



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS**



Douglas Bruno de Oliveira

**EMPILHAMENTO DE REJEITO ARENOSO FILTRADO: COMPARAÇÃO ENTRE
TÉCNICAS DE COMPACTAÇÃO COM TRATOR DE ESTEIRA E ROLO
COMPACTADOR**

Belo Horizonte

2024

Douglas Bruno de Oliveira

**EMPILHAMENTO DE REJEITO ARENOSO FILTRADO: COMPARAÇÃO ENTRE
TÉCNICAS DE COMPACTAÇÃO COM TRATOR DE ESTEIRA E ROLO
COMPACTADOR**

Monografia de especialização apresentada à
Escola de Engenharia Departamento de
Engenharia de Minas da Universidade Federal
de Minas Gerais, como requisito parcial à
obtenção do título de Especialista em
Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Professor Leandro Azevedo da
Silva

Belo Horizonte

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MINAS
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MONOGRAFIA/ARTIGO

Aos vinte e três dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e quatro, de 08h:00min às 11h:15min, o estudante Douglas Bruno de Oliveira, matrícula 2023662499, defendeu o Trabalho intitulado “**Empilhamento de Rejeito Arenoso Filtrado: Comparação entre Técnicas de compactação com Trator de Esteira e Rolo Compactador**”.

Participaram da banca examinadora os professores abaixo indicados, que, por nada mais terem a declarar, assinam eletronicamente a presente ata.

Nota: 88

Situação: Aprovado

Orientador: Professor Leandro Azevedo da Silva

Examinadora: Professora Dinalva Celeste Fonseca

Examinadora: Professora Viviane da Silva Borges Barbosa



Documento assinado eletronicamente por **Leandro Azevedo da Silva, Usuário Externo**, em 17/01/2025, às 15:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Viviane da Silva Borges Barbosa, Professora do Magistério Superior**, em 18/01/2025, às 07:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Dinalva Celeste Fonseca, Usuária Externa**, em 02/02/2025, às 13:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3819399** e o código CRC **7991DC45**.

AGRADECIMENTOS

Minha gratidão aos colegas de classe, que ao longo desses quase dois anos compartilharam suas experiências e conhecimentos, ampliando meu entendimento sobre o vasto e desafiador mundo da mineração.

Um agradecimento especial aos professores, que com paciência, excelência técnica e didática, transmitiram cada disciplina de forma assertiva e pedagógica. Destaco aqui o Prof. Leandro Azevedo da Silva, pela orientação cuidadosa e precisa, e as Profas. Viviane Borges Barbosa e Dinalva Fonseca, que compuseram a banca de avaliação e contribuíram de forma valiosa para o aprimoramento do meu trabalho.

Também não posso deixar de mencionar a Samarco Mineração, que apoiou e permitiu o desenvolvimento do meu trabalho final dentro de uma área em que atuo com tanto orgulho. Um reconhecimento especial à equipe de Geotecnia, em especial ao André Borges Coutinho e ao Renato Marques, pelo apoio técnico, operacional e pelas discussões enriquecedoras dos resultados. Minha gratidão também ao meu gestor, Airtton Silva, que me incentivou desde o início nesta empreitada.

Deus, família e amigos! Gratidão intrínseca em tudo que faço! São construtores do que fui, sou e serei!

Encerrar mais uma etapa na Universidade Federal de Minas Gerais, uma instituição pela qual tenho tanto orgulho, é motivo de muita felicidade! Obrigado, UFMG, por ser parte da minha jornada!

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso investiga o empilhamento de rejeitos arenosos filtrados, comparando duas técnicas distintas de compactação: a compactação com trator de esteira e com rolo compactador. A indústria de mineração, de grande relevância econômica, contribui para o desenvolvimento dos países, mas gera grandes volumes de rejeitos que precisam ser dispostos de forma adequada para mitigar riscos ambientais e sociais. Com foco em técnicas de disposição a seco (dry stacking), o estudo explora as metodologias de compactação visando aumentar a estabilidade das pilhas e diminuir o impacto ambiental, utilizando rejeitos oriundos de processos de filtragem. O trabalho foi conduzido em campo com a subdivisão de uma praça de testes e a realização de amostragens para análise de densidade e grau de compactação das camadas de rejeito, tanto na base quanto no topo. A pesquisa considerou os custos operacionais, a produtividade e a uniformidade dos resultados para ambos os métodos. Observou-se que o rolo compactador proporciona maior eficiência em termos de custo e maior densidade em alguns pontos, mas com maior variabilidade, enquanto o trator de esteira apresenta uma compactação mais uniforme, embora menos intensa. Conclui-se que ambas as técnicas têm vantagens e desvantagens específicas e que a escolha do método deve considerar as características do solo, o tipo de rejeito e os objetivos de estabilidade estrutural. Este estudo contribui para a otimização da disposição de rejeitos, fornecendo dados técnicos para a tomada de decisão em projetos de engenharia geotécnica e ambiental.

Palavras-chaves: empilhamento de rejeitos filtrados; compactação de rejeitos; disposição de rejeitos a seco (dry stacking); técnicas de compactação; trator de esteira; rolo compactador; gestão de resíduos de mineração.

ABSTRACT

This final paper investigates the stacking of filtered sandy tailings, comparing two distinct compaction techniques: bulldozer compaction and roller compactor. The mining industry, a significant economic driver, contributes to the development of nations but also generates large volumes of waste that require proper disposal to mitigate environmental and social risks. Focusing on dry stacking techniques, this study explores compaction methodologies aimed at increasing the stability of waste piles while reducing environmental impact, using filtered waste materials. Fieldwork was conducted by subdividing a test yard and performing density and compaction degree sampling of tailings layers at both the base and top levels. The research considered operational costs, productivity, and uniformity of results for both methods. Findings indicate that the roller compactor provides higher efficiency in terms of cost and density in certain points, though with greater variability, while the bulldozer offers more uniform compaction but with less intensity. The study concludes that both techniques have specific advantages and drawbacks, and that the choice of method should take into account soil characteristics, type of waste, and stability objectives. This research contributes to the optimization of tailings disposal, providing technical data to aid decision-making in geotechnical and environmental engineering projects.

Keywords: filtered tailings stacking; tailings compaction; dry stacking of tailings; compaction techniques; bulldozer; roller compactor; mining waste management.

Lista de Tabelas

Tabela 4.1: Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos (Guimarães, 2011)	16
Tabela 4.2: Mecanismos de filtragem (Adaptado de Guimarães, 2011).....	18
Tabela 6.1: Resultados das amostras	39
Tabela 6.2: Custos e Produtividades	49

Lista de Figuras

Figura 3.1- Distribuição esquemática dos testes em campo.....	13
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de algumas minerações do Quadrilátero Ferrífero (Guimarães, 2011)	15
Figura 4.2: Representação simplificada da montagem - teste de folha (Guimarães, 2011).....	18
Figura 4.3 : Filtro de disco convencional (Guimarães, 2011)	19
Figura 4.4 : Filtro de disco à vácuo vertical	19
Figura 4.5 : Filtro de disco à hiperbárico	20
Figura 4.6 : Esquema de filtro horizontal de correia.....	21
Figura 4.7 : Filtro horizontal de correia	21
Figura 4.8 : Filtro prensa de placas verticais.....	22
Figura 4.9 : Filtro prensa de placas horizontais	23
Figura 4.10 : Formatos de pilhas mais comuns (Wahler 1979, apud Hawley & Cuning, 2017)	25
Figura 5.1 : Vista da PDRE SUL	27
Figura 5.2 : Localização da praça 22 G.....	28
Figura 5.3 : Marcações topográficas	28
Figura 5.4 : Compactação com trator de esteira e rolo compactador	29
Figura 5.5 : Compactação com rolo compactador Hamm 3520_20 t.....	29
Figura 5.6 : Compactação com rolo compactador: Acabamento da praça	30
Figura 5.7 : Compactação com trator de esteira CAT D10T.....	30
Figura 5.8 : Compactação com trator de esteira: Acabamento da praça	31
Figura 5.9 : Efeito provocado pela garra do trator de esteira na superfície da camada compactada	31
Figura 5.10 : Possível perda de referência provocada pelas marcas da esteira	32
Figura 5.11 : Amostragem em campo	32
Figura 5.12 : Abertura de local para amostragem	33
Figura 5.13 : Cravação do cilindro e medição	33
Figura 5.14 : Visão da área de testes e pontos de amostragens PDRE Sul	34
Figura 5.15 : Vista panorâmica lateral da área de teste PDRE Sul	34
Figura 6.1 : Curva granulométrica do material do teste	35
Figura 6.2 : Curva granulométrica do material do teste versus histórico	35
Figura 6.3 : Curva Proctor Normal	37
Figura 6.4 : Grau de Compactação Topo e Base para cada equipamento	40
Figura 6.5 : Grau de Compactação para cada equipamento	40
Figura 6.6 : Analise Box Plot.....	41

