação, a compactação e a necessidade de remanejamento de materiais aumentam muito o custo unitário desse método em comparação ao método convencional (CRYSTAL et al., 2018). Gomes et al. (2016) afirmam que o investimento necessário para a implantação de uma planta de filtração pode ser inferior ao investimento empregado para a disposição convencional de rejeitos.

Segundo Alves (2020), hoje no país, as empresas detentoras das informações relacionadas ao método de disposição de rejeito filtrado não as divulgam, mesmo que o objetivo seja direcionado às pesquisas para a melhoria do próprio método. Somado a isso, existe a grande faixa de variação de custos de operação, o que torna difícil a definição dos custos praticados nesse método em comparação com os demais (ALVES, 2020).

Carneiro e Fourie (2018) afirmam que o custo de uma planta de filtração pode ser até 17 vezes maior que o custo de uma planta de espessamento convencional e 10 vezes mais cara que uma planta para rejeitos espessados. Por outro lado, o custo unitário do rejeito filtrado tende a ser reduzido à medida em que a filtração se tornar cada vez mais tecnológica (CARNEIRO & FOURIE, 2018).

Segundo Davies (2011) uma grande vantagem da disposição de rejeito filtrado é a possibilidade de recuperação da área onde o rejeito é disposto. Essa recuperação muitas vezes é realizada com o uso de coberturas temporárias e pela revegetação da

superfícies da pilha, o que minimiza bastante a erosão por intemperismo (DAVIES, 2011).

Ainda segundo Davies (2011), o método de disposição de rejeito filtrado deve ser visto como uma alternativa possível e não como uma solução universal para os desafios encontrados com o manejo e destino do rejeito de mineração.

### **2.3 Teoria geral da compactação**

De acordo com Fernandes (2016), compactação é o processo em que uma determinada amostra de solo formada por partículas sólidas, água e ar sofre uma redução no volume de ar após a aplicação de um determinado carregamento. O teor em água, que pode ser expresso pela razão do peso da água sobre o peso das partículas sólidas, é normalmente o mesmo para uma massa de solo revolvida e a mesma massa num estado mais denso já compactado, ou seja, não há perda de água no processo (FERNANDES, 2016). Ainda segundo Fernandes (2016), a compactação aumenta a resistência ao cisalhamento do solo, cuja deficiência é uma das causas principais de ruptura, além de promover uma redução da deformação, o que consequentemente, reduz a permeabilidade desse.

Segundo Sousa Pinto (2006) essa técnica pode ser utilizada em diversos tipos e finalidades de obras de engenharia, como por exemplo, os aterros, as camadas de pavimentação, a construção de barragens de terra, dentre outros.

O engenheiro Ralph Proctor, em 1933, foi o primeiro a desenvolver essa técnica de compactação. Em seus estudos, concluiu que o tipo de solo, o teor de umidade e o esforço de compactação são fatores de fundamental importância para se obter a devida compactação de uma obra de engenharia, que visa atingir uma determinada resistência.

#### **2.3.1 Esforço de compactação**

Para se compactar um solo, geralmente utiliza-se vibração, impacto, amassamento ou pressão. Esses podem ser encontrados nos dois principais tipos de esforço de compactação, sendo essas a compactação estática e a compactação vibratória.

A força estática é apenas o próprio peso da máquina aplicado à superfície do solo, que inevitavelmente sempre estará presente quando se usa os maquinários mesmo sendo de pequeno porte. A maneira mais simples de modificar a força efetiva de compactação é a adição ou subtração do peso do maquinário. Esse modelo é aplicável basicamente às camadas superiores do solo e é desconsiderada determinada profundidade.

Os compactadores também podem produzir uma sucessão rápida de impactos, afetando assim, as camadas superficiais, mas também as camadas mais profundas, porém em um menor grau de compactação. A vibração se transmite pelas partículas sólidas, de modo a colocá-las em movimento e rearranjá-las entre si. Esse movimento é facilitado pela água existente entre cada uma das partículas, que funciona como um “lubrificante” para que elas se movimentem.

A compactação de um solo consiste, basicamente, na redução do seu índice de vazios, através da ação de uma força mecânica, que por sua vez, está associada à ocorrência de variação na fase gasosa do solo (CRISPIM, 2007). Para Neves (2017), a compactação tem por objetivo aumentar o contato entre os grãos e tornar o aterro mais homogêneo, o que promove a melhoria das características mecânicas do solo, como a redução da deformabilidade, da permeabilidade e o aumento da resistência ao cisalhamento. Para tanto, faz-se necessário o conhecimento da redução do índice de vazios para cada caso e qual a melhor maneira de se obter em campo.

De acordo com Pinto (2006), a compactação se dá pela expulsão do ar dos vazios do solo, onde as quantidades de água e as partículas de solo se mantêm. Quando se compacta o solo com baixa umidade, o atrito entre as partículas do solo é muito alto o que torna difícil a redução significativa dos vazios (PINTO, 2006).

Ainda segundo Pinto (2006), no caso de umidades um pouco mais elevadas, a água provoca um efeito de lubrificação entre as partículas do solo, fazendo-as movimentarem entre si, rearranjando-se em de forma mais compacta, mas com o aumento gradativo dessa umidade, a compactação se torna prejudicada, pois o grau de saturação está mais elevado, o que deixa o ar preso e dificulta a sua saída. Sendo assim, existe uma determinada energia de compactação aplicada, um teor de umidade

que é denominado umidade ótima ( $h_{ót}$ ) e que conduz a um peso específico seco máximo do solo ( $\gamma_{dmáx}$ ), conforme apresentado a seguir na Figura 11 (PINTO, 2006).

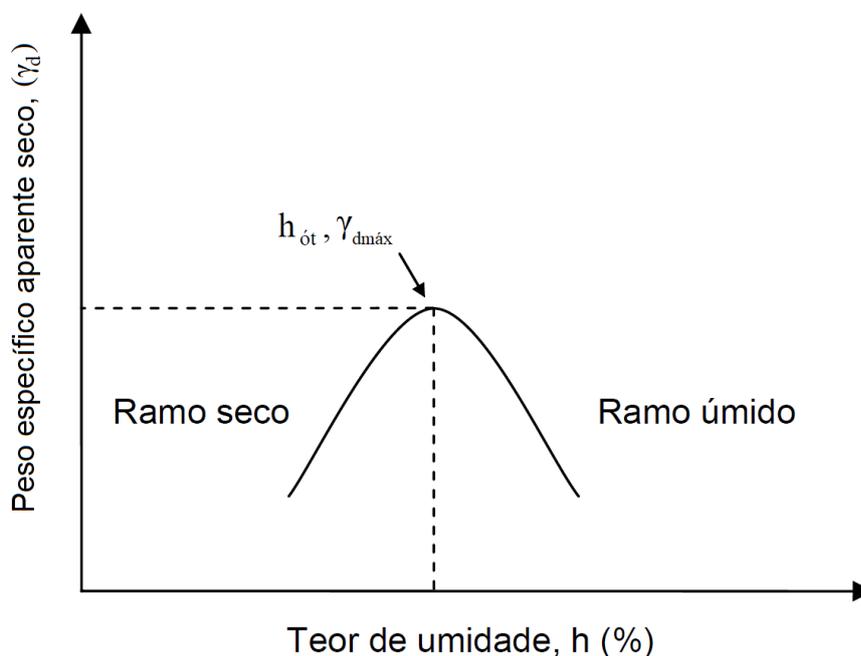


Figura 11: Aspecto da curva de compactação do solo.  
Fonte: CRISPIM (2007) (Modificado).

Toda energia aplicada ao material a ser compactado é direcionada para reduzir o volume total desse material ou em induzir deformações angulares à sua estrutura (NEVES, 2017). Assim, Neves (2017) afirma que, após atingir a densidade máxima desejada para um teor de umidade e energia de compactação, qualquer energia adicional será convertida apenas para deformar a estrutura do material, o que torna sua estrutura cada vez mais alinhada.

Quando se aplica diferentes energias de compactação em um mesmo material, observa-se que, ao aumentar a energia, diminui-se o teor de umidade ótima e ocorre um aumento da densidade aparente seca máxima, como pode ser visualizado na Figura 12. A estrutura do material obtida com a compactação depende da umidade do solo e da energia aplicada, como ilustrado na Figura 13. Quando o solo é compactado em umidade baixa, ou seja, no ramo seco da curva de compactação, a atração das partículas não é vencida e esse fica com a estrutura denominada floculada. Para umidades maiores, já nesse caso, no ramo úmido da curva de compactação, a

compactação orienta as partículas, alinhando-as paralelamente, em uma estrutura denominada dispersa. Para a mesma umidade, quanto maior for a energia de compactação, maior será o grau de dispersão.

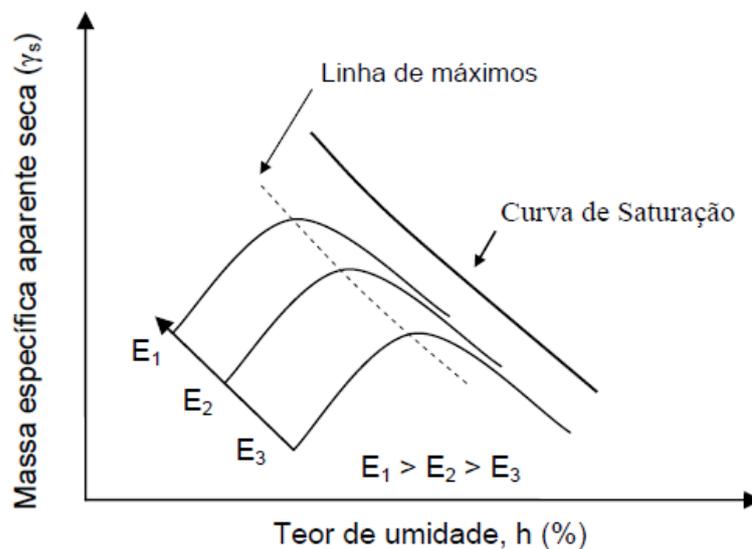


Figura 12: Influência da energia de compactação de um mesmo solo.

Fonte: DNIT (2006) (Modificado).

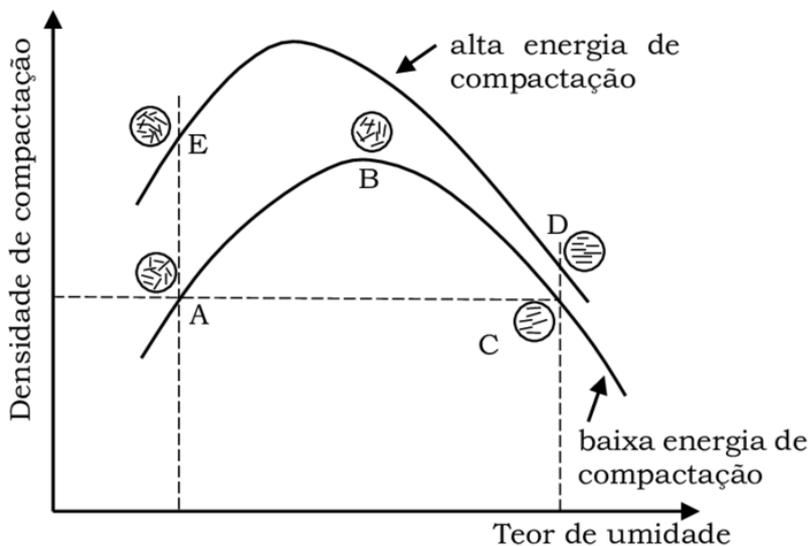


Figura 13: Estrutura de solos compactados.

Fonte: LAMBE (1958) (Modificado).

Em campo, os ensaios mais utilizados na compactação são os métodos “Speedy” (DNER, 1994) e o “método da frigideira” (ABNT, 16097), utilizados para a determinação do teor de umidade. Já os métodos conhecidos como “frasco de areia” (ABNT, 1986) e de Hilf (ABNT, 1991), são comumente empregados para a determinação da massa específica do material.

## **2.4 Equipamentos Utilizados na Compactação**

O nível de compactação desejado pode ser alcançado pela combinação do tipo de solo com o método de compactação adequado para tal. Outros fatores devem ser considerados, tais como as especificações de compactação e condições “in situ”, bem como os equipamentos mais empregados para uma determinada situação.

A terraplenagem, por sua diversificação, natureza e os quantitativos envolvidos requerem um processo executivo mecânico, que envolve uma gama complexa e diversificada de equipamentos pesados (DNIT, 2010). Conforme é descrito nas informações do DNIT (2010), a execução de uma obra que compreende, geralmente, vários itens-serviços, demanda a utilização conjugada de diversos recursos mecânicos, cujo conjunto constitui a patrulha de equipamentos, dimensionada para atender à produção do cronograma de obras.

Diante disso, alguns equipamentos importantes para o processo de terraplenagem e compactação de aterros serão apresentados a seguir.

### **2.4.1 Unidades escavo-empurradoras**

O trator de lâmina ou de pneus, pode receber uma determinada adaptação que o transforma numa unidade capaz de escavar e empurrar a terra, e, por isso, recebe o nome de escavo-empurradora (DNIT, 2010). Esse implemento é denominado lâmina e o equipamento passa a chamar-se trator de lâmina ou “bulldozer”.

Já os tratores de esteiras são equipamentos destinados à escavação de solos, equipados com lâminas ou com placas de empuxo para operação de “pusher” em motoscrapers (DNIT, 2010). Em alguns casos, esses são equipados com escarificadores, que visam facilitar o trabalho de escavação quando o solo é duro.



Figura 14: Trator de esteiras equipado com lâmina.

Fonte: DNIT (2010).

#### **2.4.2 Unidades escavo-carregadoras**

São equipamentos que escavam e carregam o material para outro equipamento, que por sua vez, o transporta até o local da descarga, de modo a completar o ciclo da terraplenagem. As máquinas assim denominadas são representadas pelas carregadeiras, escavadeiras e retroescavadeiras, que, embora de construção bastante diversa, executam as mesmas operações de escavação e carga (DNIT, 2010).

As carregadeiras são denominadas pás-carregadeiras e podem ser montadas sobre esteiras ou rodas com pneumáticos e o mais habitual na terraplenagem, normalmente utilizam-se as carregadeiras com caçamba frontal (DNIT, 2010). Segundo DNIT (2010), os autores informam que as pás-carregadeiras são equipamentos que tanto podem ser montados sobre esteiras como pneus, porém, as máquinas em esteiras têm uma mobilidade mais lenta do que as montadas sobre pneus, mas ambas podem ser utilizadas na operação de carregamento de material solto ou em pequenas escavações em materiais de pouca resistência.

As pás-carregadeiras trabalham com uma caçamba, que apresenta um movimento basculante para frente para encher-se do material e depois descarregá-lo sobre o caminhão basculante, conforme pode-se observar na Figura 15 abaixo.



Figura 15: Pá carregadeira.

Fonte: DNIT (2010).

Outro equipamento muito utilizado são as escavadeiras hidráulicas que são destinados a realizar escavações, assim como carga de materiais nos caminhões basculantes, que podem ser montadas tanto sobre esteiras como pneus (DNIT, 2010). Os autores informam que elas também são utilizadas na abertura de valas; na regularização de rios e canais; no carregamento de materiais soltos; como guindastes; e outras aplicações.

Praticamente podem trabalhar sobre qualquer terreno, mas, em caso de terrenos pouco resistentes, se torna necessária uma preparação nos meios de suporte (DNIT, 2010). As escavadeiras podem ser equipadas com “shovel” (colher), com “drag-line”, com “clamshell” (concha), com equipamento retro, com guindaste, além de outros implementos.

Equipadas com “shovel” elas podem executar os cortes altos, sendo este seu emprego específico em terraplenagem e equipadas com “drag-line”, são comumente utilizadas na dragagem de cursos d’água, lagos e atoleiros, proporcionando raspagem em terras pouco consistentes e escavação em nível inferior ao do equipamento (DNIT, 2010). Quando elas são equipadas com “clamshell” fazem o carregamento de

materiais soltos e equipadas com guindaste levantam pesos, apiloam o solo, fracionam blocos de pedra, cravam estacas etc.



Figura 16: Escavadeira hidráulica de esteira equipada com concha.

Fonte: DNIT (2010).

### **2.4.3 Unidades aplainadoras**

As unidades aplainadoras são especialmente indicadas ao acabamento da terraplenagem, ou seja, as operações destinadas a conformar o terreno aos greides finais de projeto (DNIT, 2010). Esses equipamentos apresentam grande mobilidade da lâmina de corte e uma boa precisão de movimentos, o que viabiliza seu posicionamento em diversas situações.

Os equipamentos destinados à essa função são as motoniveladoras que visam o espalhamento de solos e sua posterior regularização (DNIT, 2010). Segundo os autores, elas trabalham sobre seis rodas, sendo duas dianteiras e quatro traseiras montadas em formato tandem. As rodas dianteiras, além do movimento normal, formam ângulos com a vertical, para ambos os lados, o que facilita a operação.