Sumário

1 – Introdução:	9
2 – Objetivos	11
3 – Metodologia	12
4 – Revisão Bibliográfica	14
4.1 Conceito de Rejeitos	14
4.2 Métodos de Disposição de Rejeitos	16
4.3 Filtragem	17
4.3.1 Filtro de Disco Convencional	19
4.3.2 Filtro de Disco Hiperbárico	20
4.3.3 Filtro Horizontal de Correia	21
4.3.4 Filtro Prensa em Placas Verticais	22
4.3.5 Filtro Prensa em Placas Horizontais	23
4.4 Codisposição e Disposição Compartilhada	23
4.5 Exemplos de Aplicação	24
4.6 Rejeitos Dispostos em Pilhas	24
5 – Desenvolvimento dos Testes	26
5.1 Marcações de praças	27
5.2 Compactação do solo	28
5.2.1 Compactação com rolo	29
5.2.2 Compactação com trator de esteira	30
5.2 Amostragem e testes	32
6 – Resultados e Análises	34
6.2 Análise Granulométrica	34
6.3 Compactação	36
6.4 Análise dos resultados	43
6.4.1 Motivos da maior variabilidade no uso de rolo compactador	43
6.4.2 Motivos das maiores compactações com rolo compactador	46
6.4.3 Análise técnico econômica comparativa	48
7 – Conclusões	51
8 – Sugestões para Pesquisas Futuras	52
9 – Referências Bibliográficas	54

1 – Introdução:

A economia nos países em desenvolvimento é fortemente influenciada pela indústria de exploração de recursos naturais, como a extração mineral, a agricultura e a pecuária, atividades consideradas como setor básico da economia no país, pois promovem desenvolvimento, geram empregos e até o surgimento de novas cidades.

A atividade mineradora tem grande importância no cenário mundial e nacional, contribuindo amplamente para o desenvolvimento econômico dos países. Com o decorrer dos anos este ramo tem buscado novas tecnologias, possibilitando a implantação de maiores plantas de exploração e, por conseguinte, o aumento na produção de minérios. De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2018), somente no Brasil, a produção mineral atingiu um valor de US\$ 32 bilhões no ano de 2017, representando quase 16.8 % do PIB industrial do país.

Todavia, ao mesmo tempo em que a progressão tecnológica possibilita um acréscimo de produção e maiores avanços em menores períodos de tempo, ela também desencadeia um incremento na geração de rejeitos. De acordo com um estudo realizado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada IPEA (2012), a produção anual de rejeitos de mineração, no Brasil, aumentou de 202 milhões de toneladas no ano de 1996, para 290 toneladas em 2005. Este mesmo estudo aponta para uma perspectiva de geração de rejeitos de mineração de 348 milhões de toneladas em 2010, chegando a 684 milhões de toneladas em 2030.

Uma das grandes preocupações frente a este cenário vincula-se ao método de disposição dos rejeitos de mineração. No Brasil, a metodologia rotineiramente adotada durante o desenvolvimento da atividade mineral, constitui-se no armazenamento através de reservatórios contidos por diques ou barragens, em muitos casos alteados à montante. Após o processo de beneficiamento, os rejeitos gerados são transportados hidraulicamente até os depósitos. A grande quantidade produzida faz com que o armazenamento ocupe áreas bastante extensas, desencadeando sérios impactos ambientais na região na qual são implantados. Além disso, a segurança das estruturas de contenção destes depósitos deve ser garantida, uma vez que, eventuais rupturas podem acometer muitos quilômetros, comprometendo o meio ambiente e trazendo riscos de perdas humanas.

Neste contexto, em 2010, o Ministério do Meio Ambiente brasileiro criou a lei número 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, prevendo a destinação ambientalmente adequada de rejeitos. Desta forma, conforme recomendado pelo relatório do IPEA (2012), o sistema de disposição destes elementos deve ser regido por soluções adequadas de engenharia. Tais soluções devem garantir a estabilidade das estruturas de contenção, através de controle das condições piezométricas e de resistência dos materiais envolvidos e, por conseguinte, reduzir os impactos ambientais.

A disposição de rejeitos atualmente é um dos maiores desafios relacionados à mineração. Após as rupturas das barragens das minas Germano e Córrego do Feijão esse problema se tornou ainda mais evidente, principalmente para a parcela da sociedade desacostumada com os assuntos em torno da mineração. Se a atividade mineira já vinha sendo bastante questionada no período que sucedeu a ruptura da Barragem de Fundão, após o desastre no município de Brumadinho, a imagem, já desgastada, da mineração tornou-se ainda pior aos olhos da sociedade civil. As críticas e cobranças ao setor tornaram-se mais constantes e evidentes, apesar de que nem sempre tenham sido acompanhados de embasamento técnico e dados concretos. Todavia, não se pode criticar a sociedade civil por cumprir o seu papel de cobrar de autoridades e do setor mineral para que estes se esforcem na promoção do desenvolvimento sustentável, por meio de técnicas mais seguras e menos danosas. Cabe ao setor mineral, aos centros de pesquisa e universidades estudar as técnicas existentes e pesquisar novas possibilidades, em resposta aos anseios da sociedade e mesmo como compromisso inerente às suas atividades.

A ruptura da barragem de Fundão, em novembro de 2015, no estado de Minas Gerais, alertou ainda mais para a necessidade de investigação e estudo de engenharia nestes materiais. De acordo com a Agência Brasil (2015), o rompimento desta barragem provocou o lançamento de 34 milhões de metros cúbicos de lama, provenientes da produção do minério de ferro, no meio ambiente. Além disso, deixou famílias desabrigadas e mortos, sendo considerado, até então, um dos maiores desastres ambientais que já ocorreram no país.

Morgenstern et al (2016) apresentou um relatório detalhado para a avaliação das possíveis causas do rompimento desta barragem, salientando como a provável ocorrência de ruptura, o fluxo por liquefação. O fenômeno de liquefação ocorre quando um aumento repentino de poropressões é capaz de anular as tensões efetivas do material, fazendo-o perder totalmente a sua estrutura (LAMBE e WHITMAN, 1969). Este aumento de poropressões pode ser

provocado por agentes sísmicos ou gatilhos pontuais estáticos (taludes instáveis, mudança do nível do lençol freático, construção incremental de aterros, deformação de camadas adjacentes de solos de baixa resistência, entre outros), desencadeando uma instabilidade local que pode se estender por extensas áreas, sendo então chamada de fluxo por liquefação (SMITH, 2002). As características de alta saturação, baixa plasticidade e alta compressibilidade dos rejeitos no interior dos reservatórios, aumentam a probabilidade de ocorrência de rupturas desencadeadas por este fenômeno.

Após a ruptura da Barragem de Córrego do Feijão, a cada dia ficam evidenciadas informações e notícias que indicam mudanças na maneira de lidar com os rejeitos (sobretudo os de mineração), seja por iniciativa das próprias empresas, seja por iniciativa de órgãos reguladores, a partir da imposição de novas regras e nova legislação. Toda essa atual movimentação leva a crer que mudanças profundas no manejo de rejeitos de mineração, sobretudo no Brasil, estão por vir. A preocupação com relação a esse assunto, que já era grande, se tornou ainda maior. As ocorrências citadas fizeram com que fosse disparado o gatilho de uma inevitável mudança de postura. Dentro desse contexto, considerando a atual movimentação do setor mineral em busca de técnicas alternativas de disposição de rejeito, o trabalho aqui proposto procura realizar um estudo a respeito do método de disposição de rejeito filtrado (dry stacking), e apresentar exemplos de locais onde esse método já vem sendo utilizado ou projetado. Dentro desses exemplos procura-se descrever a maneira como determinados empreendimentos vêm realizando esse método, verificar particularidades observadas na execução do mesmo e, em alguns casos, levantar comparações de custos entre as possibilidades. São examinadas características e práticas que podem ser vantajosas para aplicação da técnica e podem, ainda, auxiliar os engenheiros na tomada de decisões relacionadas ao empilhamento de rejeitos filtrados.

2 – Objetivos

Os objetivos deste trabalho são: realizar estudo comparativo de disposição de rejeitos a seco usando equipamentos de grande porte tais como caminhões do tipo CAT 789 D, trator de esteira CAT D10, motoniveladoras do tipo CAT 16 M e rolo compressores. Testar a compactação do solo, após transporte e espalhamento do rejeito usando equipamentos fora de estrada trator de esteira CAT D10T e rolo compactador do tipo Hamm 3520_20 t comparando e descrevendo a possível variabilidade de cada tipo.

3 – Metodologia

Inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica a respeito do assunto de rejeitos e disposição de rejeitos, filtragem de rejeito, reunindo informações fundamentais ao entendimento dessas técnicas.

Será realizado em campo, na PDR Sul um teste que consistirá em avaliar a compactação de praças feitas usando trator de esteira D10 e Rolo compactador e a possível variabilidade deles entre si e dentro da própria praça de trabalho.

Usaremos uma praça operacional normal, na mesma camada de trabalho de 0,75 m onde dividiremos uma praça de 100 x 65 m em 4 quadrantes. Dois destes quadrantes iremos compactar com trator de esteira e dois com rolo compactador.

Realizaremos a compactação de quatro subpraças de 32,5 x 50 m, sendo duas subpraças com trator de esteira e outras duas com rolo compactador.

Em cada subpraça (quadrante), após a compactação, realizaremos testes em 5 pontos aleatórios com o cilindro, tanto no topo quanto na base, totalizando 10 testes por subpraça. Além disso, faremos um teste Hilf em cada quadrante e uma caracterização completa da praça mãe.

Cada um destes pontos aleatórios deverá ser referenciado espacialmente.

Abaixo um resumo e um esquema dos testes:

- 5 Pontos aleatórios em cada quadrante (referenciar cada um);
- 10 Cilindros em cada subpraça para topo e base;
- 40 Cilindros totais: 20 para subpraças do TR e 20 para subpraças do rolo compactador;
- 1 Hilf para cada quadrante;
- 1 Caracterização completa.

Esquema dos testes:

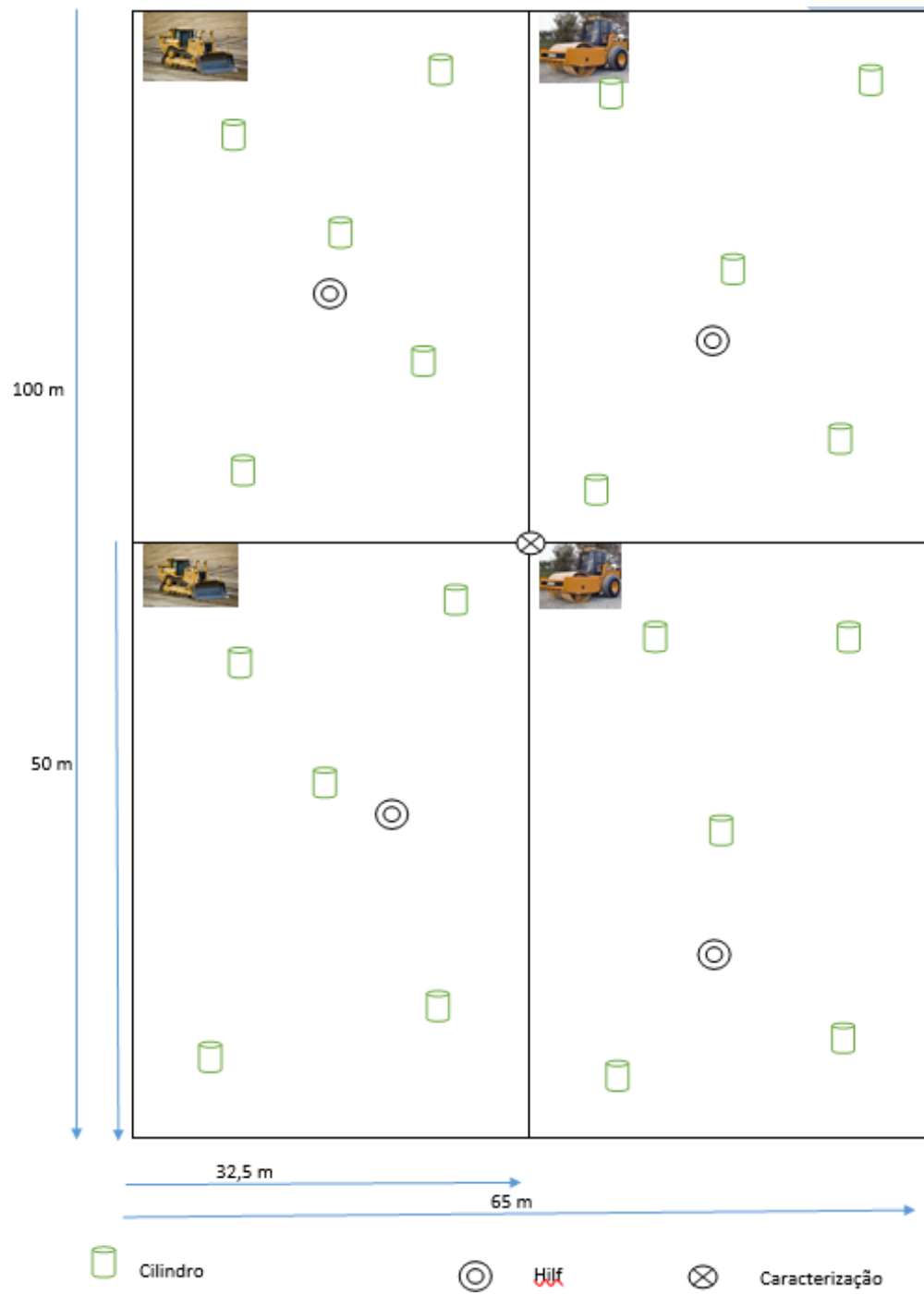


Figura 3.1- Distribuição esquemática dos testes em campo

4 – Revisão Bibliográfica

4.1 Conceito de Rejeitos

Os rejeitos de mineração são materiais resultantes do processo de beneficiamento de minérios que precisam ser descartados de forma controlada, dado seu baixo valor econômico e seu potencial impacto ambiental.

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

Os rejeitos de minério de ferro podem ser classificados em duas categorias principais: rejeitos finos e granulares. Embora haja a presença de frações finas nos rejeitos resultantes do processo de beneficiamento do minério de ferro, estudos como os de Mendes (2008), Gomes (2009b), Milonas (2006) e Machado (2007) indicam que a fração granular é a mais determinante para as propriedades geotécnicas dos rejeitos de minério de ferro. No entanto, não é possível afirmar categoricamente que esses rejeitos terão comportamento similar ao de areias apenas com base em sua granulometria, já que outros fatores, como o teor de ferro, também influenciam seus parâmetros geotécnicos.

Os rejeitos finos, que são normalmente obtidos após o processo de deslamagem durante a fase de concentração do minério, são compostos principalmente por partículas de silte e argila. De acordo com Lima (2006), esses rejeitos são materiais comumente plásticos, altamente compressíveis e transportados via tubulações em forma de lama fluida, contendo uma quantidade significativa de água.