Na maioria das operações, a lâmina trabalha em posição horizontal ou próxima desta, mas ela possui facilidade de movimentação muito grande e pode ficar em qualquer angulação, inclusive a vertical, do lado de fora da máquina em que essa

versatilidade permite uma série de operações especiais, inclusive a regularização de taludes (DNIT, 2010). Essas unidades também podem ser equipadas com escarificadores, o que facilita o trabalho em solos mais duros.



Figura 17: Motoniveladora realizando espalhamento do solo. É possível perceber, em sua região inferior-central, a lâmina realizando o trabalho.

Fonte: DNIT (2010).

#### **2.4.4 Trator de pneu com grades**

Os tratores de pneu com grade, também chamados de tratores com rodas ou “*girico*”, possuem sua principal utilização no setor agrícola, porém, também podem ser utilizados da mesma maneira no processo de compactação de praças no setor da mineração. Segundo Yamashita (2010), eles caracterizam-se por possuírem, como meio de propulsão, rodas pneumáticas, cujo número e disposição podem variar, recebendo duas, três ou quatro rodas.



Figura 18: Trator agrícola de pneu com grade, também conhecido como “*girico*”, realizando a escarificação de um solo para recebimento da próxima camada de compactação.

Fonte: Grupo SCHUNCK (2021).

#### **2.4.5 Unidades de transporte**

As unidades transportadoras são utilizadas na terraplenagem quando é preciso levar o material a grandes distâncias. Conforme DNIT (2010), nesse caso, deve-se optar pelo uso de equipamentos mais rápidos, de baixo custo, que consigam atingir maior produção, mesmo que com o emprego de número elevado de unidades.

##### **2.4.5.1 Caminhões basculantes**

São equipamentos direcionados para o transporte de solos e rochas. Quando não se dispuser de caçambas próprias para se transportar determinadas rochas, as caçambas comuns devem ser reforçadas internamente para evitar o contato direto do material com a chapa do fundo a fim de se evitar eventuais danos ao equipamento (DNIT, 2010).

Os caminhões basculantes são usados com maior eficiência quando as distâncias de transporte são grandes, ou seja, quando são superiores a 1 km, preferencialmente

superiores a 5 km (DNIT, 2010). De acordo com os autores, geralmente são alimentados por carregadeiras mecânicas ou escavadeiras e sua descarga é realizada de maneira automática pela parte traseira da caçamba, mediante a elevação de sua parte dianteira, efetuada por um sistema hidráulico.



Figura 19: Caminhão basculante.

Fonte: DNIT (2010).

#### 2.4.5.2 Caminhões irrigadeira ou pipa

São comumente usados no umedecimento dos solos, que por meio desse, visa sua melhor compactação (DNIT, 2010). Assim, a liberação da água é feita através de um registro localizado na parte traseira do equipamento para abrir e fechar a passagem d'água.



Figura 20: Caminhão pipa.

Fonte: DNIT (2010).

#### **2.4.6 Unidades compactadoras**

São unidades que se destinam a executar o processo mecânico de adensamento dos solos, que resulta em um volume de vazios menor (DNIT, 2010). As características desses materiais são bastante variáveis e, portanto, os compactadores apresentam diferenças entre si, para adequar às exigências da compactação de cada tipo de material.

Dentre os compactadores, os mais comuns são os rolos pé de carneiro, os rolos de pneus e os rolos lisos, sendo que, os compactadores dos tipos pé de carneiro e de rolos lisos podem ser estáticos ou vibratórios (DNIT, 2010). Já os rolos de pneus, conforme é listado pelos autores do DNIT (2010), podem ser de pressão constante ou de pressão variável.

##### **2.4.6.1 Rolo pé-de-carneiro**

Um dos mais antigos equipamentos já empregados na compactação dos aterros é o rolo de pé de carneiro, de concepção das mais simples, mas, que permite alcançar boa compactação em grande parte dos solos em que é empregado. Ele é composto por um tambor oco, no qual estão presentes saliências de comprimentos de 20 a 25 cm, denominadas “patas”, e que ficam em fileiras desencontradas (DNIT, 2010).

As patas penetram-se na camada solta do solo e executam a compactação do fundo para o topo da camada, até chegar ao ponto que, completado o adensamento, as patas não penetrem mais. A energia de compactação é obtida pela pressão de contato de uma fileira de patas, pois, ao fim da compactação, o peso total do equipamento se distribui sobre essa fileira. Há, pois, o efeito de punção das patas ao penetrar na camada de solo (DNIT, 2010).



Figura 21: Rolo compactador pé-de-carneiro.

Fonte: DNIT (2010).

#### 2.4.6.2 Rolo liso – Estático e Vibratório

Os compactadores de rolo liso são equipamentos que podem ser divididos em duas categorias: estáticos e vibratórios. Eles são ideais para solo como também para asfalto. Esse tipo de equipamento utiliza tanto seu peso próprio para obter a compactação quanto a vibração ou, em alguns casos, a associação das duas formas.

Os rolos lisos também são bastante utilizados para dar acabamento nas superfícies das camadas compactadas (selagem), que serão posteriormente escarificadas se forem receber camadas subsequentes.

Para os solos não coesivos, ou seja, aqueles que disponham de baixas porcentagens de argila e que em geral predominam a fração arenosa, os rolos pé-de-carneiro mostram-se inadequados para efetuar a compactação (DNIT, 2010). Nesses

casos, os autores informam que ele apenas consegue revolver o terreno arenoso, sem proporcionar nenhum adensamento satisfatório.

O princípio de funcionamento de um rolo vibratório baseia-se no acionamento de um peso móvel colocado com excentricidade em relação a um eixo do rolo e gerando vibrações de certa frequência e amplitude, que se propagam pelo tambor até o terreno (DNIT, 2010).

As frequências empregadas variam de 1000 a 4800 ciclos por minuto, sendo comumente mais utilizadas as frequências mais baixas (DNIT, 2010). Segundo os autores, os rolos vibratórios têm maior rendimento a baixas velocidades de deslocamento, já que a compactação é dependente do tempo total em que as oscilações são aplicadas sobre a superfície do material a ser compactado.



Figura 22: Rolo compactador liso vibratório.

Fonte: DNIT (2010).

#### 2.4.6.3 Rolo pneumático

Os rolos pneumáticos são formados por uma plataforma metálica, apoiada em dois eixos com pneumáticos (DNIT, 2010). Estes rolos são equipados com uma grande quantidade de pneus alinhados aos eixos dianteiro e traseiro. A força de compactação é alterada pela adição ou remoção de peso de um lastro, que pode ser obtida por adição de água ou areia.

Normalmente, esses são os equipamentos que atingem uma maior compactação em campo, mas em contrapartida, possuem um valor por hora trabalhada mais

elevada que os outros equipamentos. Essa compactação é feita por pressão e amassamento, principalmente com rolo de acabamento asfáltico. A pressão existente nos pneus é diminuída ou aumentada em algumas máquinas, durante a operação, para ajustar a área de contato com o solo, devido as diferentes condições de trabalho.

Para alcançar uma melhor cobertura do terreno a ser compactado, DNIT (2010) afirmam que as rodas dos eixos são desencontradas, de forma que as rodas do eixo traseiro correm nos espaços deixados pelas dianteiras. Diante disso, encontra-se sempre o emprego de um número ímpar de pneus num eixo e par no outro.

Nesse caso de equipamento, o adensamento dos solos depende da pressão de contato entre os pneus e o terreno. Em geral, quanto maior for a pressão exercida, maior a facilidade na obtenção de densidades elevadas, todavia, limitações são encontradas e em suma, são impostas pela própria resistência da camada (DNIT, 2010).



Figura 23: Rolo compactador pneumático.

Fonte: DNIT (2010).

#### 2.4.6.4 Compactadores manuais

Estes equipamentos são munidos de motores a combustão interna ou ar comprimido e possuem uma placa vibratória ou um soquete, através dos quais se realiza a compactação (DNIT, 2010). Conforme os autores ressaltam, são empregados em pequenas áreas e de difícil acesso de equipamento convencional de maior porte, como é o caso de reaterro de valas e compactação de material nos arredores de dispositivos facilmente danificáveis pelo equipamento, como por exemplo, poços de visita, caixas etc.



Figura 24: Compactador manual.

Fonte: DNIT (2010).

## 2.5 Espessura das camadas

A espessura das camadas do solo é um fator muito importante que afeta o desempenho do maquinário e o custo do processo de compactação, bem como seu resultado no local compactado (SILVA, 2008). Segundo o autor, os equipamentos do tipo vibratório e compactador de percussão, compactam o solo do topo da camada para o fundo, e, por ação e reação, o mesmo ocorre do fundo da camada para o topo.

Conforme relata Silva (2008), se a camada a ser compactada é muito profunda, ou seja, muito espessa, a máquina levará mais tempo para compactar o solo ou não atingirá uma compactação homogênea em profundidade, fazendo com que uma

camada, intermediária ou próxima da camada anterior, não seja compactada como deveria. Com o excesso de compactação, seja por cargas ou excesso de passadas, ou por excesso de umidade do material, eventualmente aparecerão trincas ou rachaduras na superfície, reduzindo a densidade e, além disso, demandará mais tempo tornando a operação mais cara e menos produtiva (SILVA, 2008).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Tendo realizado a revisão de diversas bibliografias que tratam o tema de filtragem de rejeito, focando principalmente na construção de aterros compactados, o trabalho aborda agora alguns problemas práticos do setor de mineração, onde a expertise da engenharia civil pode auxiliar na solução dos problemas relatados em alguns trabalhos. Também será possível analisar seus resultados e compará-los, bem como, apresentar outros possíveis problemas e soluções para os desafios encontrados nessa indústria.

Dentre esses problemas práticos, citam-se dois, sendo cada um detalhado para atingir o objetivo. O primeiro deles diz respeito a “*Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado*” desenvolvido por Neves (2017).

O segundo problema prático está relacionado às “*Diretrizes de projeto de sistema de empilhamento de rejeito de minério de ferro filtrado e compactado – caso estudo: minerita minérios itaúna*” desenvolvido por Silva (2018).

Os estudos de caso são detalhados e apresentados a seguir, deixando-se a análise dos resultados para item 4.

#### 3.1 Primeira Análise – Aterro Com Resíduo Filtrado de Alumina (Lama Vermelha)

No trabalho em questão, Neves (2017) realizou um programa experimental estabelecido com o principal objetivo de analisar o comportamento do resíduo advindo do filtro prensa em condição de aterro compactado. Para tanto, foram consideradas diversas espessuras de camadas em diferentes números de passadas, grau de compactação e umidade.

As principais atividades desenvolvidas por Neves (2017) foram realizadas acompanhando a execução do aterro experimental com resíduo Filtro Prensa do Depósito de Resíduos Sólidos – DRS1 pertencente a Hydro Alunorte - Rodovia - PA - 481- Km 12 – Barcarena – PA.

A realização do aterro experimental se explica pela necessidade de se descobrir o comportamento do resíduo filtrado quando depositado em forma de aterro densificado, além de verificar a trabalhabilidade desse em condições meteorológicas distintas. Além disso, foi importante para definir as características de espessura de camada e o número de passadas requeridas para a melhor compactação.

Também foi importante para avaliar a produtividade e teste de equipamentos de execução dos aterros. Assim, a análise dos resultados serviu para realizar ajustes no processo executivo da disposição do resíduo proveniente de filtro prensa e definição de suas propriedades geomecânicas.

Neves (2017) utilizou o método de hilf para a realização do controle de compactação, seguindo os procedimentos presentes na NBR 12102:1991 MB 3443.

### **3.1.1 Arranjo experimental**

O Aterro Experimental foi construído em três pistas com camadas soltas de 30 cm, 40 cm e 50 cm de espessura com o material disposto na umidade característica do resíduo filtrado, ou seja, na umidade típica proveniente de sua saída do filtro prensa e com acréscimos de 2%, 4% e 6% de umidade com base no controle de compactação, no teor de umidade, no número de passadas, no tipo de equipamentos e suas produtividades etc. Foi utilizado pela autora apenas um trator de esteira para a realização da compactação e densificação dos aterros.

As camadas receberam diferentes combinações de números de passadas com diferentes teores de umidade, para que se avaliasse a forma mais adequada de disposição final de resíduo filtrado. A área total do topo do aterro experimental foi de aproximadamente  $30\text{ m} \times 30\text{ m} = 900\text{ m}^2$ , com os taludes externos construídos com uma inclinação de 1V:2H, fazendo com que a área de base atingisse  $38\text{ m} \times 38\text{ m} = 1.444\text{ m}^2$ . A Figura 25 mostra detalhes dos aterros.

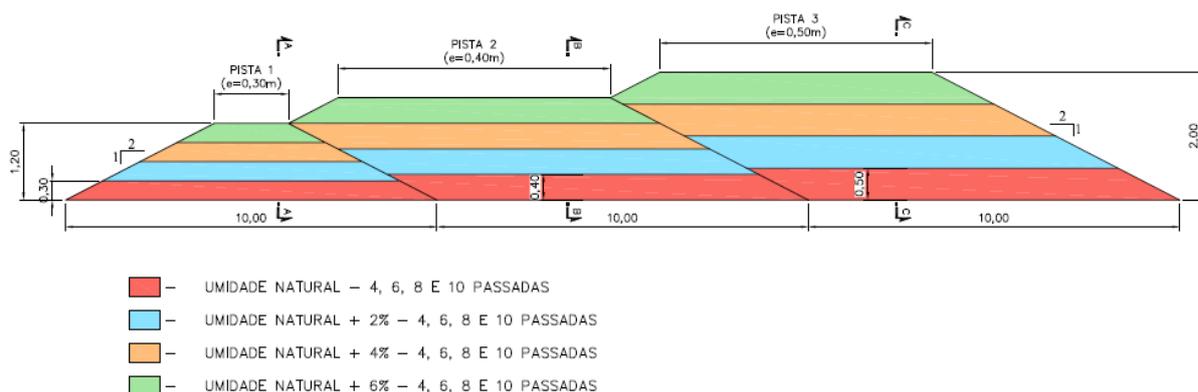


Figura 25: Condições previstas para testes no aterro experimental, onde é possível observar cada uma das três pistas com suas respectivas camadas.

Fonte: NEVES (2017).

Os equipamentos utilizados na execução dos serviços de terraplenagem foram: Caminhões basculante; 01 Trator de esteira tipo D-6; 01 caminhão irrigadeira (Pipa); 01 trator de pneus com grades (Girico); 01 Rolo Compactador Liso.

### 3.1.2 Metodologia executiva

Nesse tópico será apresentada como foi realizado a construção dos aterros experimentais, separados em três pistas.

A seguir, a Figura 26 apresenta as 5 camadas do arranjo geral e suas respectivas umidades referentes a pista 1.

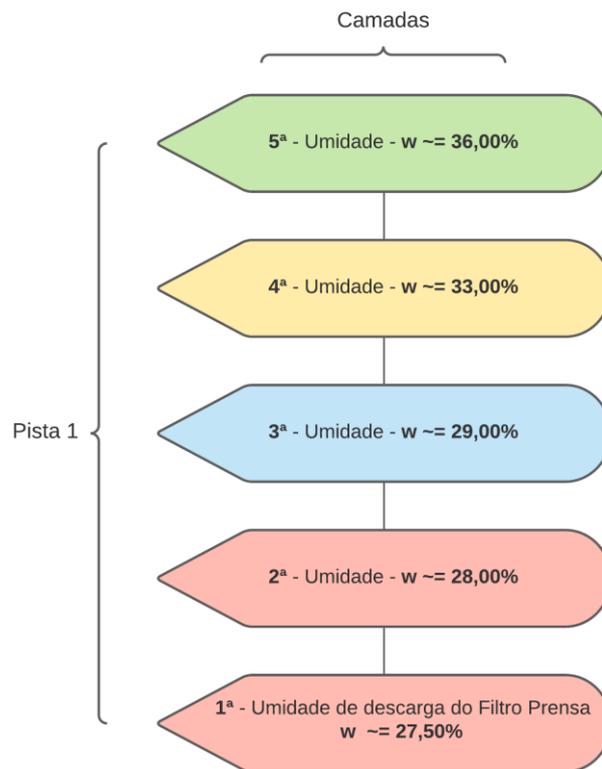


Figura 26: Variação da umidade nas camadas da pista 1.

Fonte: Autor – Baseando-se em NEVES (2017).

Na pista 1, Neves (2017) encontrou muita dificuldade para tratar o material de resíduo advindo do filtro prensa, pois a água não penetrava com facilidade no material, mesmo com a utilização do trator agrícola com grades (Girico), sendo necessário molhar e misturar o material mais vezes. Dessa forma, as variações das umidades não seguiram uma padronização por camada, variando de acordo com a capacidade de homogeneizar as camadas no campo.

Diante disso, foram executadas 5 camadas, uma a mais que nas outras pistas, pois as duas primeiras camadas ficaram com o mesmo teor de umidade. Na pista 1 com camadas de 30 cm de espessura não houve dificuldade para espalhar o material e tráfegar com o equipamento pela pista, inclusive na sua condição mais crítica de teor de umidade, isto é, 7% acima da umidade ótima.