De acordo com MEND (2017), a granulometria dos rejeitos pode ser influenciada por fatores como a mineralogia do minério, o grau de cominuição empregado no processo e o percentual de fração argilosa. Portes (2013) complementa afirmando que rejeitos com partículas finas, abaixo de 0,074 mm, são usualmente denominados lamas, enquanto rejeitos com partículas maiores, acima de 0,074 mm, são classificados como rejeitos granulares. Já o estudo

de Guimarães (2011) inclui um gráfico, ilustrado na Figura 1, que apresenta as faixas granulométricas de diferentes tipos de rejeitos, como lamas, rejeitos de flotação e rejeitos da concentração magnética, comuns em diversas minas localizadas no Quadrilátero Ferrífero.

Boccamino (2017) observa que os rejeitos gerados nas operações de mineração do Quadrilátero Ferrífero são, geralmente, divididos em dois principais grupos: rejeitos arenosos, que são produzidos no processo de flotação, e rejeitos finos, provenientes da etapa de deslamagem.

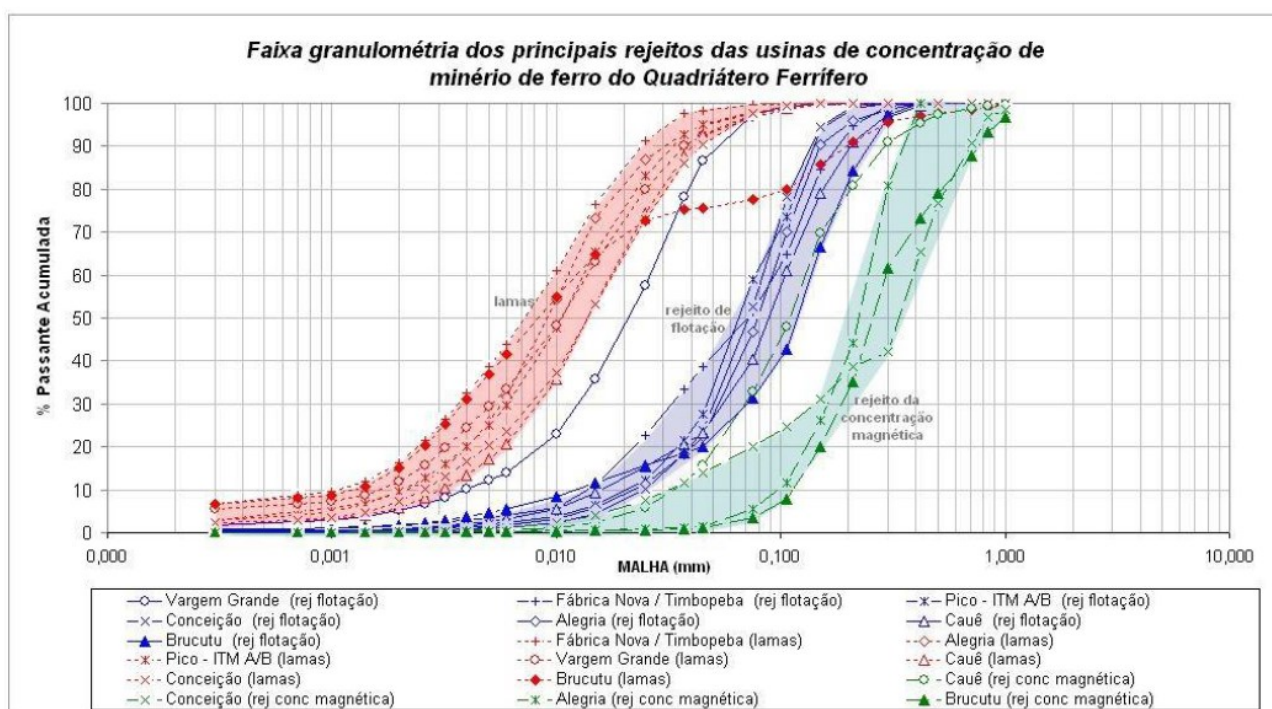


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica de diferentes tipos de rejeitos de algumas minerações do Quadrilátero Ferrífero (Guimarães, 2011)

Souza (2020) destaca que a disposição de rejeitos é um dos maiores desafios enfrentados pelo setor de mineração, especialmente após desastres recentes, como os ocorridos em Mariana e Brumadinho. Esses eventos trouxeram à tona a importância do manejo adequado dos rejeitos, tanto para garantir a sustentabilidade da indústria quanto para evitar impactos catastróficos ao meio ambiente e à sociedade.

A crescente pressão por práticas mais seguras e sustentáveis tem motivado o desenvolvimento de novas tecnologias e metodologias para a disposição de rejeitos, com o objetivo de mitigar os riscos e os impactos ambientais associados. Segundo Borges (2022), a compactação de rejeitos em pilhas é uma alternativa promissora, principalmente com o uso de

equipamentos de grande porte, como tratores de esteira e rolos compactadores, que contribuem para a estabilidade das estruturas de disposição.

4.2 Métodos de Disposição de Rejeitos

As características dos rejeitos de minério de ferro, particularmente no que diz respeito à sua disposição, são governadas por diversas variáveis geotécnicas. De acordo com Figueiredo (2007), a forma como os rejeitos são dispostos está diretamente relacionada ao tipo de minério e ao processo de beneficiamento utilizado. O teor de sólidos presente nos rejeitos pode ser alterado no momento da disposição, sem que isso implique em mudanças nas suas propriedades físico-químicas e mineralógicas.

Guimarães (2011) destaca, de maneira esquemática, as etapas de geração de rejeitos nos processos de classificação e concentração do minério de ferro, bem como as formas de disposição mais comumente utilizadas:

Tabela 4.1: Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos (Guimarães, 2011)

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

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

Os métodos tradicionais de disposição de rejeitos incluem o uso de barragens, que têm sido amplamente utilizados por décadas. No entanto, os recentes desastres relacionados às barragens de rejeitos impulsionaram a busca por alternativas mais seguras. Entre essas

alternativas, destacam-se o empilhamento drenado e o empilhamento de rejeito filtrado (ALVES, 2020).

O empilhamento drenado envolve a disposição de rejeitos em camadas compactadas, permitindo a drenagem natural da água, o que reduz significativamente o risco de liquefação e falhas estruturais. Alves (2020) observa que essa técnica tem se mostrado eficaz na redução da área ocupada pelos rejeitos, além de melhorar a estabilidade das pilhas e diminuir a necessidade de manutenção contínua das estruturas.

Por outro lado, o empilhamento de rejeito filtrado, também conhecido como *dry stacking*, é uma técnica que remove a maior parte da água dos rejeitos antes de sua disposição. Esse processo cria um material mais sólido e estável, que pode ser empilhado de forma semelhante aos estéreis gerados pela mineração (SOUZA, 2020). Além de reduzir os riscos associados ao armazenamento de rejeitos líquidos, o *dry stacking* também minimiza a necessidade de grandes áreas para deposição, uma vez que os rejeitos filtrados ocupam menos espaço.

4.3 Filtragem

A filtragem é um processo essencial no tratamento de rejeitos de minério de ferro, principalmente quando se busca a disposição desses materiais em pilhas, de forma mais estável e sustentável. Segundo Guimarães (2011), o objetivo principal da filtragem é reduzir o conteúdo de água presente nos rejeitos, transformando-os em tortas com menor teor de umidade e mais adequadas para empilhamento. Esse método vem sendo cada vez mais adotado como alternativa às barragens de rejeitos, minimizando os riscos ambientais associados ao armazenamento de grandes volumes de água.

Conforme descrito por Guimarães (2011), a filtragem consiste na separação de partículas sólidas de uma suspensão líquida por meio de um elemento poroso, e pode ser realizada utilizando diferentes métodos, como a gravidade, o vácuo, a pressão ou a centrifugação. O autor explica que, no caso da filtragem a vácuo, uma pressão negativa é aplicada na câmara de filtragem, promovendo a remoção da água da polpa. Já no filtro de pressão, utiliza-se uma pressão positiva que força o material sólido a passar através do meio filtrante. Além disso, existe o processo conhecido como filtragem hiperbárica, que combina os dois métodos, utilizando tanto vácuo quanto pressão. A Tabela 4.2 ilustra os diferentes mecanismos de filtragem.