A seguir, a Figura 27 apresenta as 4 camadas do arranjo geral e suas respectivas umidades referentes a pista 2.

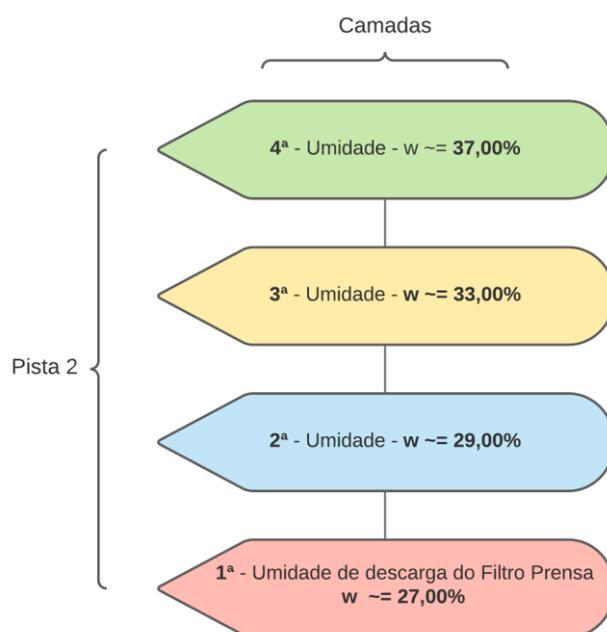


Figura 27: Variação da umidade nas camadas da pista 2.

Fonte: Autor – Baseando-se em NEVES (2017).

A mesma dificuldade encontrada para homogeneizar a camada úmida no teste da pista 1 foi encontrada na pista 2, mais espessa, e a solução foi dividi-la em duas camadas de 20 cm cada, de modo a reduzir sua heterogeneidade. Assim, obtiveram-se duas subcamadas de 20 cm espalhadas e homogeneizadas, porém densificadas com 40 cm.

Verificou-se que o grau de compactação nas subcamadas inferiores foi, em alguns casos, superior ao de subcamada de topo, devido à diferença de umidade real obtida neste método executivo. O registro de umidades das bases menores do que as de topo atribui-se à exposição da subcamada (20 cm) inferior, antes do lançamento da camada subsequente de 20 cm.

Na quarta e última camadas da pista 2, o trator de esteira visualmente não conseguiu compactar o material e teve dificuldades de tráfego, admitindo-se então que o limite de trafegabilidade foi atingido com ~ 6% acima da ótima.

A seguir, a Figura 28 apresenta as 4 camadas do arranjo geral e suas respectivas umidades referentes a pista 3.

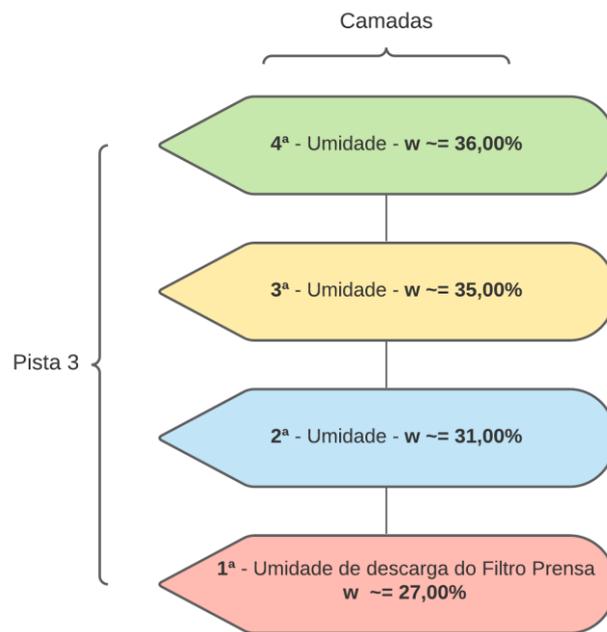


Figura 28: Variação da umidade nas camadas da pista 3.

Fonte: Autor – Baseando-se em NEVES (2017).

Na execução da pista 3, Figura 28, assim como nas demais pistas, encontrou-se dificuldades para homogeneizar a camada úmida da terceira e última camada. A solução encontrada foi similar ao que foi feito na segunda pista para homogeneizar o máximo possível da camada, dividindo-a em duas camadas de 25 cm, antes de compactá-las com espessura única de 50 cm.

Devido à dificuldade para tratar esse material de forma homogênea, em teores de umidades elevados, o grau de compactação nas subcamadas inferiores foi em alguns casos superior ao das subcamadas de topo, e, com isso, foi verificado que as umidades das subcamadas inferiores, onde valores foram menores que as de topo, como encontrado na pista 2.

Na quarta e última camada o trator de esteira conseguiu compactar o material e não teve dificuldades de trafegabilidade, já que os teores de umidade foram um pouco menores que os da pista 2.

### **3.2 Segunda Análise - Sistema de Empilhamento de Rejeito de Minério de Ferro Filtrado e Compactado**

No segundo trabalho, realizado por Silva (2018), um programa experimental com o principal objetivo de avaliar o comportamento geotécnico do rejeito de minério de ferro foi desenvolvido, com o intuito de expor diretrizes de projeto para a alternativa de empilhamento do rejeito, tendo como base os parâmetros de resistência em função das variações do teor de umidade e do grau de compactação.

No trabalho desenvolvido por Silva (2018) utilizou-se o rejeito do processo de obtenção do minério ferro da empresa Minerita Minérios Itaúna Ltda., proprietária da mina Lagoa das Flores. Essa mina constitui uma importante ocorrência de minério de ferro na região denominada complexo Serra Azul, e localiza-se na borda noroeste do Quadrilátero Ferrífero, próxima à cidade de Itatiaiuçu, MG.

Foi proposto pelo autor neutralizar as interferências causadas pelas variações da granulometria e composição química (principalmente teor de ferro) e possibilitar a análise do comportamento dos parâmetros geotécnicos, tendo em vista apenas as variações do teor de umidade e grau de compactação (GC). Diante disso, foram realizadas duas etapas para aquisição de dados.

Para a primeira etapa, Silva (2018) procurou avaliar o comportamento dos parâmetros geotécnicos do rejeito de minério de ferro filtrado em filtro prensa piloto, utilizando-se amostra deformada. Já na segunda etapa, procurou-se registrar o comportamento dos parâmetros geotécnicos em cinco amostras indeformadas e cinco deformadas, advindas de um aterro experimental, realizado com rejeito depositado no formato *sump* de secagem natural por evaporação e percolação pela fundação.

Silva (2018) utilizou o método de frasco de areia para a determinação da massa específica aparente “*in situ*”, seguindo os procedimentos presentes na NBR 7185:1986.

#### **3.2.1 Primeira etapa**

O objetivo dessa etapa foi, basicamente, a avaliação do comportamento dos parâmetros geotécnicos do rejeito de minério de ferro da planta de concentração,

constituído de fração abaixo de 0,212 mm, que é normalmente bombeado para a barragem de disposição com percentual de sólidos em torno de 35%. O autor realizou ensaios de densidade das partículas sólidas, granulometria, permeabilidade à carga variável, compactação, adensamento edométrico unidimensional, ensaio triaxial CIU, ensaios de permeabilidade, teores de umidade e limites de Atterberg. Nessa etapa, das amostras de rejeito em forma de polpa com percentuais de sólidos de 39%, 47% e 60% e, após a filtragem, foi obtido um percentual de sólidos aproximado de 85%.

É importante ressaltar que o tamanho, o modelo do filtro prensa, o design das câmaras e os processos envolvidos são essenciais para alcançar os parâmetros desejáveis do material a ser depositado. Além disso, também é indispensável considerar as características do rejeito em questão. O filtro prensa piloto, mostrado na Figura 29, possuía 3 placas de (250 x 250) mm, com pressão nominal de operação 1600 kPa, espessura da câmara de 20 mm, cada tecido de filtragem possui material de poliamida e apresentam permeabilidade de 500 l/min/dm<sup>2</sup>.



Figura 29: Filtro prensa piloto utilizado no processo de filtragem da amostra de rejeito de minério de ferro em forma de polpa, com 60% de sólidos (W/W).

Fonte: SILVA (2018).

### 3.2.2 Segunda etapa

Nessa etapa, a obtenção dos parâmetros geotécnicos foi realizada em cinco amostras indeformadas e cinco deformadas, obtidas por meio de um aterro

experimental compactado com diferentes GC e teores de umidade, construído com rejeito de minério de ferro advindo da planta. Foram realizados diversos ensaios nas amostras mencionadas, sendo eles o ensaio de massa específica aparente e grau de compactação obtidos pelo método de cravação do cilindro biselado, ensaios de compactação em cada fase do aterro experimental, análise granulométrica, densidade das partículas sólidas, análise química quantitativa, massa específica e teor de umidade, Índice de vazios máximos e mínimos, permeabilidade à carga variável, ensaios de índice de suporte Califórnia (ISC), adensamento edométrico unidimensional, ensaios triaxiais CIUnat e CIU.

a) Amostragem

Diante da massa de rejeito necessária para construção do aterro, valor em torno de 500 t, e, da baixa capacidade de produção do filtro prensa piloto, a amostra de rejeito foi lançada em um *sump* na condição de polpa, para que ocorresse sua drenagem de forma natural, substituindo assim o processo de filtração. Concomitantemente, foi realizada a coleta de amostra a ser submetida ao filtro prensa piloto, para verificação da taxa de filtração e obtenção da massa específica natural e teor de umidade. A Figura 30 apresenta o filtro prensa piloto utilizado na realização da filtração nessa etapa e a Figura 31 apresenta um detalhe nas câmaras de filtração.



Figura 30: Filtro prensa piloto.  
Fonte: SILVA (2018).



Figura 31: Câmaras de filtragem pertencente ao filtro prensa piloto.  
Fonte: SILVA (2018).

b) Processo

De acordo com Silva (2018), a permanência do rejeito no sump durou aproximadamente 35 dias, tempo necessário para o desaguamento natural advindo dos fenômenos de drenagem superficial, percolação pela fundação, e evaporação. Segundo o autor, o processo de remoção de água natural de rejeito de minério de ferro disposto na condição de polpa depende, dentre outras coisas, de suas propriedades físico-químicas, entre elas a granulometria, porosidade, permeabilidade, espessura da camada, capilaridade e composição química da água, além de também depender das condições climáticas e do recipiente utilizado para armazenar a polpa, como porosidade e permeabilidade.

Com relação a construção do aterro experimental, foram realizadas retiradas de amostras indeformadas e deformadas. Foram obtidos por meio da realização dos ensaios de compactação com variação da energia de compactação e realização de testes de compactação com rolo compactador tipo pé de carneiro, onde foi possível correlacionar o número de passadas com o grau de compactação.

A construção do aterro experimental foi dividida em cinco fases, para que fosse possível realizar a extração de uma amostra indeformada e uma deformada por fase. Na primeira fase, o teor de umidade foi o ótimo ( $w_{ot}$ ); a segunda e terceira fases foram referentes ao ramo seco, ou seja, a umidade existente nessas fases eram menores que a ótima e na quarta e quinta fases provenientes do ramo úmido, isto é, com umidades acima da umidade ótima quando analisadas na curva de compactação.

Os parâmetros aplicados à construção do aterro experimental foram obtidos por meio de ensaios de compactação com variação de energia através de testes de campo com rolo compactador tipo pé-de-carneiro. A Tabela 1 e Tabela 2 apresentam o número de golpes e o número de passadas do rolo compactador.

Tabela 1: Número de golpes aplicados aos ensaios de compactação com energia Proctor Normal, com soquete de 2,5 kg.

Fonte: SILVA (2018).

Ensaio de compactação com variação de energia						
Ensaio	1	2	3	4	5	6
Nº golpes por camada	5	10	15	20	25	30

Tabela 2: Número de passadas do rolo compactador para realização de testes de compactação de campo para obtenção de parâmetros a serem aplicados à construção do aterro experimental.

Fonte: SILVA (2018).

Sistema de vibração do rolo	Número de passadas do rolo compactador						Teor de umidade W (%)
Desaplicado	1	2	6	12	18	24	9,8
Aplicado	2	6	12	18	24	30	14,1

Após a obtenção dos resultados, Silva (2018) definiu o GC e o teor de umidade a serem aplicados em cada uma das cinco fases do aterro experimental. A distribuição na curva de compactação foi realizada com dois pontos no ramo seco, um na umidade ótima e dois pontos no ramo úmido.

As figuras a seguir (de 32 a 35) ilustram o processo de lançamento da amostra de rejeito em forma de polpa, o processo de desaguamento natural, a construção do aterro experimental e a retirada de blocos de amostras indeformadas com dimensões (30 x 30 x 30) cm.



Figura 32: Imagem a esquerda: Lançamento da polpa de rejeito no *sump*. Imagem da direita: Vista do processo de secagem natural do rejeito por evaporação, drenagem superficial e percolação pela fundação.

Fonte: SILVA (2018).



Figura 33: Imagem a esquerda: Retirada do rejeito do *sump*. Imagem a direita: Espalhamento e homogeneização de camadas no aterro experimental.

Fonte: SILVA (2018).



Figura 34: Espalhamento do rejeito e preparação do aterro experimental. A imagem da esquerda encontra-se uma motoniveladora e na imagem a direita um trator de pneu do tipo pá carregadeira equipada com grades em sua parte traseira.

Fonte: SILVA (2018).



Figura 35: Compactação do aterro experimental com rolo compactador pé-de-carneiro.

Fonte: SILVA (2018).

### 3.3 Discussão dos Métodos

Com base no que foi apresentado, observa-se que, tanto Neves (2017) quanto Silva (2018) buscaram conhecer as possibilidades de trabalho de seus respectivos materiais, em diferentes situações de umidade e número de passadas. Porém,

aspectos como a variação das espessuras das camadas e equipamentos utilizados para a compactação do material e suas variações, foram tomados de maneira diferente por cada um deles.

Neves (2017) realizou seus testes com uma maior gama de possibilidades que Silva (2018), pois se tratando da associação de variações de teores de umidade, espessura das camadas e número de passadas, a autora vislumbrou maiores problemas encontrados em campo. Caso haja a necessidade de se compactar o rejeito filtrado, mesmo com um teor de umidade diferente do ótimo (em épocas do ano de muita seca ou chuvas intensas, o teor de umidade poderá estar diferente no momento da operação), bem como a possibilidade de se trabalhar com espessuras variadas caso exista a necessidade, além de contabilizar o melhor número de passadas para cada situação.

Por outro lado, Silva (2018) realizou seu trabalho com o auxílio de rolos compactadores pé-de-carneiro, que são comumente utilizados em obras desse porte, ao contrário de Neves (2017), que adotou o uso de trator de esteira, um equipamento que atende as expectativas de compactação mas pode se tornar um complicador em obras de maior porte, onde o equipamento precise vencer grandes distâncias. Além disso, o rolo compactador pé-de-carneiro possui a condição de aplicar maiores tensões sobre as fileira de patas assim como, associar a vibração ao equipamento e propiciar uma melhor compactação do material.

Silva (2018) não se ateuve as possibilidades de variação de espessura de camadas como o trabalho de Neves (2017) propôs, apenas adotou uma espessura média de 30 cm, o que reduz o número de resultados, e, conseqüentemente, interfere nas possibilidades para soluções de problemas encontrados em campo, a exemplo a necessidade de se trabalhar com camadas mais espessas devido a demanda, como já citado, e o tempo para finalização da obra.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Primeira Análise – Aterro Com Resíduo Filtrado de Alumina (Lama Vermelha)

#### 4.1.1 Principais resultados dos ensaios de campo e laboratório

Neves (2017) realizou diversos ensaios dentro e fora da área de testes, sendo alguns realizados em campo e outros em laboratório.

A seguir, a Tabela 3 mostra os resultados sobre a caracterização do material coletado nas pistas experimentais.

Tabela 3: Resumo dos resultados dos ensaios de caracterização executados nas amostras coletadas do aterro experimental.

Fonte: NEVES (2017).

Local	Amostra	Granulometria (%)			w (%)	Limites de Atterberg (%)		
		Argila	Silte	Areia		LL	LP	IP
Pista 1	Bloco 1	40	48	12	24,9	33	23	10
	Bloco 2	34	53	13	29,2	33	20	13
	Bloco 3	35	51	14	23,2	32	20	12
Pista 2	Bloco 4	36	52	12	25,5	32	20	12
	Bloco 5	35	53	11,9	26,8	31	22	9
	Bloco 6	43	46	10,9	25,4	33	19	14
	Bloco 7	41	48	11	27,2	32	22	10
	Bloco 8	41	47	12	30,5	33	20	13
	Bloco 9	46	40	14	32,1	33	19	14
Pista 3	Bloco 10	41	47	12	18,3	31	19	12
	Bloco 11	41	48	11	25,4	32	21	11
	Bloco 12	37	51	12	20,3	31	21	10

Diante dos resultados de laboratório, foram apresentadas as curvas granulométricas para das amostras coletadas no aterro experimental (Figura 36). Observou-se que o material tem em sua composição essencialmente silte + argila (~91% passante na #200) e com teor médio de areia de 12%, com limites de liquidez de 32% e 20% de plasticidade, com baixo índice de plasticidade IP~12% (média).

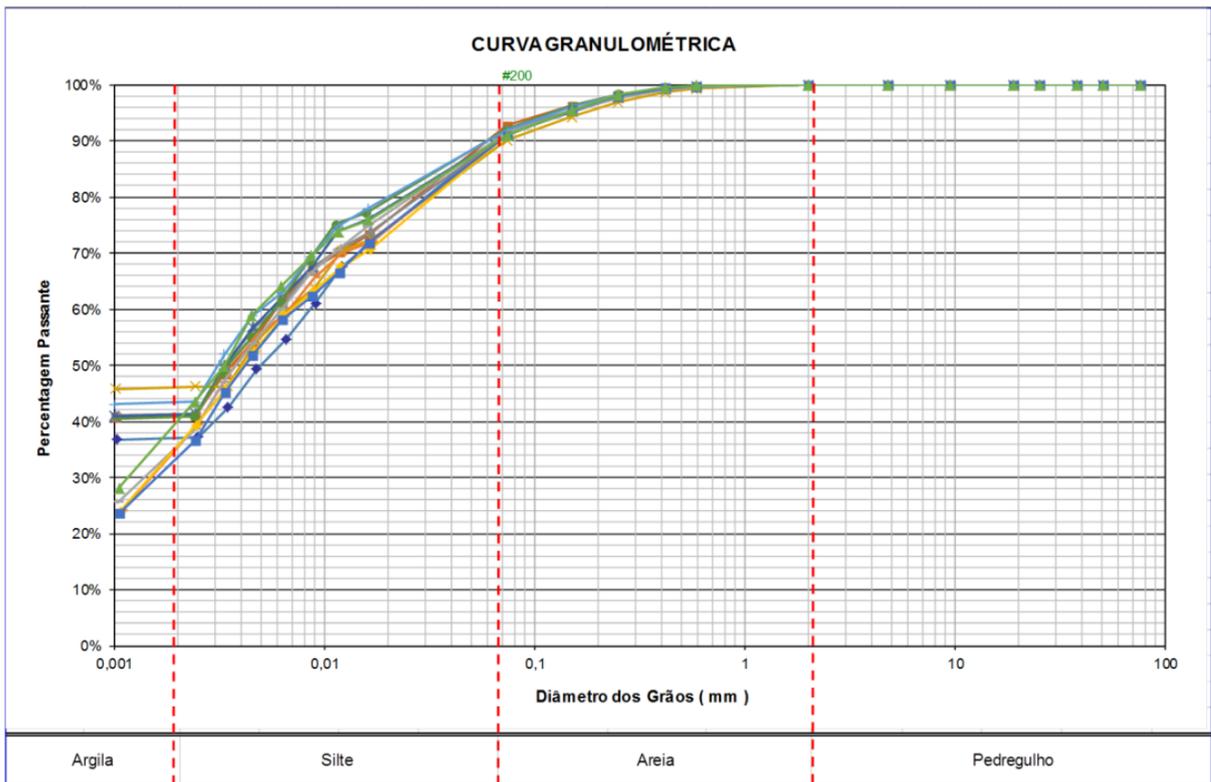


Figura 36: Curvas granulométricas dos ensaios dos blocos coletados.

Fonte: NEVES (2017).

Os ensaios de compactação com energia Proctor Normal realizados nos materiais coletados nas três pistas apresentaram um teor de umidade ótima em torno de 29% e um peso específico seco máximo de 1,52 t/m<sup>3</sup>.

Os ensaios de controle de compactação realizados durante a execução da Pista 1 do aterro experimental estão apresentados na Figura 37 e na Figura 38, segundo a compilação dos ensaios de controle tecnológicos desta pista.

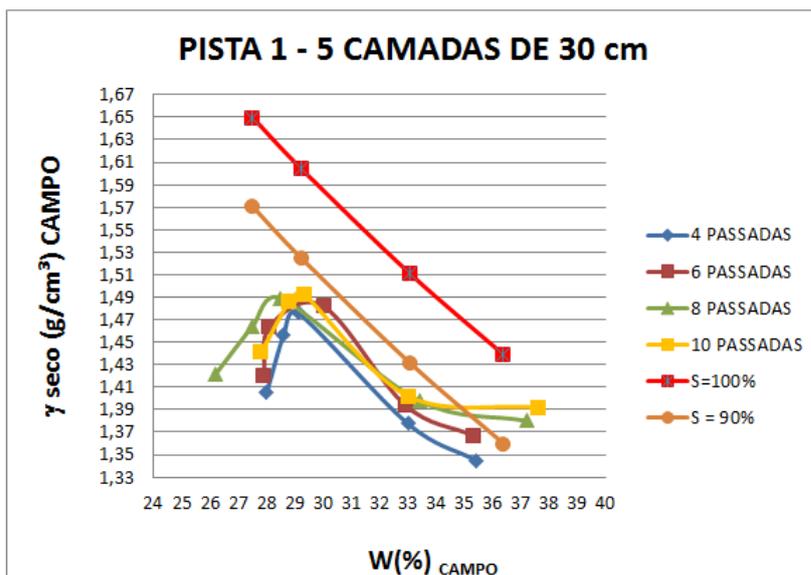


Figura 37: Pista 1 – Compilação das curvas de compactação de cada camada.  
 Fonte: NEVES (2017).

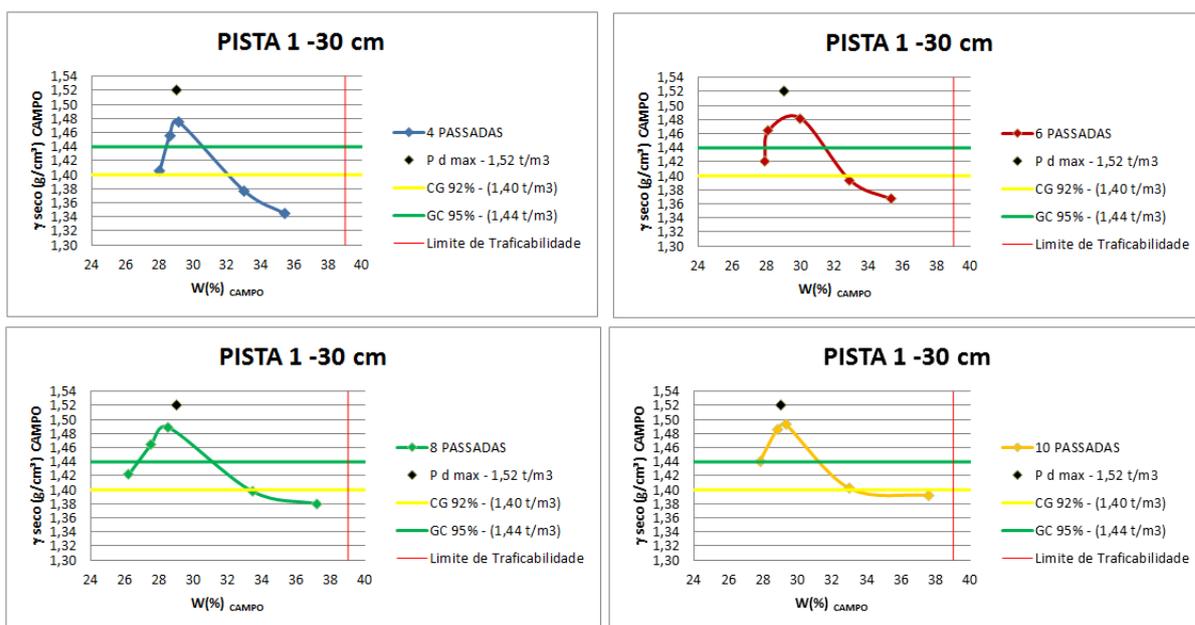


Figura 38: Pista 1 – 4,6,8 e 10 passadas.  
 Fonte: NEVES (2017).

Segundo Neves (2017), no geral as curvas de compactação de campo apresentam forma regular e típica de solos siltosos, com uma rápida redução do seu

peso específico seco e com variação do teor de umidade. As umidades ótimas das curvas de campo são semelhantes àquela obtida em laboratório, com uso da energia Proctor Normal, porém os pesos específicos secos máximos encontrados foram relativamente inferiores.

Verificou-se um pequeno aumento do grau de compactação em função do aumento de número de passadas. Em umidades de até 4% acima da ótima, a camada de 30 cm apresenta valores de grau de compactação aceitáveis, sempre acima de 92%, independentemente do número de passadas.

Os testes que Neves (2017) realizou indicaram que, para a espessura de 30 cm, em umidades iguais ou menores que 4% acima da ótima, o número de 6 passadas seria suficiente para atingir graus de compactação satisfatórios para o projeto. O limite de trafegabilidade para essa espessura de camadas atingiu 7/8% acima da ótima.

Os ensaios de controle de compactação realizados durante a execução da Pista 2 do aterro experimental estão apresentados na Figura 39 a Figura 42, segundo a compilação dos ensaios de controle tecnológicos desta pista.

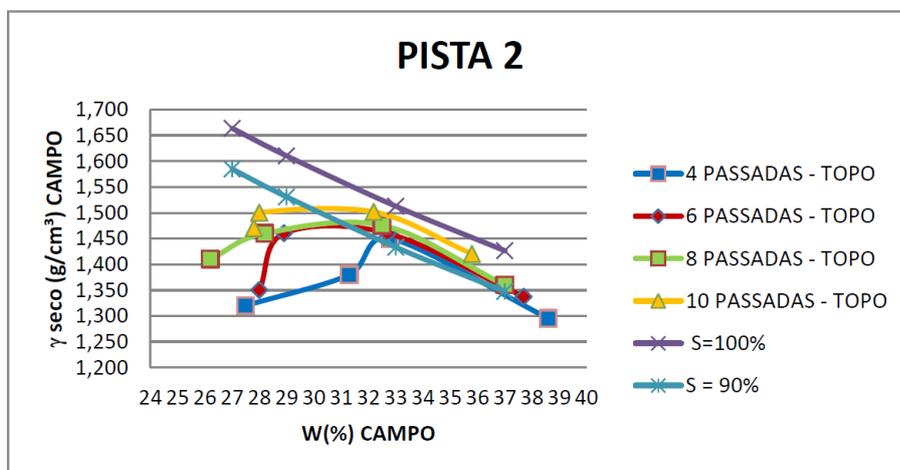


Figura 39: Pista 2 – Compilação das curvas de compactação do topo de cada camada.

Fonte: NEVES (2017).

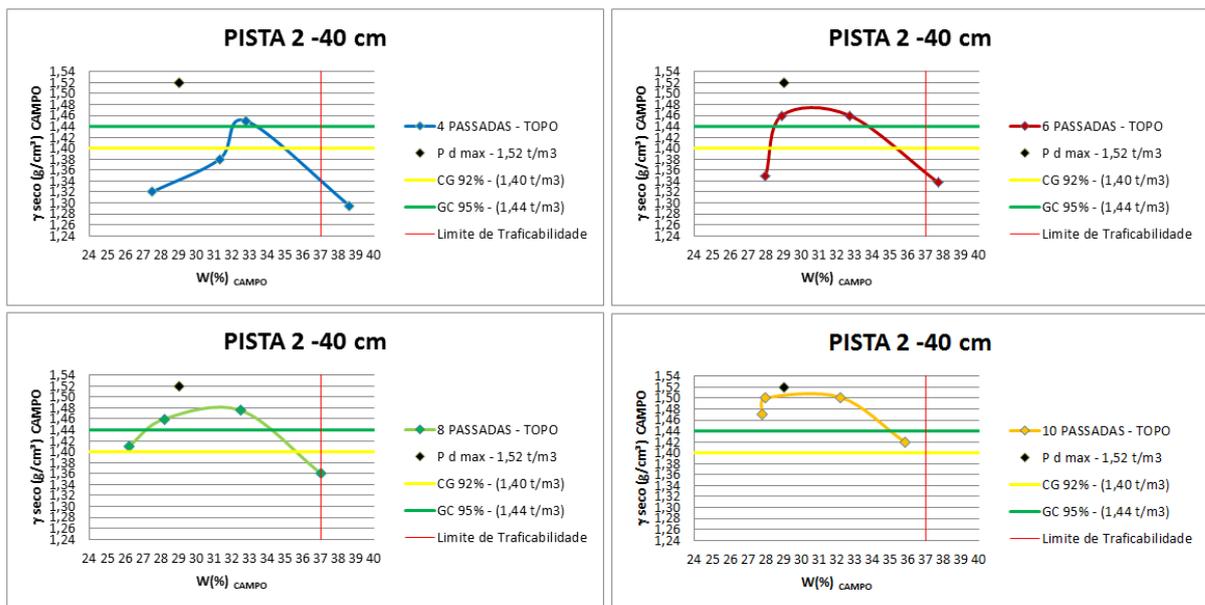


Figura 40: Pista 2 – 4,6,8 e 10 passadas – TOPO.

Fonte: NEVES (2017).

No que se refere aos resultados apresentados por Neves (2017) para a pista 2, as curvas de compactação de amostras coletadas nas subcamadas de topo apresentam forma regular típicas de solos siltsos. As umidades ótimas das curvas de campo são superiores as de laboratório, porém, os pesos específicos secos máximos foram relativamente inferiores.

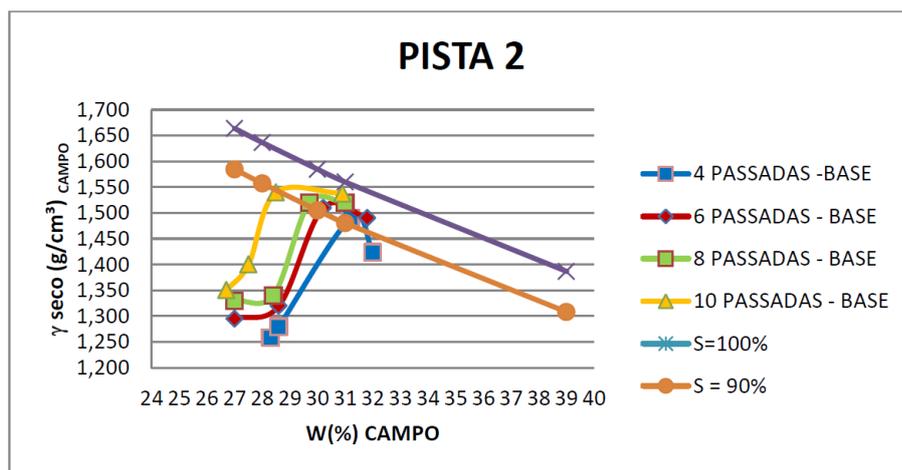


Figura 41: Pista 2 – Compilação das curvas de compactação da base de cada camada.

Fonte: NEVES (2017).

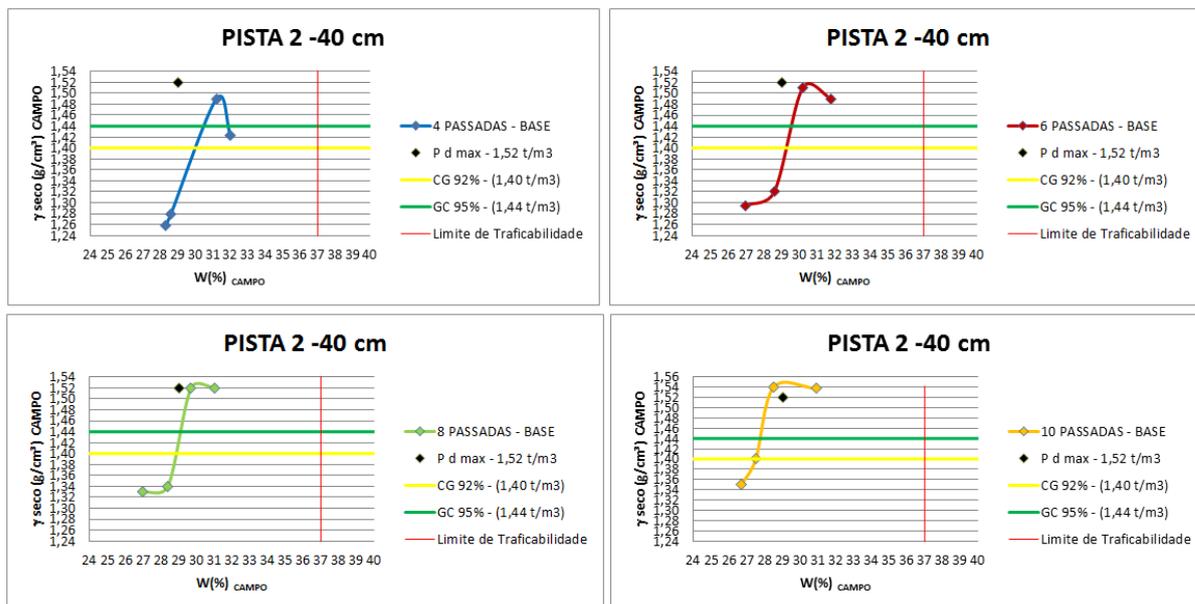


Figura 42: Pista 2 – 4,6,8,10 passadas – BASE.