Tabela 4.2: Mecanismos de filtração (Adaptado de Guimarães, 2011)

Tipos	Modelos de Filtros	Características
Filtração a vácuo	Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal demesa e filtro horizontal de correia	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante
Filtração sob pressão	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical	Uma pressão positiva é aplicada na polpa
Filtração centrífuga	Centrífugas verticais e Decanters	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido
Filtração hiperbárica	Filtro de disco encapsulado ou Hiperbárico	Em que se combinam vácuo e pressão
Filtração capilar	Ceramec	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento

Amarante (2002) compara diferentes métodos de filtração em laboratório, utilizando os testes de folha e de funil de Büchner. Em sua análise, Amarante destaca que o teste de folha é mais eficiente para avaliar a capacidade de desaguamento de rejeitos em condições controladas, proporcionando uma visão mais detalhada do comportamento dos materiais durante a filtração. Os resultados desse tipo de teste são utilizados no dimensionamento de sistemas de filtração em escala industrial, além de fornecer dados importantes para a otimização do processo em plantas de beneficiamento (AMARANTE, 2002).

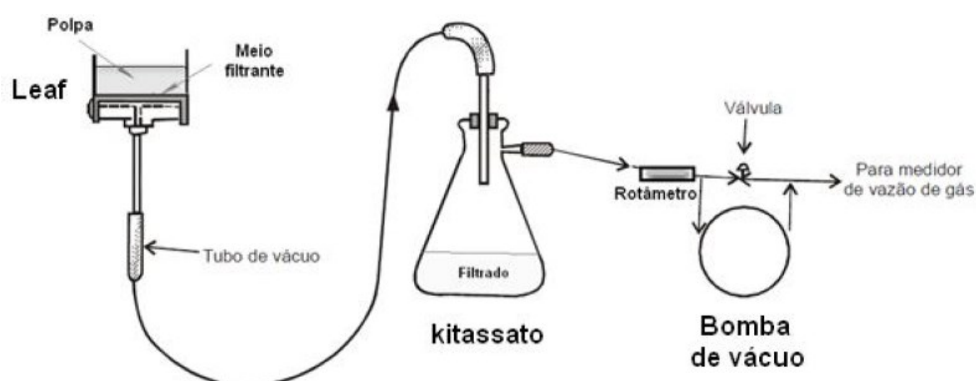


Figura 4.2: Representação simplificada da montagem - teste de folha (Guimarães, 2011)

4.3.1 Filtro de Disco Convencional

O filtro de disco convencional é amplamente utilizado na mineração de ferro devido à sua eficiência em desaguamento de polpas de granulometria mais fina. Guimarães (2011) descreve o funcionamento desse equipamento, que é composto por discos verticais rotativos imersos em uma polpa de minério. A filtração ocorre quando a polpa é puxada para o interior dos discos por meio de um sistema de vácuo, retendo os sólidos no exterior do disco. Esse filtro é eficaz para rejeitos de minério de ferro com teores de sólidos entre 30% e 70%, mas apresenta limitações em termos de alta umidade residual nos rejeitos filtrados.

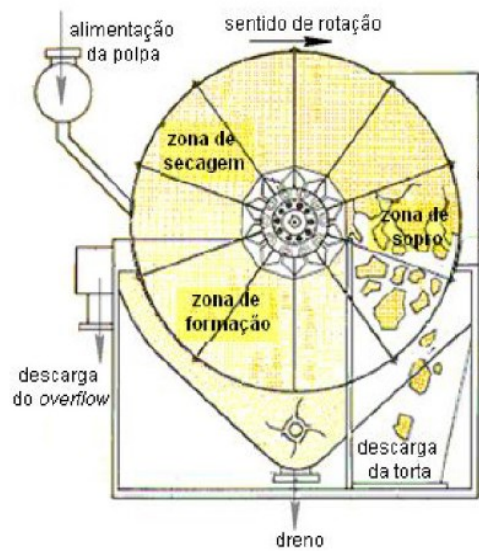


Figura 4.3 : Filtro de disco convencional (Guimarães, 2011)



Figura 4.4 : Filtro de disco à vácuo vertical

Além disso, Amarante (2002) discute que o filtro de disco convencional possui uma capacidade moderada de filtração e é comumente utilizado em processos industriais que exigem um baixo custo operacional. No entanto, sua eficiência pode ser afetada pela presença de partículas muito finas ou pela necessidade de grandes volumes de polpa a serem filtrados.

4.3.2 Filtro de Disco Hiperbárico

O filtro de disco hiperbárico é uma evolução do filtro de disco convencional, que opera sob pressões mais elevadas, melhorando significativamente a capacidade de desaguamento dos rejeitos. Guimarães (2011) destaca que esse tipo de filtro é especialmente útil em rejeitos com alta dificuldade de filtração, como lamas e rejeitos finos. O uso de pressão positiva adicional na câmara de filtração permite a remoção de quantidades maiores de água, resultando em tortas de rejeitos com menor teor de umidade.

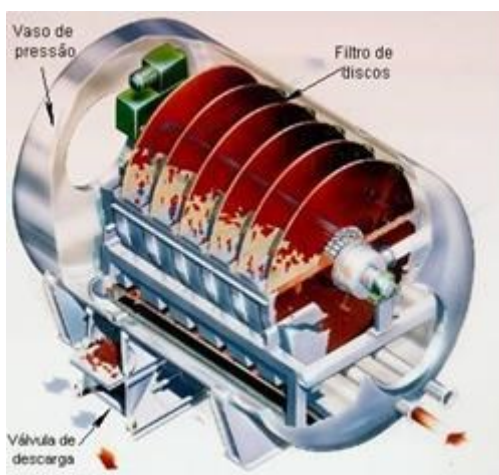


Figura 4.5 : Filtro de disco à hiperbárico

Este tipo de filtro é recomendado para operações que buscam eficiência no desaguamento de grandes volumes de rejeitos finos. Embora apresente um custo operacional mais elevado, o filtro de disco hiperbárico é mais eficiente do que o filtro de disco convencional em termos de redução da umidade residual dos rejeitos, como observado por Amarante (2002). Essa tecnologia também é uma alternativa promissora para substituição de sistemas tradicionais de barragens, contribuindo para uma disposição a seco mais segura.

4.3.3 Filtro Horizontal de Correia

O filtro horizontal de correia, de acordo com Guimarães (2011), é comumente utilizado em plantas de beneficiamento de minério de ferro para desaguamento de polpas mais grossas. Esse equipamento é composto por uma correia transportadora horizontal que suporta a torta de rejeitos durante o processo de filtragem, permitindo uma drenagem eficiente por meio de vácuo aplicado por baixo da correia.

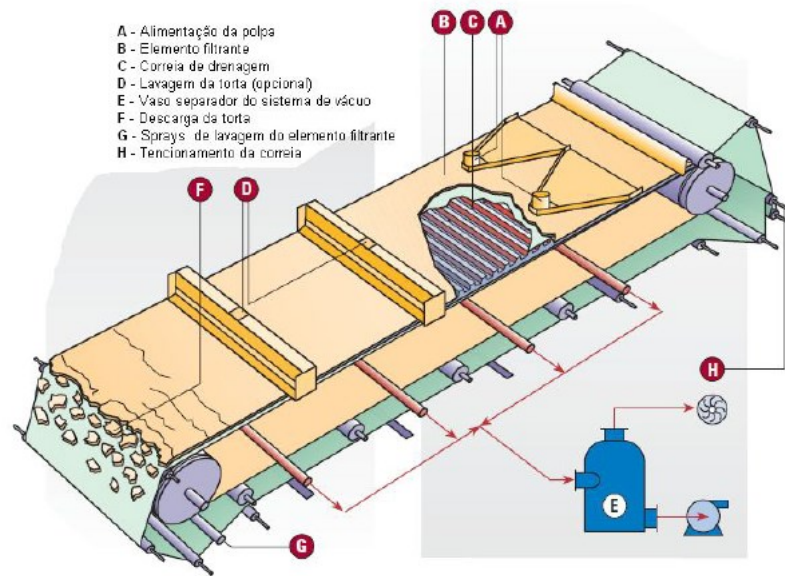


Figura 4.6 : Esquema de filtro horizontal de correia

Amarante (2002) descreve que este filtro é especialmente útil para rejeitos que precisam de um desaguamento contínuo e para volumes maiores de polpa, oferecendo alta capacidade de processamento. Além disso, a facilidade de operação e manutenção torna o filtro horizontal de correia uma escolha viável para operações industriais que exigem um processo de desaguamento contínuo e eficiente.