Fonte: NEVES (2017).

Já os resultados apresentados por Neves (2017) para as curvas de compactação de amostras das subcamadas inferiores (base), verifica-se que elas apresentam formas irregulares, apesar de ainda indicarem uma possível tendência de pico. Tanto os resultados de subcamadas inferiores (base) como superiores (topo), observou-se um aumento significativo do grau de compactação com o aumento do número de passadas.

Conforme abordado na metodologia do trabalho, a pista 2 apresentou uma heterogeneidade devido a espessura e dificuldade de umedecê-la em campo, e, portanto, os valores encontrados de grau de compactação para topo e base não apresentam constância, devido às perdas de umidade durante o processo de lançamento e espalhamento deste material.

Para as camadas 1 e 2, relativas à umidade ótima ou pouco abaixo, Neves (2017) registrou significativo gradiente de compactação, com a base nos baixos valores de grau de compactação. Para as camadas 3 e 4 obteve-se umidades 4 e 8% acima da ótima nas subcamadas de topo, mas registrou-se umidades bastantes inferiores nas

de base, presumivelmente pela secagem durante o espalhamento e por esse motivo, foi possível observar uma inversão, com graus de compactação elevados na base e menores no topo.

Apesar dos resultados acima, notou-se que para umidades de até 4% acima da ótima, o topo da camada de 40 cm apresenta valores de graus de compactação acima de 93%, porém necessita-se aplicar 8 passadas para umidades abaixo da ótima. Já em sua base, os valores de graus de compactação são altos apenas quando a umidade está pouco acima da ótima, que foram os casos das camadas 3 e 4. O limite de traficabilidade para essa espessura de camada foi de 7% acima da ótima.

Os ensaios de controle de compactação realizados durante a execução da Pista 3 do aterro experimental estão apresentados na Figura 43 a Figura 46, segundo a compilação dos ensaios de controle tecnológicos desta pista.

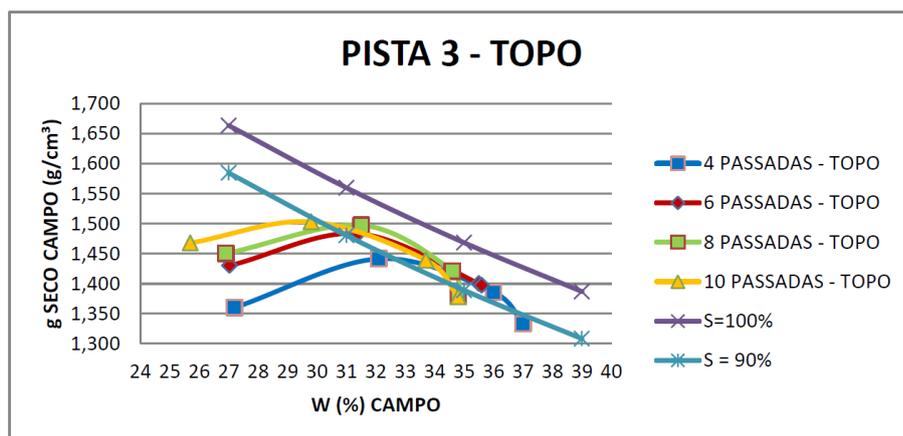


Figura 43: Pista 3 – Compilação das curvas de compactação do topo de cada camada.

Fonte: NEVES (2017).

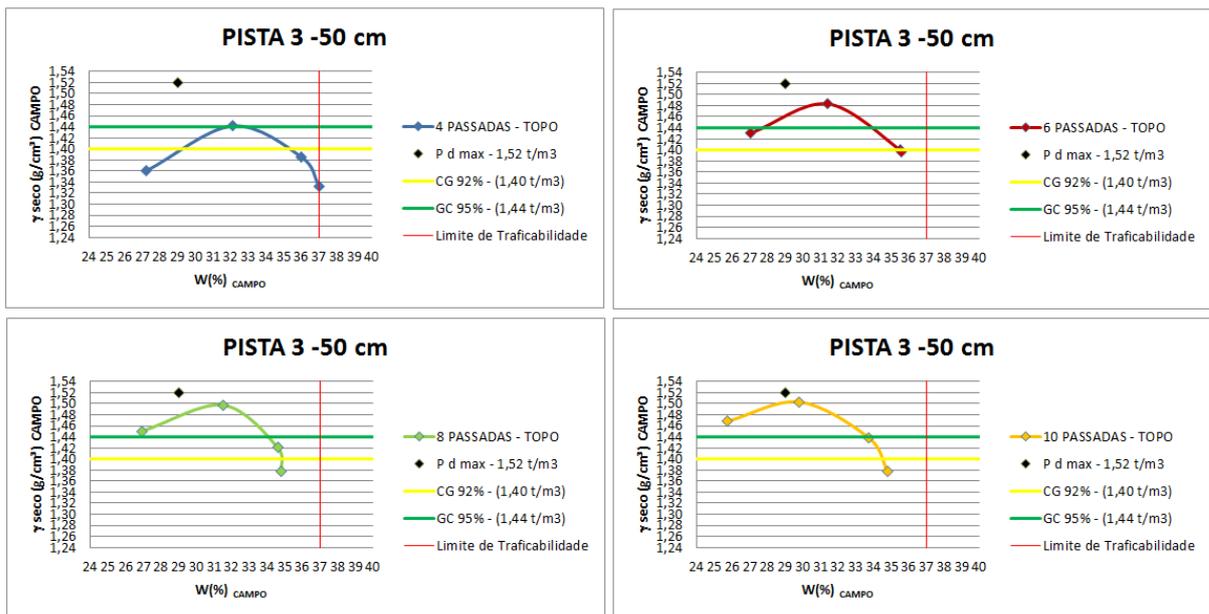


Figura 44: Pista 3 – 4,6,8 e 10 passadas – TOPO.

Fonte: NEVES (2017).

Para a pista 3, Neves (2017) observou que todos os gráficos correspondentes ao topo das camadas apresentaram a curva de compactação de campo com forma regular. As umidades ótimas das curvas de campo são superiores àquela de laboratório, com os pesos específicos secos máximos um pouco inferiores. Para a base e o topo da camada, foi possível observar um aumento significativo do grau de compactação à medida que o número de passadas também aumentava, a exceção para umidades mais elevadas, a exemplo, a camada 4.

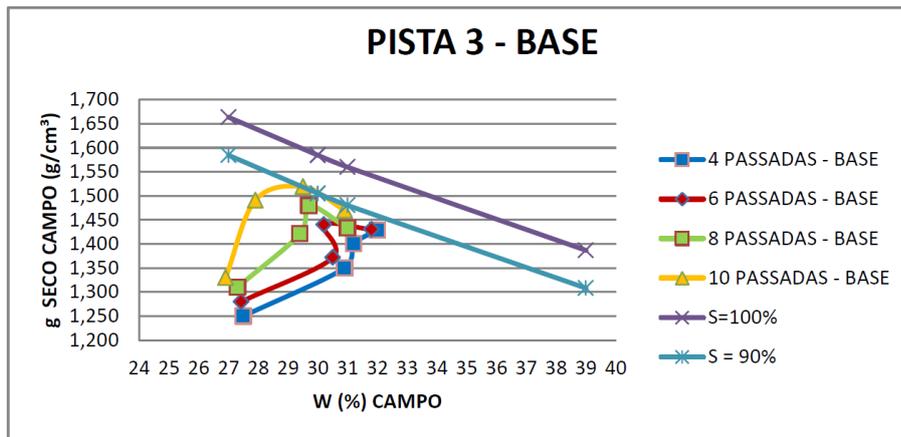


Figura 45: Pista 3 – Compilação das curvas de compactação da base de cada camada.

Fonte: NEVES (2017).

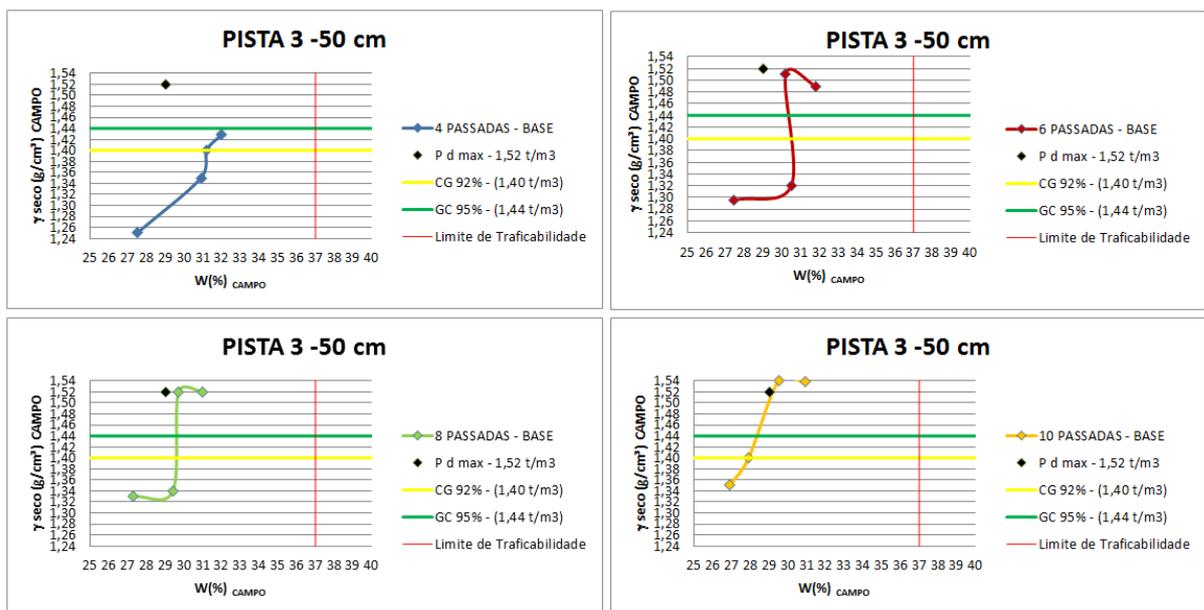


Figura 46: Pista 3 – 4,6,8 e 10 passadas – BASE.

Fonte: NEVES (2017).

Ainda sobre as curvas de compactação, no caso de resultados de amostras das base das camadas, as curvas possuem forma irregular, sem indicarem tendência de pico. Apenas a curva correspondente a 10 passadas apresenta pico.

Assim como já relatado, a camada de espessura de 40 cm apresenta uma heterogeneidade devido à dificuldade de umedecê-la em campo. Diante disso, os valores de grau de compactação para topo e base não apresentaram um valor constante, devido às perdas de umidade durante o processo de lançamento e espalhamento do material.

Para as camadas 1 e 2, onde as umidades estão pouco acima ou abaixo da ótima, registrou-se um significativo gradiente de compactação, com a base indicando baixos valores de graus de compactação, mesmo com umidades semelhantes entre topo e base. Para as camadas 3 e 4, tem-se umidades 6 e 7% acima da ótima no topo, porém registrou-se umidades bastantes inferiores na base, possivelmente pela secagem durante o espalhamento. Assim como ocorreu na Pista 2, observa-se uma inversão no que se esperava que ocorresse, com resultados de graus de compactação elevados na base e menores no topo.

Por fim, Neves (2017) constatou que para umidades de até 7% acima da ótima, o topo da camada de 50 cm apresenta valores de grau de compactação acima de 95%, porém é necessário a realização de 8 passadas para obtê-lo. Na base dessas camadas, os valores de graus de compactação são altos apenas quando a umidade está pouco acima da ótima, a exemplo as camadas 3 e 4, e, devido à secagem observada, não foi possível observar umidades mais elevadas. O limite de trafegabilidade para essa espessura de camada atingiu valores entre 7 e 8% acima da umidade ótima.

#### **4.1.2 Resumo dos resultados dos testes de compactação de campo**

As tabelas abaixo (Tabela 4, Tabela 5 e Tabela 6) apresentam os resultados de controle tecnológicos das pistas coletados a partir das etapas construtivas do aterro experimental.

Tabela 4: Resultado dos ensaios de compactação de campo na pista 1, realizados com a utilização de trator de esteira tipo D-6.

Fonte: NEVES (2017), (Adaptado).

PISTA	CAMADA	NÚMERO DE PASSADAS	CAMPO		
			W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
1	1	4	28	1,41	92
		6	28	1,42	93
		8	26	1,42	94
		10	28	1,44	95
		MÉDIA	27,48	1,42	94
1	2	4	29	1,46	96
		6	28	1,46	96
		8	28	1,46	96
		10	29	1,49	98
		MÉDIA	28,25	1,47	97
1	3	4	29	1,48	97
		6	30	1,48	98
		8	29	1,49	98
		10	29	1,49	98
		MÉDIA	29,23	1,49	98
1	4	4	33	1,38	91
		6	33	1,39	92
		8	33	1,40	92
		10	33	1,40	92
		MÉDIA	33,08	1,39	92
1	5	4	35	1,34	88
		6	35	1,37	90
		8	37	1,38	91
		10	38	1,39	92
		MÉDIA	36,38	1,37	90

Tabela 5: Resultado dos ensaios de compactação de campo na pista 2, realizados com a utilização de trator de esteira tipo D-6.

Fonte: NEVES (2017), (Adaptado).

PISTA	CAMADA	NÚMERO DE PASSADAS	TOPO			BASE		
			CAMPO			CAMPO		
			W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
2	1	4	28	1,32	87	28	1,26	83
		6	28	1,35	89	27	1,30	85
		8	26	1,41	93	27	1,33	87
		10	28	1,47	97	27	1,35	89
		MÉDIA	27	1,39	91	27	1,31	86
2	2	4	31	1,38	91	29	1,28	84
		6	29	1,46	96	29	1,32	87
		8	28	1,46	96	28	1,34	88
		10	28	1,50	99	28	1,40	92
		MÉDIA	29	1,45	95	28	1,34	88
2	3	4	33	1,45	95	31	1,49	98
		6	33	1,46	96	30	1,51	99
		8	33	1,48	97	30	1,52	100
		10	32	1,50	99	29	1,54	101
		MÉDIA	33	1,47	97	30	1,52	100
2	4	4	39	1,30	85	32	1,42	94
		6	38	1,34	88	32	1,49	98
		8	37	1,36	89	31	1,52	100
		10	36	1,42	93	31	1,54	101
		MÉDIA	37	1,35	89	31	1,49	98

Tabela 6: Resultado dos ensaios de compactação de campo na pista 3, realizados com a utilização de trator de esteira tipo D-6.

Fonte: NEVES (2017), (Adaptado).

PISTA	CAMADA	NÚMERO DE PASSADAS	TOPO			BASE		
			CAMPO			CAMPO		
			W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)	W(%) CAMPO	$\gamma$ seco (g/cm <sup>3</sup> ) CAMPO	GC (%)
3	1	4	27	1,36	89	28	1,25	82
		6	27	1,43	94	27	1,28	84
		8	27	1,45	95	27	1,31	86
		10	26	1,47	97	27	1,33	88
		MÉDIA	27	1,43	94	27	1,29	85
3	2	4	32	1,44	95	31	1,35	89
		6	31	1,48	98	31	1,37	90
		8	32	1,50	99	29	1,42	93
		10	30	1,50	99	28	1,49	98
		MÉDIA	31	1,48	97	30	1,41	93
3	3	4	36	1,39	91	31	1,40	92
		6	36	1,4	92	30	1,44	95
		8	35	1,42	93	30	1,48	97
		10	34	1,44	95	30	1,52	100
		MÉDIA	35	1,41	93	30	1,46	96
3	4	4	37	1,33	88	32	1,43	94
		6	36	1,40	92	32	1,43	94
		8	35	1,38	91	31	1,43	94
		10	35	1,38	91	31	1,47	97
		MÉDIA	36	1,37	90	31	1,44	95

### 4.1.3 Seção adotada para conformação do rejeito filtrado

Por fim, com base nos resultados acima citados, Neves (2017) comparou em uma condição não-drenada, a altura da seção com o aumento do carregamento no depósito de resíduos sólidos, os valores da razão de poropressão ( $R_u$ ), pois, o valor de  $R_u$  é inversamente proporcional ao valor da tensão vertical aplicada ( $R_u = u/\sigma_1$ ), ou seja, com o acréscimo da tensão vertical a razão de poropressão diminui e consequentemente o fator de segurança (FS) também diminui. Nesse sentido, optou-se por seccionar o modelo em horizontes de aproximadamente 10,00 m de altura e atribuir a cada camada valores decrescentes de  $R_u$  a partir da base do modelo na análise de estabilidade.