Figura 4.7 : Filtro horizontal de correia

Por outro lado, uma das limitações apontadas é a necessidade de uma estrutura mais robusta e o maior espaço necessário para a instalação do equipamento. Contudo, os benefícios de processamento contínuo e baixo consumo energético compensam essas limitações em muitas aplicações industriais.

4.3.4 Filtro Prensa em Placas Verticais

O filtro prensa em placas verticais é amplamente utilizado em processos de filtração de rejeitos que exigem a remoção de grandes quantidades de água. De acordo com Amarante (2002), este equipamento consiste em placas dispostas verticalmente, entre as quais a polpa de rejeitos é bombeada. A pressão aplicada à polpa força a água a atravessar as placas filtrantes, enquanto os sólidos ficam retidos, formando uma torta com baixo teor de umidade.

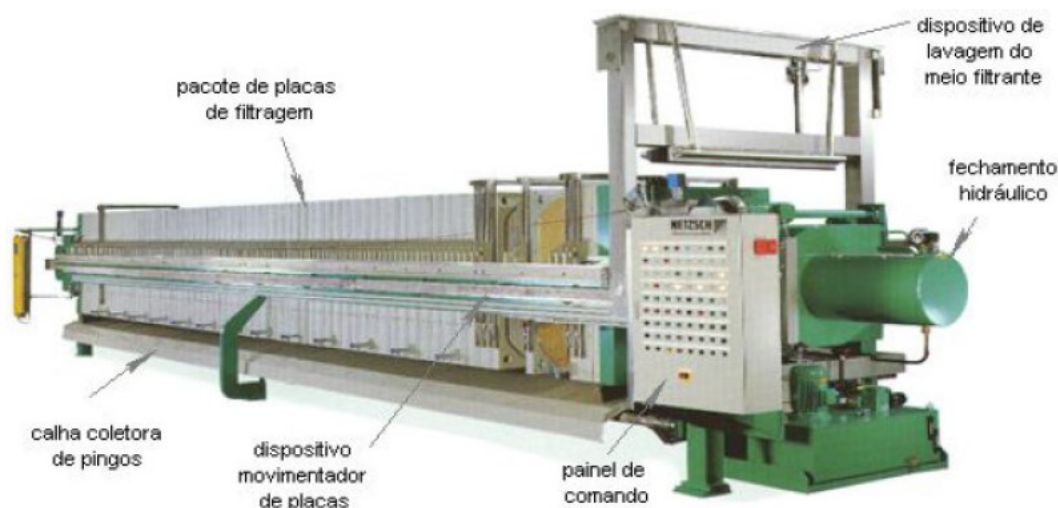


Figura 4.8 : Filtro prensa de placas verticais

Guimarães (2011) destaca que o filtro prensa em placas verticais é particularmente eficiente na remoção de água de rejeitos com alto teor de sólidos e apresenta um desempenho superior em termos de redução da umidade residual. No entanto, esse equipamento apresenta uma operação cíclica, o que pode ser uma desvantagem em processos que exigem um fluxo contínuo de rejeitos filtrados. Outro ponto levantado é a necessidade de manutenção periódica das placas, que podem sofrer desgaste com o tempo.

4.3.5 Filtro Prensa em Placas Horizontais

O filtro prensa em placas horizontais opera de maneira semelhante ao filtro de placas verticais, mas com as placas dispostas horizontalmente. Amarante (2002) explica que essa disposição permite uma maior capacidade de filtração, tornando esse tipo de filtro ideal para operações de grande escala que necessitam de um processo contínuo. A polpa de rejeitos é bombeada entre as placas, e a pressão é aplicada para separar os sólidos da água. O desaguamento ocorre em ciclos, com a formação de uma torta de baixa umidade.

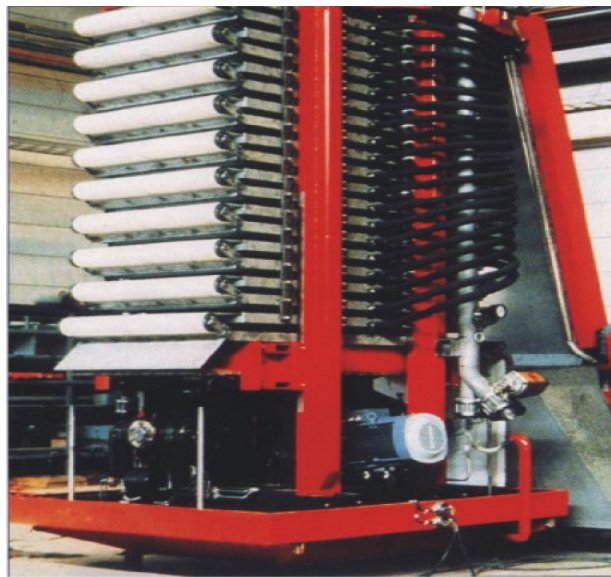


Figura 4.9 : Filtro prensa de placas horizontais

Guimarães (2011) observa que o filtro prensa em placas horizontais é especialmente útil em rejeitos mais grossos e com baixa presença de frações argilosas. No entanto, assim como o filtro de placas verticais, esse equipamento requer um controle cuidadoso da operação para garantir a eficiência no desaguamento. As placas horizontais, por sua vez, podem acomodar um maior volume de material, o que aumenta a produtividade.

4.4 Codisposição e Disposição Compartilhada

A codisposição de rejeitos e estéreis é uma técnica que visa aumentar a eficiência da disposição de resíduos ao combinar rejeitos filtrados com estéril em uma única estrutura. Souza (2020) explica que essa prática resulta em uma estrutura mais estável e compacta, que pode ocupar menos espaço do que as pilhas convencionais de rejeitos ou estéril isoladas (SOUZA, 2020).

Essa técnica oferece vantagens significativas em termos de controle de drenagem e gestão de água, uma vez que o estéril, quando combinado com rejeitos, pode melhorar a capacidade de drenagem da pilha e reduzir o risco de saturação. Além disso, a codisposição pode ser realizada de diferentes maneiras, como a disposição de rejeitos em células de estéril ou a mistura homogênea dos dois materiais, conforme destacado por Borges (2022). Essa abordagem também pode reduzir os custos de transporte e manuseio, uma vez que os rejeitos e estéreis são dispostos juntos.

4.5 Exemplos de Aplicação

Diferentes empreendimentos minerários ao redor do mundo têm adotado o empilhamento de rejeitos filtrados como uma alternativa ao uso de barragens de rejeitos. A Mina Pau Branco, em Minas Gerais, por exemplo, implementou um sistema de filtragem que permite a disposição dos rejeitos diretamente em pilhas, sem a necessidade de grandes barragens de contenção (ALVES, 2020).

Outro exemplo relevante é o da Mina Escobal, na Guatemala, onde o empilhamento de rejeitos filtrados é realizado de forma simultânea à recuperação do local. Isso permite que a área utilizada para a disposição de rejeitos seja recuperada gradualmente, promovendo um uso mais eficiente do espaço e minimizando os impactos ambientais de longo prazo (SOUZA, 2020).

No estudo realizado por Borges (2022), foram analisados os impactos da compactação de rejeitos filtrados utilizando diferentes tipos de equipamentos. Os resultados indicaram que a combinação de tratores de esteira e rolos compactadores oferece uma maior uniformidade na compactação, aumentando a estabilidade das pilhas e reduzindo a necessidade de manutenções frequentes. Além disso, foi observado que o uso de camadas mais espessas de rejeito compactado resultou em uma maior produtividade, embora exigisse maior controle da umidade do material para evitar problemas de instabilidade.

4.6 Rejeitos Dispostos em Pilhas

Diversas formas de disposição de rejeitos são amplamente utilizadas na mineração. No contexto deste estudo, é importante destacar a disposição em pilhas de rejeitos filtrados, uma técnica que tem se mostrado eficiente na substituição de barragens de rejeitos convencionais.

Segundo Ulrich e Coffin (2013), a realização de ensaios *in situ* em pilhas de rejeitos de grandes alturas é crucial para verificar potenciais quebras de partículas, que podem alterar o comportamento da pilha, principalmente no que se refere à superfície freática e à redução da permeabilidade. Estudos como o de Crystal et al. (2018) também destacam a importância de investigar o comportamento dos rejeitos sob tensões elevadas, ressaltando que as limitações quanto à altura das pilhas precisam ser rigorosamente consideradas.

Além disso, a taxa de alteamento deve ser controlada para evitar o aumento excessivo da poropressão, que pode comprometer a estabilidade da estrutura, como mencionado por Ulrich (2019). Ensaios de taxa de deformação constante, realizados com velocidades de 3 mm/h, mostram que não há aumento significativo de poropressão até 1630 kPa (Bareither et al., 2018). O estudo de Burden et al. (2019) observa que, ao adicionar estéril à mistura, a dissipação das poropressões tende a aumentar.

A estabilidade das pilhas também depende da resistência do solo, que deve ser maior do que o aumento de tensões devido à adição de camadas de rejeitos (Crystal et al., 2018). A linha freática deve ser mantida afastada das faces do empilhamento, para reduzir o risco de liquefação e garantir a segurança estrutural da pilha.

Outro aspecto importante é a geometria da pilha, que deve ser cuidadosamente projetada para garantir a sua estabilidade. Os formatos mais comuns de pilhas incluem pilhas em vale, pilhas transversais a vales, pilhas de encosta, entre outros (Wahler, 1979 apud Hawley & Cunning, 2017).

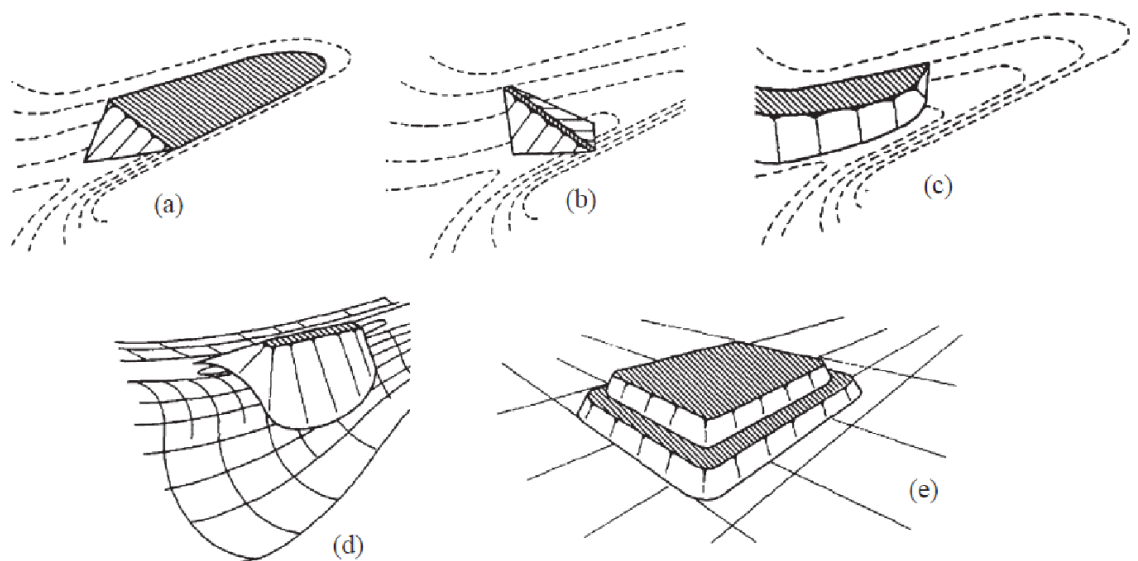


Figura 4.10 : Formatos de pilhas mais comuns (Wahler 1979, apud Hawley & Cunning, 2017)

O empilhamento de rejeitos não é uma técnica nova, tendo sido utilizado no Brasil para rejeitos arenosos. Esse método, conhecido como empilhamento drenado, era aplicado principalmente em rejeitos com alta permeabilidade, que permitiam a drenagem gravitacional do fluxo de água. Oliveira-Filho (2017) observa que esse método é mais adequado para rejeitos arenosos, enquanto para rejeitos finos, a baixa permeabilidade dificulta sua aplicação.

Pimenta (2011), citado por Portes (2013), lista os principais objetivos do método de empilhamento drenado, que incluem a obtenção de um maciço não saturado e estável, maior densidade, menor potencial de dano em caso de ruptura e maior facilidade no fechamento e recuperação ambiental. Este método também permite uma aplicação mais segura do alteamento a montante, reduzindo os riscos de liquefação.

Alves (2020) apresenta diversas práticas que podem otimizar a disposição de rejeitos filtrados em pilhas. Entre elas, destacam-se a manutenção de uma reserva de placas filtrantes, a utilização de correias transportadoras para manuseio da torta filtrada, e a existência de um pátio de estocagem próximo à planta de filtragem. A reabilitação progressiva da pilha de rejeitos é essencial para prevenir a erosão e garantir a segurança da estrutura a longo prazo.

No entanto, Alves (2020) alerta que o maior desafio do empilhamento de rejeitos filtrados ainda é o custo elevado de operação, que pode ser até cinco a oito vezes superior ao custo de métodos convencionais. Esse elevado custo torna o empilhamento de rejeitos finos um desafio ainda maior, pois a falta de drenagem natural afeta diretamente a estabilidade da pilha. As mineradoras estão buscando soluções que proporcionem tanta segurança geotécnica quanto viabilidade econômica, considerando os grandes volumes de rejeitos e o uso de equipamentos especializados.

5 – Desenvolvimento dos Testes

Para a realização dos testes, foi preparada uma praça de 100 x 65 m na PDRE, onde foi espalhado rejeito filtrado, transportado da pilha cônica pós-usina de filtragem utilizando equipamentos de grande porte, como a carregadeira CAT 994 H e o caminhão fora de estrada CAT 789D. Na praça, com o uso do trator de esteira CAT D10 e da motoniveladora CAT 16M, o rejeito foi espalhado em uma camada de 0,75 m de espessura (camada operacional). Em seguida, essa camada foi umidificada para atingir um teor de umidade de ~14%, que corresponde à umidade ideal para compactação operacional.

Conforme citado anteriormente, esta praça foi dividida em 4 subpraças de 32,5 x 50 m. Duas destas praças foram compactadas usando trator de esteira e duas com rolo compactador.

A partir das amostras coletadas e transportadas para o laboratório foram realizados ensaios com base nos seguintes procedimentos, todos da ABNT:

- Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização - NBR 6457 (ABNT, 2016);
- Ensaio de compactação (Proctor) – NBR 7182 (ABNT, 2016);
- Ensaio de compactação pelo método de Hilf – NBR 12102 (ABNT, 2020)
- Análise Granulométrica – NBR 7181 (ABNT, 2016).

Ressalta-se que, no estudo dos rejeitos, é comum a utilização de procedimentos normativos aplicáveis a solos, uma vez que não existem normas específicas para ensaios de laboratório em rejeitos de mineração.