A seção típica com a divisão dos materiais considerados no modelo numérico utilizado por Neves (2017), com altura da pilha de aproximadamente 64,00 m, com bermas de 5,0 m a cada 10 m de desnível na inclinação 1V:2H para a aplicação dos conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores foi a seguir, exemplificada na Figura 47.

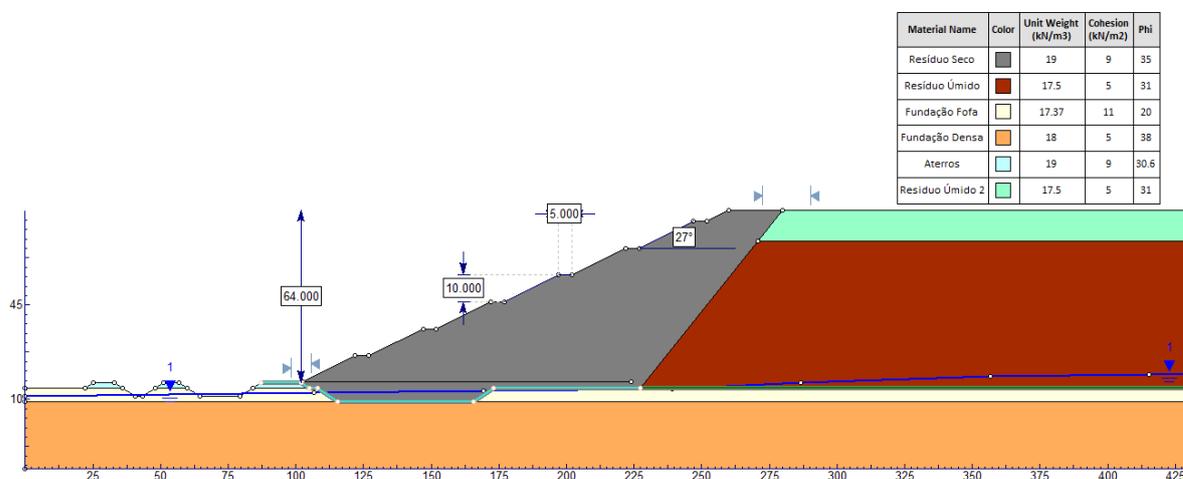


Figura 47: Seção adotada para análise numérica.

Fonte: NEVES (2017).

## 4.2 Segunda Análise - Sistema de Empilhamento de Rejeito de Minério de Ferro Filtrado e Compactado

Silva (2018) realizou diversos ensaios dentro e fora da área de testes, sendo alguns realizados em campo e outros em laboratório.

### 4.2.1 Resultados referentes à primeira etapa

A seguir, a Tabela 7 apresenta os resultados sobre as propriedades geotécnicas do material estudado nessa etapa.

Tabela 7: Resumos dos resultados dos ensaios geotécnicos - primeira etapa.

Fonte: SILVA (2018).

GC [%]	W <sub>ot</sub> [%]	ρ <sub>dmax</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	W <sub>CP</sub> [%]	ρ <sub>a</sub> [g/cm <sup>3</sup> ] Molde CP	K <sub>20</sub> [m/s]	σ' <sub>p</sub> Pacheco Silva	CR = Cc/(1+e <sub>i</sub> )	φ [°]	φ' [°]	c [kPa]	c' [kPa]	LL [%]	LP [%]
85	16,60	1,880	15,00	1,598	1,20E-05	130	0,117	17	33	0	4	22	19
90	16,60	1,880	15,00	1,692	5,20E-06	249	0,105	19	34	6	6	22	19
95	16,60	1,880	15,00	1,786	2,80E-06	248	0,105	23	35	12	7	22	19

Com relação a análise granulometria das amostras de rejeito advinda do processo de filtragem em filtro prensa piloto, Silva (2018) realizou-a pelo método de peneiramento e sedimentação, seguindo os procedimentos pela NBR-7181 (ABNT, 1984). A Figura 48 apresenta o resultado obtido na análise granulométrica, onde é possível observar a predominância da fração silte, em torno de 75%.

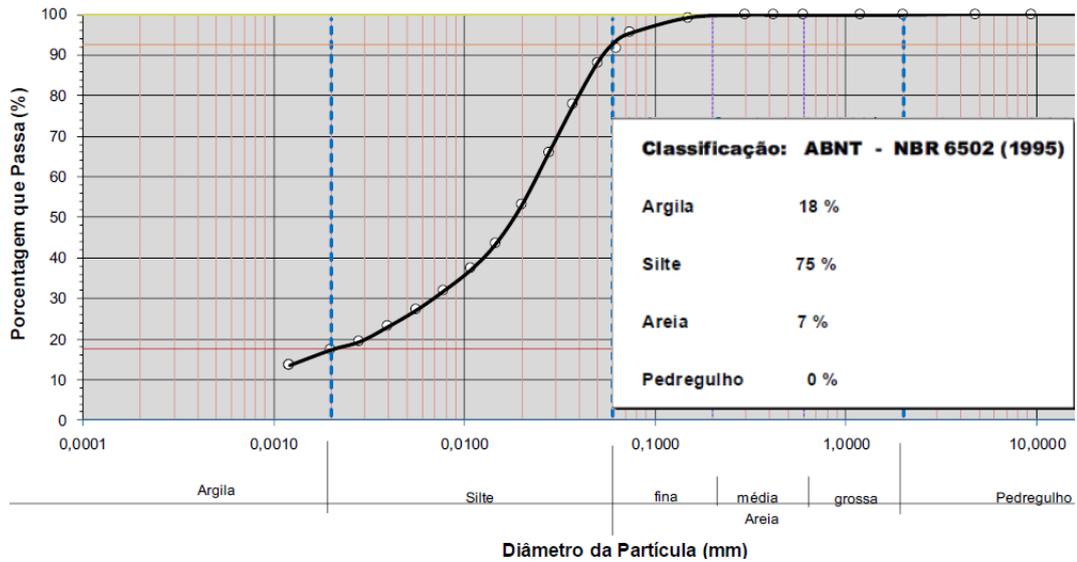


Figura 48: Análise granulométrica realizada no rejeito de minério de ferro - primeira etapa.

Fonte: SILVA (2018).

Já o ensaio de compactação da amostra de rejeito filtrado foi executado com o uso da energia de compactação Proctor Normal, e a curva de compactação é apresentada na Figura 49. Também é possível encontrar nessa figura a indicação do teor de umidade ótima de 16,6% obtido na análise do ensaio, porém o valor utilizado para moldagem dos corpos de prova para realização dos ensaios triaxiais e de adensamento edométrico foi de 15%. Informa-se que esse valor foi alcançado na “torta” de filtragem da polpa de rejeito com teor de sólidos em massa igual a 60% (m/m).

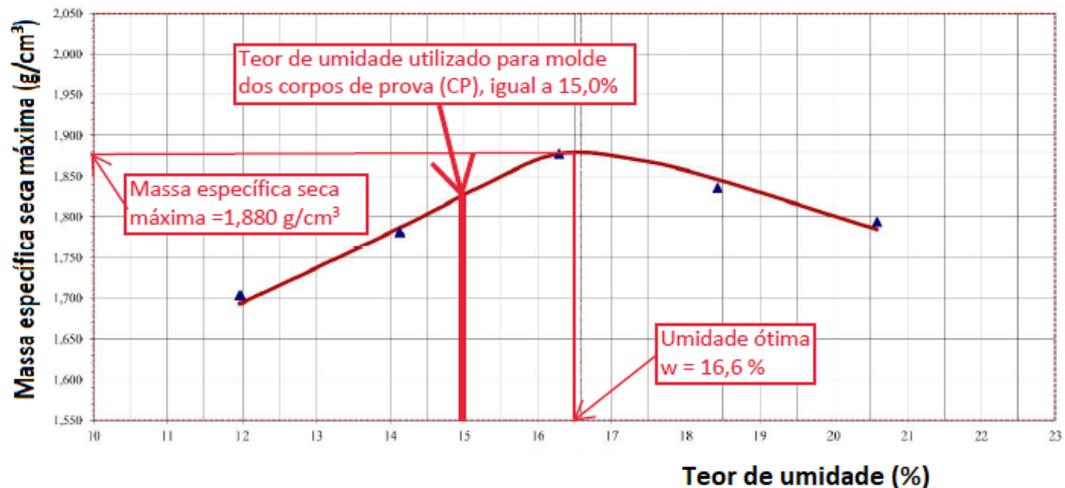


Figura 49: Curva de compactação com energia Proctor Normal, realizada em amostra de rejeito de minério de ferro - primeira etapa.

Fonte: SILVA (2018).

#### 4.2.2 Resultados referentes a segunda etapa (aterro)

Silva (2018) obteve diversos resultados referentes aos ensaios geotécnicos por ele executados nessa etapa do processo sendo eles extremamente pertinentes para a construção de aterros compactados com o uso de rejeitos filtrados e, portanto, alguns serão abordados e discutidos a seguir.

Nos resultados dos ensaios de caracterização realizados pelo autor, não foi possível observar variações significativas entre as amostras indeformadas e deformadas, no que diz respeito à composição química, densidade das partículas sólidas ( $G_s$ ), granulometria, índices de vazios, massa específica seca máxima, grau de compactação e teor de umidade. Sendo assim, foi possível analisar e comparar os parâmetros geotécnicos das amostras, uma vez que as variações no grau de compactação e teor de umidade podem colaborar para a obtenção das diretrizes de projeto de empilhamento de rejeito filtrado.

A Figura 50 apresenta os resultados do ensaio de compactação Proctor Normal realizados na amostra indeformada coletada do aterro experimental, para obtenção da massa específica seca máxima ( $\rho_{dmax}$ ) e teor de umidade ótima ( $w_{ot}$ ). Dessa forma,

obteve-se uma massa específica seca máxima ( $\rho_{dmax} = 1,734\text{g/cm}^3$ ) e um teor de umidade ótima ( $w_{ot} = 16,2\%$ ).

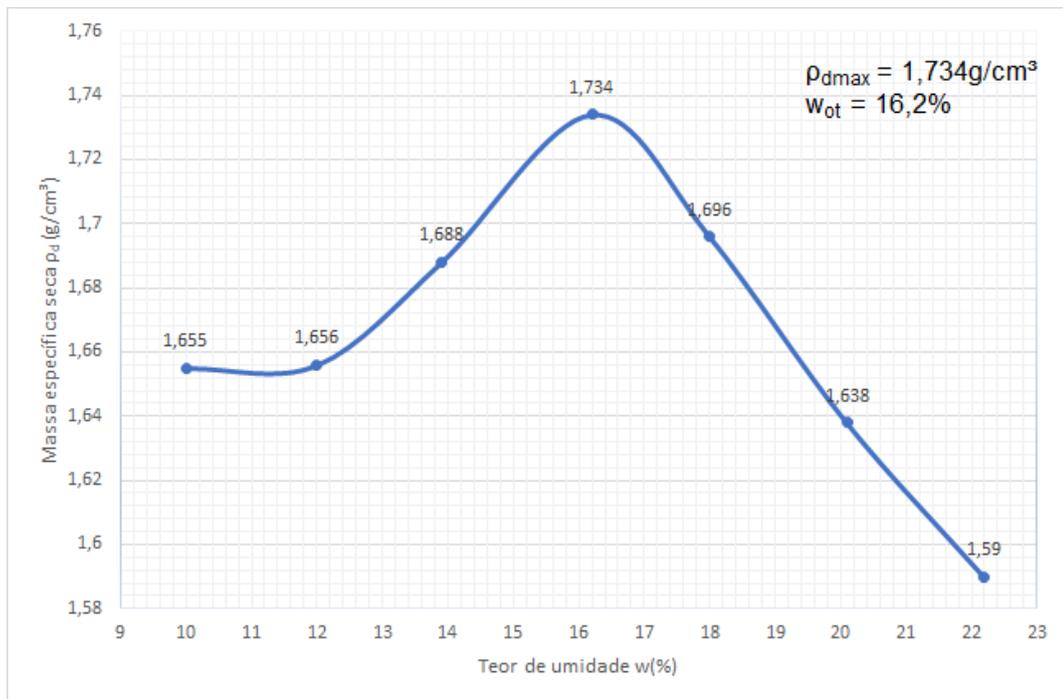


Figura 50: Ensaio de compactação Proctor Normal - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018) (Adaptado).

A Tabela 8 e as Figuras Figura 51 e Figura 52, apresentam os parâmetros obtidos nos ensaios de compactação com variação da energia de compactação. Os ensaios foram realizados com objetivo de determinar os parâmetros a serem aplicados à construção de cada fase do aterro experimental.

Tabela 8: Parâmetros obtidos nos ensaios de compactação com variação da energia  
 – segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

Parâmetros aplicados na construção de cada fase do aterro experimental				
Fases	Teor de umidade (w%)	Massa específica de campo ( $\rho_{d \text{ natural}}$ )	Massa específica seca máxima ( $\rho_{d \text{ máx}}$ )	Grau de compactação (GC%)
3	10,2	1,510	1,734	87,08
2	12,9	1,602	1,734	92,39
1	16,6	1,717	1,734	99,02
5	17,7	1,684	1,734	97,12
4	22,2	1,583	1,734	91,29

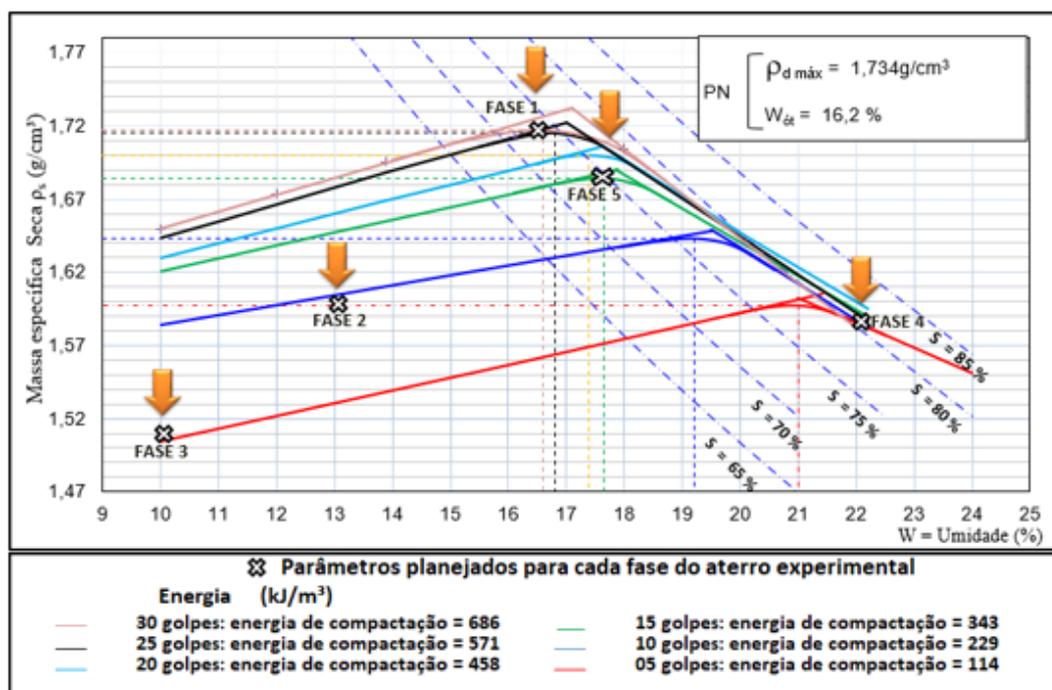


Figura 51: Curvas de compactação advindas dos ensaios realizados para obtenção dos parâmetros planejados para a construção do aterro experimental - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

É possível observar, com os resultados encontrados por Silva (2018) que o maior valor de massa específica seca se encontra na curva 1, onde o teor de umidade está muito próximo do ótimo e que recebeu 25 golpes, totalizando uma energia de 571 kJ/m<sup>3</sup> (Proctor Normal) e dessa maneira, o grau de compactação alcançado será maior nessa situação. Era de se esperar que na Fase 1 se obtivesse esse resultado, considerando que o teor de umidade aplicado foi ótimo e a energia a Proctor Normal, em conformidade com o ensaio de laboratório. As demais curvas apresentam valores pertencentes ao ramo seco (curvas 2 e 3), com valores de energia de 114 e 229 kJ/m<sup>3</sup> referentes a 05 e 10 golpes e úmido (curvas 4 e 5), com valores relativamente próximos aos encontrados na umidade ótima, relacionados a valores de energia de 114 e 343 kJ/m<sup>3</sup> referentes a 05 e 15 golpes. Também foram listadas, a cada cinco golpes, as energias de compactação aplicadas,

A Tabela 9 e a Figura 52 apresentam os parâmetros (GC% e w%) aplicados em cada fase do aterro experimental e os parâmetros obtidos nas amostras indeformadas extraídas nesse aterro.

Tabela 9: Grau de compactação e teor de umidade obtidos nas amostras indeformadas aplicados ao aterro experimental - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

Parâmetros obtidos nas amostras indeformadas			Parâmetros planejados para construção do aterro experimental			
w(%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	w(%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	GC (%)	Fases
10,1	1,477	85,8	10,2	1,510	87,08	3
13,9	1,544	89,0	12,9	1,602	92,39	2
16,2	1,720	99,2	16,6	1,717	99,02	1
17,7	1,671	96,0	17,7	1,684	97,12	5
21,0	1,601	91,7	22,2	1,583	91,29	4

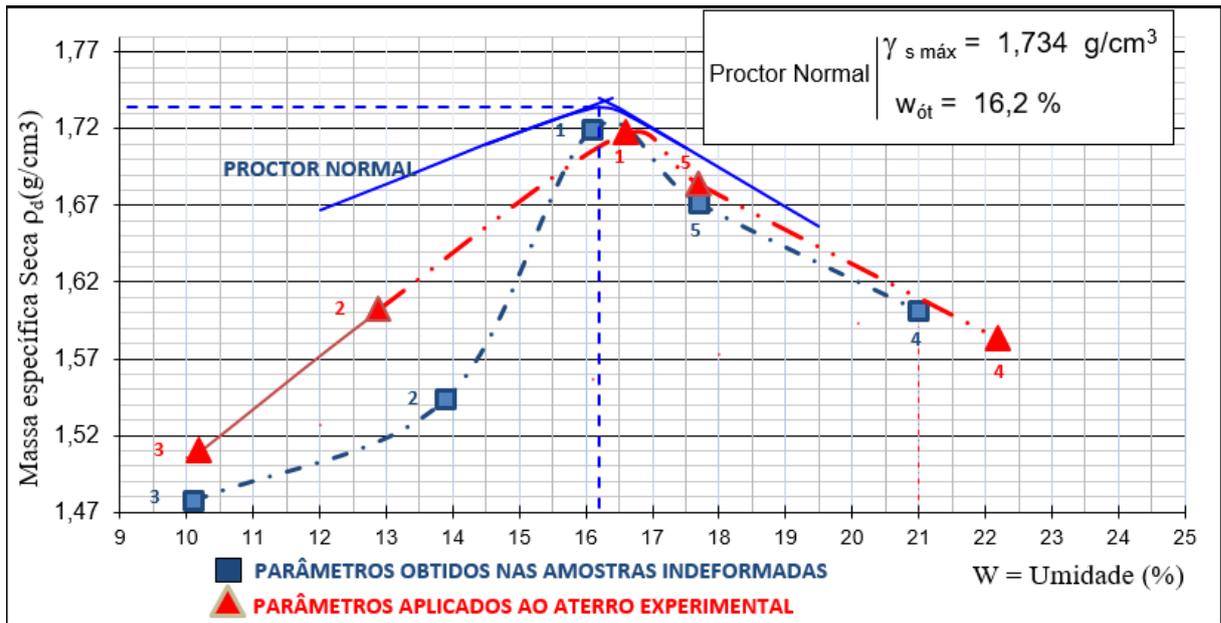


Figura 52: Parâmetros planejados x parâmetros reais - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

O autor obteve resultados um pouco divergentes entre os parâmetros obtidos nas amostras indeformadas e os resultados encontrados a partir do aterro experimental no ramo seco, com teores de umidade um pouco menores para os resultados extraídos do aterro, o que ocasionou na obtenção de valores mais altos de massa específica seca. Isso possivelmente se deve a dificuldade de umedecer de maneira homogênea o material já depositado em campo, além da exposição as intemperes como o sol e o vento, que facilitam a evaporação da água contida no material a ser trabalhado. Já os resultados encontrados mais ao centro das curvas e no ramo úmido não foi observado grande divergência entre as comparações.

Foram realizados cinco ensaios com o objetivo de se obter o Índice de Suporte Califórnia (ISC) em corpos de prova extraídos em cada uma das cinco fases do aterro experimental, através da cravação do cilindro biselado e em corpos de prova moldados a partir de amostras deformadas coletadas ao entorno das indeformadas.

O autor seguiu o que é preconizado na norma NBR9895 de junho/1987. A pressão padrão é a correspondente a um determinado tipo de pedra britada que apresenta: Índice de Suporte Califórnia - ISC de 100%

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos nos ensaios e realizados com amostras deformadas.

Tabela 10: Resultados do índice de suporte Califórnia (ISC) - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

<b>Índice de suporte Califórnia</b>					
<b>Parâmetros</b>	<b>Fases do aterro experimental</b>				
	01	02	03	04	05
Número de passadas do rolo compactador sem vibrar	-	-	1	-	-
Número de passadas do rolo compactador com vibração	24	2	-	2	4
Teor de umidade (w%)	16,0	14,4	11,1	22,2	19,2
Grau de compactação (GC%)	99,3	92,8	86,2	91,9	96,0
ISC (%) – <i>in situ</i>	20,5	2,6	1,5	4,8	13,8
ISC (%) – amostra deformada	34,0	31,0	33,0	39,0	34,0

Silva (2018) ainda ressalta que, durante a construção do aterro experimental, as condições de trafegabilidade dos equipamentos foram boas nas fases 1 e 5, regulares nas fases 2 e 3 e ruins na fase 4.

A Tabela 11 e a Figura 53 apresentam os resultados dos testes realizados no aterro experimental referentes a essa etapa.

Tabela 11: Resultados dos testes de compactação de campo realizados com rolo compactador pé-de-carneiro - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

Testes de compactação de campo com rolo compactador tipo pé de carneiro (CA25)								
Operação do rolo compactador	Número de passadas do rolo compactador	UMIDADE DO ATERRO	M + S + A	M	VOLUME DO MOLDE	MASSA ESPEC. ÚMIDA	MASSA ESPEC. SECA	GC
		%	g	g	cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	g/cm <sup>3</sup>	(%)
SEM VIBRAR	1	9,8	3.352,0	1.700,0	1.026,0	1,610	1,466	84,6
SEM VIBRAR	2	9,8	2.360,0	676,0	1.016,0	1,657	1,510	87,1
SEM VIBRAR	6	9,8	2.460,0	676,0	1.016,0	1,756	1,599	92,2
SEM VIBRAR	12	9,8	2.520,0	676,0	1.016,0	1,815	1,653	95,3
SEM VIBRAR	18	9,8	2.568,0	676,0	1.016,0	1,862	1,696	97,8
SEM VIBRAR	24	9,8	2.570,0	676,0	1.016,0	1,864	1,698	97,9
COM VIBRAÇÃO	2	14,1	2.524,0	700,0	1.002,0	1,820	1,595	92,0
COM VIBRAÇÃO	6	14,1	2.620,0	700,0	1.002,0	1,916	1,679	96,8
COM VIBRAÇÃO	12	14,1	2.660,0	700,0	1.002,0	1,956	1,714	98,9
COM VIBRAÇÃO	18	14,1	2.678,0	700,0	1.002,0	1,974	1,730	99,8
COM VIBRAÇÃO	24	14,1	2.700,0	700,0	1.002,0	1,996	1,749	100,9
COM VIBRAÇÃO	30	14,1	2.724,0	700,0	1.002,0	2,020	1,770	102,1

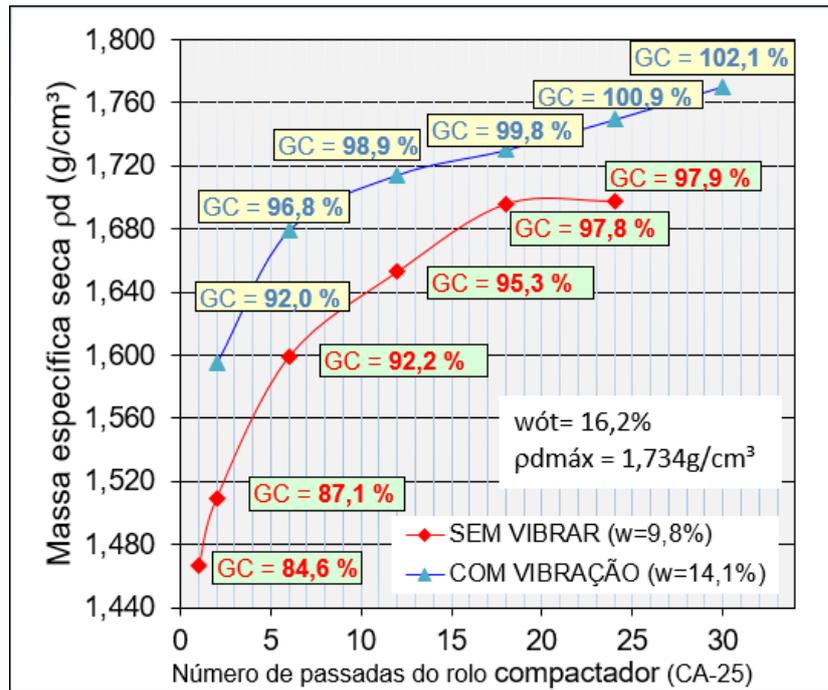


Figura 53: Massa específica seca em relação ao número de passadas do rolo compactador pé-de-carneiro - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

Os resultados supracitados alcançados por Silva (2018) evidenciam a relação entre a quantidade de passadas do rolo compactador, o aumento da massa específica (seca e úmida) e, principalmente, o grau de compactação. A maior parte dos resultados encontrados pelo autor foram diretamente proporcionais para o rejeito de minério de ferro estudado, ou seja, aumentando-se o número de passadas do equipamento, aumentou-se gradativamente a massa específica do material e seu grau de compactação para as determinadas umidades analisadas, apesar que existe uma tendência de estabilização da curva que não recebeu vibração. Além disso, percebe-se que os valores de massa específica e grau de compactação são maiores onde os equipamentos são equipados com vibrações, devido ao rearranjo das partículas ser favorecido por meio vibratório e não só pela inserção da tensão exercida pelo equipamento.

O autor também realizou cinco análises granulométricas em que os resultados demonstram similaridade nas faixas granulométricas, conforme apresenta a Figura

54, além das cinco curvas, foi plotada também a curva granulométrica média, obtida pelo cálculo das médias das frações das cinco amostras.

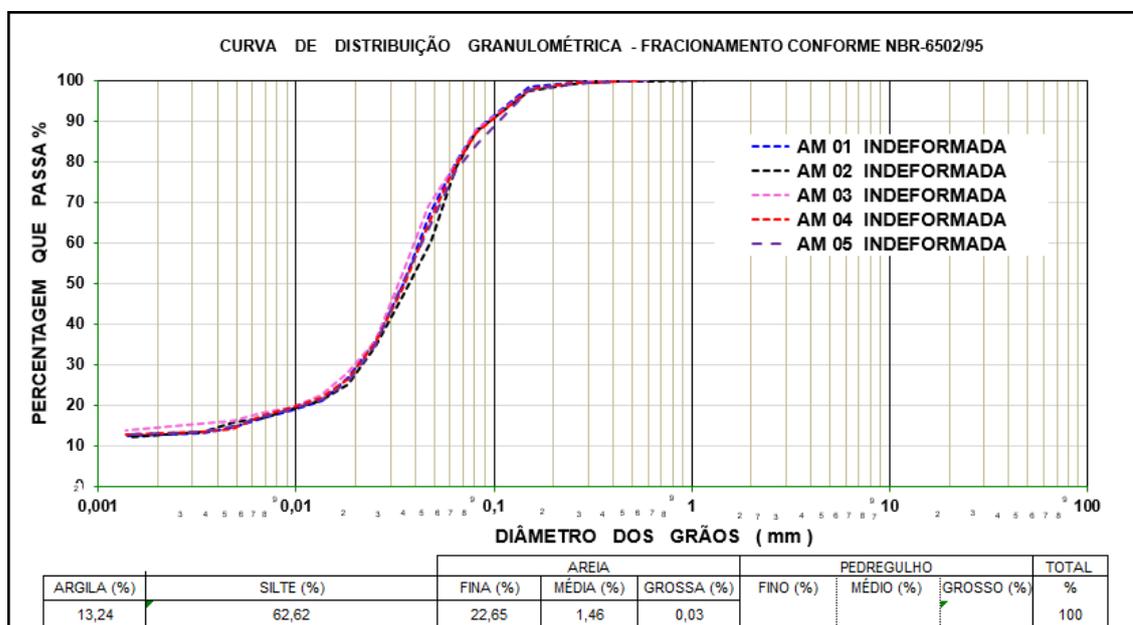


Figura 54: Resultados das análises granulométricas das cinco amostras correspondentes aos cinco blocos extraídos em aterro experimental - segunda etapa.

Fonte: SILVA (2018).

#### 4.2.3 Seção adotada para conformação do rejeito filtrado

A partir dos resultados listados por Silva (2018) na segunda etapa, o autor procurou dar um maior foco na caracterização geotécnica do rejeito de minério de ferro filtrado e compactado e, além disso, foram realizados ensaios geotécnicos e geofísicos para caracterização da fundação, cujos resultados também contribuíram para a definição das diretrizes de projeto que foram seguidos nas pesquisas do autor.

As diretrizes operacionais sugeridas para o empilhamento do rejeito filtrado estão listadas a seguir (Tabela 12 e Tabela 13) para o modelo de pilha proposto.

Tabela 12: Diretrizes operacionais sugeridas para o empilhamento rejeito de minério filtrado.

Fonte: SILVA (2018).

Aplicação na pilha	GC	w	n	e	Umidade saturação	$\gamma$	$\gamma_{\text{Sat}}$	c'	$\phi'$	c	$\phi$
	(%)	(%)	(%)	-	(%)	(kN/m <sup>3</sup> )	(kN/ m <sup>3</sup> )	(kPa)	(°)	(kPa)	(°)
Parte interna	85,80	10,1	47,3	0,90	27,28	15,95	18,44	3,92	27,45	6,86	13,05
Parte externa	96,00	17,7	40,3	0,67	22,35	19,29	20,05	7,84	35,70	272,13	32,65

Tabela 13: Diretrizes de projeto sugeridas para a geometria da pilha de rejeito filtrado.

Fonte: SILVA (2018).

Altura da pilha (m)	120,0
Talude individual do enrocamento de pé (°)	34,0
Talude individual da pilha (°)	26,5
Berma mínima (m)	8,0
Talude geral (°)	19,0

A seção então adotada pelo autor para a aplicação dos conhecimentos adquiridos nas etapas anteriores foi a seguir, exemplificada na Figura 55. A Figura 56 ilustra o modelo sugerido pelo autor para a construção da pilha, destacando a aplicação de parâmetros diferentes no interior e na parte externa da pilha, conforme apresentado na Tabela 12. Silva (2018) visou uma redução dos custos operacionais de construção da pilha, com a manutenção de fatores de segurança aceitáveis se construída dessa maneira, haja vista a redução do grau de compactação e aumento no teor de umidade presentes no material presente na parte interna da estrutura.

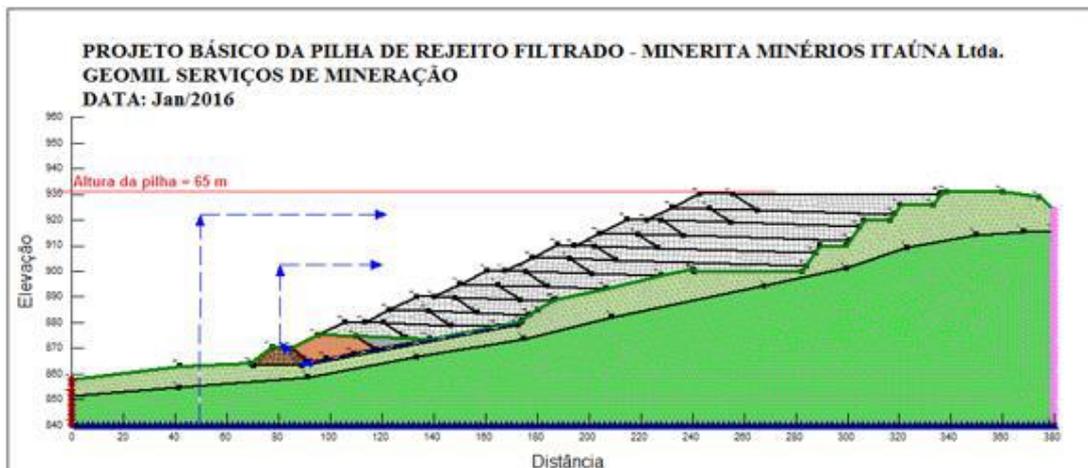


Figura 55: Projeto básico da pilha de rejeito filtrado.

Fonte: SILVA (2018).

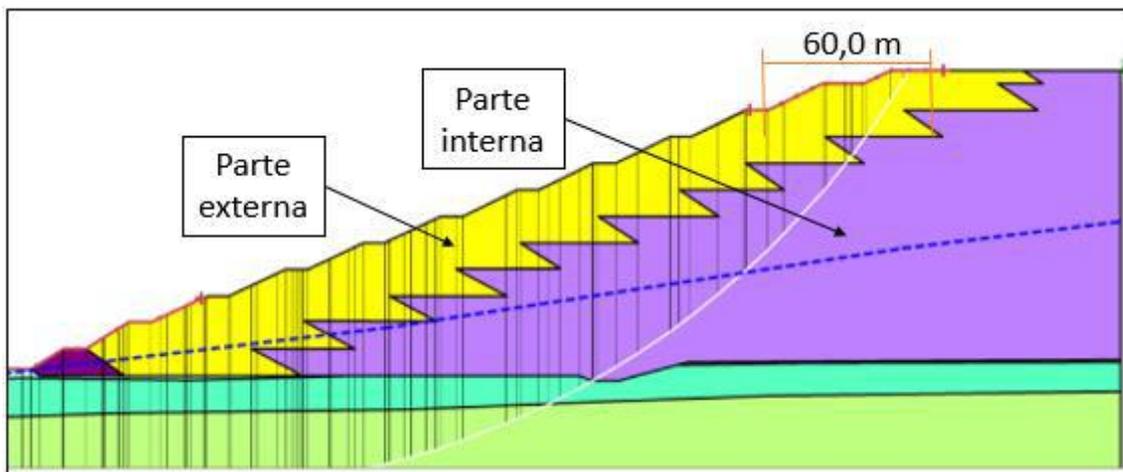


Figura 56: Modelo constitutivo sugerido para a pilha de rejeito filtrado e compactado. É possível identificar a zona estrutural em amarelo e a zona não-estrutural em lilás.

Fonte: SILVA (2018).

### 4.3 Discussão dos Resultados

No primeiro cenário, o rejeito de bauxita utilizado por Neves (2017) possui um alto teor de silte e argila (valores entre 50 e 40% respectivamente), mas pouquíssima areia em sua composição (em torno de 9 a 10%). Já o rejeito de minério de ferro utilizado por Silva (2018), deteve uma quantidade ainda maior de silte (75%) e uma porcentagem maior de areia que o primeiro (em torno de 18%), mas pouca argila (valor próximo de 7%). Diante desse cenário, os resultados de massa específica seca encontrados para cada um deles foi diferente, tendo o segundo material alcançado valores mais elevados que o primeiro.

Como observado no item 3.3, Neves (2017) atentou-se para o maior número de possibilidades possíveis de se encontrar em campo ao trabalhar com rejeitos filtrados e os seus resultados supracitados no item 4.1, evidenciam tal enfoque. Esse é de fundamental importância para as diversas situações que se pode encontrar em campo e, a partir de então, saber como trabalhar o material para alcançar os parâmetros que se deseja atingir, além de evidenciar o limite de trabalhabilidade dos equipamentos, que em geral foi de 7% de umidade acima da ótima.

Porém, Neves (2017) registrou certas variações ao dividir as camadas mais espessas em duas (pistas 2 e 3) para que a compactação fosse mais efetiva e a umidificação mais homogênea o que ocasionou inversões no que se esperava, com resultados de graus de compactação elevados na base e menores no topo. Essa constatação é de fundamental importância para as práticas de campo, sendo extremamente úteis aos engenheiros responsáveis pela construção de um aterro compactado com o uso de rejeitos de mineração filtrados.

No que diz respeito ao trabalho executado por Silva (2018), o autor procurou caracterizar de maneira ainda mais completa que Neves (2017). Ambos realizaram estudos em amostras do aterro experimental, porém Silva (2018) alçou mão de uma quantidade maior de ensaios laboratoriais, com o intuito de se obter o máximo de informações geotécnicas do material.

Comparando-se os valores de grau de compactação e massa específica seca de ambos os autores, foi possível observar que Silva (2018) obteve valores de massa

específica seca em torno de 1,50 a 1,70 g/cm<sup>3</sup>, enquanto Neves (2017) computou valores em torno de 1,25 a 1,50 g/cm<sup>3</sup>, o que confere ao rejeito de minério de ferro um material com menor volume de vazios se comparado ao rejeito de bauxita, mesmo que ambos os materiais tenham atingindo graus de compactação semelhantes entre si, girando em torno de 85 a 95%.

Silva (2018) utilizou a vibração em seu rolo compactador pé-de-carneiro por trabalhar com um material um pouco mais grosseiro que o material de Neves (2017) e assim, favorecer a compactação. Como pôde ser observado pelos resultados citados acima, esse último se tratou de um material mais plástico e menos permeável, de característica Silto Argilosa, ao passo que, o material de Silva (2018) está mais próximo de uma areia siltosa ou um silte arenoso.

Com relação a conformação final das estruturas sugeridas pelos autores, ambas possuem o mesmo princípio, contento uma parte estrutural externa, feita a partir de um rejeito filtrado com maior rigor de suas características geotécnicas, a exemplo, o grau de compactação, a massa específica, o teor de umidade e outros, e, outra parte, não estrutural, onde o material a ser compactado não necessita de tanto rigor.

Neves (2017) sugeriu uma estrutura menor quando comparada à de Silva (2018), pois possui praticamente a metade de sua altura e foi composta por bermas menores. Isso se dá pelas características supracitadas do rejeito, em que tais parâmetros são de fundamental importância para que se possa projetar e construir estruturas geotécnicas estáveis.

## 5 CONCLUSÕES

A construção de aterros compactados com o uso de rejeitos de mineração filtrados ainda pode ser considerado um tema em desenvolvimento e necessita de outras pesquisas para se consolidar, apresentando-se como uma alternativa considerável para muitas dificuldades encontradas no setor minerário. Uma observação importante é que o rejeito não vem da planta de beneficiamento de forma homogênea, ou seja, há sempre uma necessidade de adaptação dos parâmetros exigidos ao produto que a mineradora visa obter e a consequência é observada no rejeito gerado em cada processo. Nesta pesquisa buscou-se elucidar alguns pontos importantes para a construção e manejo de rejeito de mineração filtrado e, promover assim, maiores discussões sobre o tema, com diferentes focos e abordagens de pesquisas.

Pelos resultados encontrados na realização dos estudos advindos da construção dos aterros experimentais de cada estudo, a compactação do resíduo de bauxita em campo, com o auxílio do equipamento de esteiras D-6, realizado por Neves (2017) e os resultados obtidos por Silva (2018) em rejeito de minério de ferro, com o uso do rolo compactador pé-de-carneiro, pôde-se observar a boa trabalhabilidade dos materiais na compactação. Ambos possuem faixas granulométricas diferentes, o que consequentemente interfere a trabalhabilidade do material e os resultados que se pode alcançar com cada um deles, apesar de ambos se tratarem de rejeitos finos.

Neves (2017) encontrou maiores dificuldades quando trabalhou com camadas mais espessas (40 e 50 cm) e quando o teor de umidade do material foi próximo de 7% acima da umidade ótima, porém, ter identificado esse limite em um experimento prévio faz com que novas pesquisas e testes com aterros experimentais possam ser realizados. Por outro lado, a prática de filtragem e construção de aterros compactados com o uso de rejeito de minério de ferro é menos comum se comparada a essa mesma prática com rejeito de bauxita, logo Silva (2018) precisou realizar mais testes em seu material para compreender melhor sua resposta nesse determinado tipo de situação.

Como pôde ser observado nos trabalhos dos dois autores analisados, foi possível a obtenção de razoáveis graus de compactação, com relação a energia do ensaio Proctor Normal, à medida que são respeitados os limites de trafegabilidade das praças

de compactação e atendimento das condições de homogeneidade dos aterros. Proporciona-se assim, um aumento do peso específico seco e do grau de compactação, mesmo se tratando de rejeitos diferentes.

Ambos os autores estudados propõem construir pilhas heterogêneas, uma mais compactada na parte externa, de forma a proporcionar uma barreira para a deposição de outra menos compactada no interior da pilha. Essa forma de dispor o material pode ser uma boa alternativa para redução dos custos operacionais e auxilia bastante nos trabalhos de campo.

A análise prévia das características geotécnicas da fundação é de extrema importância pois ela será o suporte para todo o material a ser depositado, além de possibilitar ou não que a água permeie por ela. Além disso, não se pode deixar de lado as condições climáticas da região pois esse fator é determinante para a viabilidade de um empreendimento que utilize essa forma de dispor rejeito.

Ressalta-se ainda que a operação deve ser feita de modo a não permitir que haja saturação do aterro, onde esse deve ser devidamente instrumentado para que haja o controle das poropressões. A metodologia utilizada para avaliação da compactação dos resíduos desaguados por filtro prensa apresentou-se bastante eficaz para a determinação de diversos parâmetros, que são bastantes úteis para as demais análises geotécnicas.

## **5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros**

Diante do exposto, é necessário que as indústrias aproveitem ao máximo as áreas disponíveis para disposição dos materiais, devido às restrições ambientais para licenciamento de novas áreas relativos a este fim. Sendo assim, é de fundamental importância que o conhecimento de métodos alternativos de disposição de rejeitos seja aprimorado cada vez mais, que ele proporcione um melhor aproveitamento das áreas e apresente um potencial de dano ambiental sempre menor. A tecnologia empregada com o uso dos filtros prensa é relativamente nova e ainda é necessário um maior investimento nos equipamentos e conhecer mais sobre as características geotécnicas dos materiais a serem dispostos dessa maneira.

Por conseguinte, alguns tópicos são sugeridos com o intuito de serem estudados futuramente:

- Realizar mais testes em aterros experimentais com diferentes umidades, número de passadas para compactação e espessura das camadas para diferentes tipos de rejeito;
- Construir aterro experimental para avaliação do melhor modelo de equipamento, em função da pressão exercida no material no momento da compactação, bem como da análise da velocidade das passadas;
- Avaliar o custo-benefício da utilização de diferentes equipamentos para compactação, em função do número de passadas e das espessuras das camadas de material solto para a obtenção dos parâmetros que se deseja alcançar;
- Realizar ensaios de campo ou por meio de modelo reduzido em laboratório para simular a condição do aterro em período de chuva, verificando assim se ela irá se saturar ou gerar possíveis zoneamentos;
- Analisar os parâmetros de resistência dos diversos rejeitos em outras faixas granulométricas, individualmente e agrupadas com as variações de cada faixa granulométrica na composição da amostra;
- Propor um “*blend*” dos rejeitos gerados na intenção de se obter uma curva granulométrica que apresente os melhores parâmetros de resistência e necessite de uma menor energia de compactação;
- Propor estudos que analisem a geometria da disposição final do material e sua influência no balanço de massa, além de analisar a limitação quanto a altura dessa geometria;
- Analisar via simulação numérica de possíveis recalques diferenciais entre a zona estrutural e a zona não estrutural com o passar do tempo;
- Realizar estudos de percolação de água superficial e subterrânea e as possibilidades de interferências na estrutura da pilha de rejeito filtrado.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, P. I. (2020). Empilhamento de Rejeito Filtrado: A Expansão de uma Alternativa para a Substituição de Barragens. *Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Engenharia Mineral. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. p. 114.*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). *NBR 7185: Solo - Determinação da massa específica aparente, "in situ", com emprego do frasco de areia.*
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1991). *NBR 12102 MB 3443: Solo - Controle de compactação pelo método de Hilf.* Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2012). *NBR 16097: Solo - Determinação do teor de umidade - Métodos expeditos de ensaio.*
- BOMAX. (s.d.). *Catálogo de Filtros-Prensa Prensamax. Taboão da Serra, São Paulo, 2014.* Acesso em 2021, disponível em Bomax do Brasil: <https://www.bomax.com.br/produtos/item/filtros-prensa-prensamax>
- BOSCH, D. W. (1987). *Retreatment of residues and waste rock. Extractive Metallurgy of Gold in South Africa. p. 707-743.*
- CARNEIRO, A., & FOURIE, A. (2018). A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia. *In: RJ Jewell & AB Fourie (eds), Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth,, pp. Anais[...] p. 439-454.*
- CRISPIM, F. A. (2007). *Compactação de Solos: Influência de métodos e de parâmetros de compactação na estrutura dos solos. Viçosa, Minas Gerais, Brasil. p. 98.*
- CRYSTAL, C., CHORE, C., & EZAMA, I. (2018). *Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience.* Fonte: In: *Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, Anais.:*

<https://www.srk.com/en/publications/filter-pressed-dry-stacking-design-considerations-based-on-practical-experience>. p. 209-2019

DAVIES, M. P. (2011). *Filtered Dry Stacked Tailings - The Fundamentals*. Acesso em 2021, disponível em [https://www.researchgate.net/publication/325976393\\_Filtered\\_Dry\\_Stacked\\_Tailings-The\\_Fundamentals](https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals). p. 10

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. (1994). *DNER-ME 052/94: Solos e agregados miúdos - determinação da umidade com emprego do "Speedy"*.

DNIT. (2010). *Manual de Implementação Básica de Rodovia*. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias. 3ª ed. 617p.

ERAZO LOZANO, F. A. (2006). Seleção de locais para barragens de rejeitos utilizando o método de análise hierárquica. *Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Estruturas e Fundações. São Paulo, São Paulo, Brasil. p. 128.*

FERNANDES, M. D. (2016). *Mecânica dos solos: conceitos e princípios. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil. p. 442.*

FERRANTE, F. (2014). Estudo de viabilidade para recuperação de minério de ferro em rejeitos contidos em barragens. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral – Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. p. 86.*

GOMES, M. A. (2009). Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro. *Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. p. 220.*

GOMES, R. B., DE TOMI, G., & ASSIS, P. S. (10 de Junho de 2016). Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine, Brazil. *Journal of Materials Research and Technology*, pp. 339-344.

- GUIMARÃES, N. C. (2011). Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando sua disposição em pilhas. *Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. p. 129.*
- GUIMARÃES, N. C., VALADÃO, G. E., & PERES, A. E. (Dezembro de 2012). Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. *Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 543-548.*
- IBRAM. (2016). *Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 128p.*
- INSTITUTO MINERE. (19 de Janeiro de 2021). *O mínimo que você precisa saber sobre projetos de pilhas de rejeito filtrado.* Acesso em 01 de Julho de 2021, disponível em <https://institutominere.com.br/blog/O-minimo-que-voce-precisa-saber-sobre-projetos-de-pilhas-de-rejeito-filtrado>
- LUZ, A. B., & LINS, F. A. (2010). *Introdução ao Tratamento de Minérios (5ª ed.)*. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. p. 21.
- MEND. (2017). Mine Environment Neutral Drainage Project. MEND Report 2.50.1. *Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC). Canadá. p. 164.*
- MINING MAGAZINE. (04 de 2017). Acesso em 2021, disponível em Stacking up the benefits: <https://www.miningmagazine.com/life-cycle-end-of-life-management/news/1264279/stacking-benefits>
- NEVES, M. C. (16 de Outubro de 2017). Caracterização geotécnica e avaliação do comportamento de um resíduo filtrado da produção de alumina (lama vermelha) estocado na forma de aterro densificado. *Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. p. 155.*
- OLIVEIRA-FILHO, W. L. (2017). Manejo de Estéreis e de Rejeitos de Mineração. Notas de aula. MIN741. *Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.*

- OLIVEIRA-FILHO, W. L., & ABRÃO, P. (2015). Disposição de rejeitos de mineração. *Geotecnia Ambiental*. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier.
- PEIXOTO, C. L. (2012). Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. p. 108.*
- PINTO, C. D. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil. p. 367.*
- PORTES, A. M. (2013). Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. p. 180.*
- PRATA, B. D., NOBRE JÚNIOR, E. F., & BARROSO, G. C. (21 de Outubro de 2005). MODELAGEM DE SISTEMAS DE TERRAPLENAGEM: UMA APLICAÇÃO DAS REDES DE PETRI. *Center of Research in Logistics, Transport and Development - NUPETD, Federal University of Ceará, Ceará, Brazil., p. 15.*
- RITCEY, G. M. (1989). Problems and solutions in the mining industry. Tailings Management: Elsevier Science Publishers.
- SILVA, L. J. (2018). DIRETRIZES DE PROJETO DE SISTEMA DE EMPILHAMENTO DE REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO FILTRADO E COMPACTADO CASO ESTUDO: MINERITA MINÉRIOS ITAÚNA. *Mestrado Profissional Em Engenharia Geotécnica Da UFOP. Universidade Federal De Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. p. 265.*
- SILVA, L. R. (2008). COMPACTAÇÃO DO SOLO. Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Civil da Universidade São Francisco. Itatiba, São Paulo, Brasil. p. 44.
- SLR, C. (11 de 2016). Schedule 2 Assessment of Alternatives for Mine Waste Management, Magino Gold Project. Prodigy Gold, Inc. Markham, ON. Ontario, Canadá. p. 98 .

- VICK, S. G. (1983). Planning, design, and analysis of tailing dams. John Wiley & Sons, New York.
- WILLIAMS, R. Z., & O'BRIEN, S. (2017). Filtered tailings adds value in cost competitive industrie. *in A Wu & R Jewell (eds), Proceedings of the 20th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, University of Science and Technology Beijing*, pp. 363-370.
- YAMASHITA, L. M. (2010). Mecanização Agrícola. Manaus, Brasil: Instituto Federal Amazonas - IFAM em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. p. 116.