5.1 Marcações de praças

Foram realizadas marcações topográficas dividindo as praças para orientar tanto os operadores de trator e rolo quanto a equipe de laboratório para coletar as amostras. A figura 5.1 mostra a visão geral da PDRE Sul:

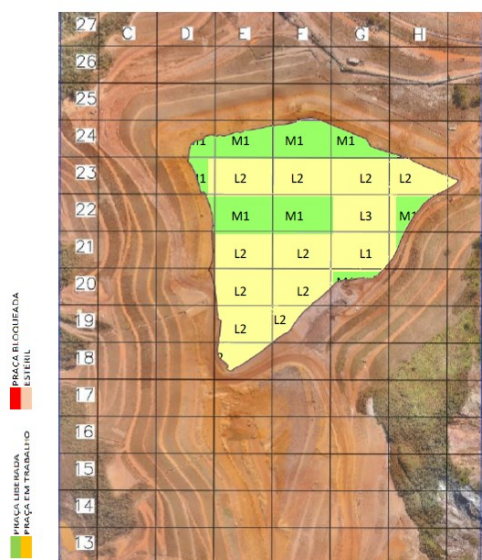


Figura 5.1 : Vista da PDRE SUL

A praça na qual subdividimos em 4 e realizamos os testes foi a 22 G, conforme mostrado na figura 5.2:

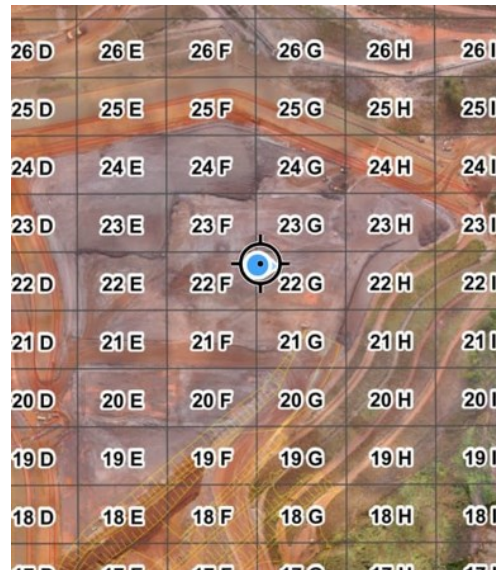


Figura 5.2 : Localização da praça 22 G

As marcações das 4 subpraças foram realizadas por estacas conforme ilustrado abaixo:



Figura 5.3 : Marcações topográficas

5.2 Compactação do solo

Após a marcação das subpraças, iniciaram-se as compactações utilizando trator de esteira em duas delas e rolo compactador nas outras duas. Em cada subpraça, foram realizadas duas passadas com o equipamento, correspondendo a uma 'fecha'.



Figura 5.4 : Compactação com trator de esteira e rolo compactador

5.2.1 Compactação com rolo

A compactação com rolo nas duas subpraças ocorreu entre 09:37 e 10:28 h, totalizando 51 minutos para uma área de 3.250 m², o que resulta em uma produtividade de aproximadamente 3.824 m²/h.



Figura 5.5 : Compactação com rolo compactador Hamm 3520_20 t

O acabamento realizado com o rolo apresentou uma superfície mais lisa, o que era esperado devido às características do equipamento.



Figura 5.6 : Compactação com rolo compactador: Acabamento da praça

5.2.2 Compactação com trator de esteira

A compactação com o trator de esteira foi realizada entre 09:56 e 11:15 h nas duas subáreas designadas para este equipamento, totalizando 79 minutos em uma área de 3.250 m², o que resulta em uma produtividade de ~2.468 m²/h.



Figura 5.7 : Compactação com trator de esteira CAT D10T

A área coberta pelas esteiras do trator é menor que a do rolo, resultando em uma produtividade cerca de 54,92% menor para cobrir toda a área designada. Além disso, o acabamento da superfície do solo se torna mais irregular devido às garras das esteiras (também chamadas de sapatas ou cravos), que são projetadas para aumentar a aderência ao solo, uma vez que o trator é utilizado para deslocar material, geralmente in situ.



Figura 5.8 : Compactação com trator de esteira: Acabamento da praça

Outro aspecto relevante na avaliação de campo é a efetividade da compactação feita pelo trator. Devido às garras presentes nas esteiras, que facilitam o deslocamento, a camada superior do material acaba ficando solta. Durante o processo de construção do aterro, foi observado que a camada superficial, em torno de 12 cm, não atinge o grau de compactação desejado (Figura 5.9)



Figura 5.9 : Efeito provocado pela garra do trator de esteira na superfície da camada compactada

Outra dificuldade que podemos encontrar na compactação usando o trator de esteira é a perda de referência que pode ocorrer pelo operador quando as marcas das esteiras se encontram, o que pode resultar uma compactação ineficiente em algumas regiões.



Figura 5.10 : Possível perda de referência provocada pelas marcas da esteira

5.2 Amostragem e testes

Conforme planejado, foram realizadas amostras para obtenção de grau de compactação nas subpraças. Escolheu-se 5 pontos aleatórios para medição de compactação de topo e base usando testes de cilindro totalizando 40 ensaios. Em cada subpraça, foi também realizado teste de Hilf.



Figura 5.11 : Amostragem em campo

Para realização dos ensaios foram desprezados os 10 primeiros centímetros para cravação do primeiro cilindro e a base foi realizada 50 cm abaixo do topo.



Figura 5.12 : Abertura de local para amostragem

Para a coleta das amostras, foi utilizado um cilindro biselado, que foi cravado no local escolhido, e posteriormente foram realizadas as medições para obtenção da massa específica.



Figura 5.13 : Cravação do cilindro e medição

Como foi anteriormente descrito, amostramos 4 pontos, um em cada subárea para realização do teste de Hilf em laboratório para podermos usar como base para cálculo do grau de compactação do solo de cada um dos 40 cilindros cravados nas 4 subáreas.

Retiramos também uma amostra para realização da caracterização do material e análise granulométrica. Definimos que, dos 20 pontos escolhidos, numeraríamos de 1 a 10 nas áreas compactadas pelo trator de esteira e de 11 a 20 nas áreas compactadas com rolo compactador. Lembrando que para cada ponto, dois cilindros amostrados, um para topo e outro para base.



Figura 5.14 : Visão da área de testes e pontos de amostragens PDRE Sul

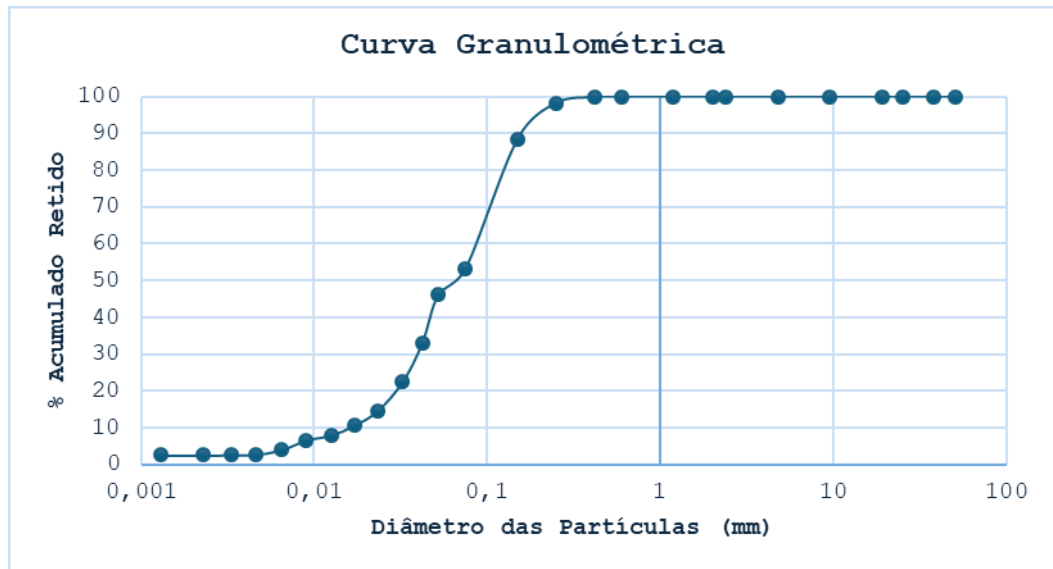


Figura 5.15 : Vista panorâmica lateral da área de teste PDRE Sul

6 – Resultados e Análises

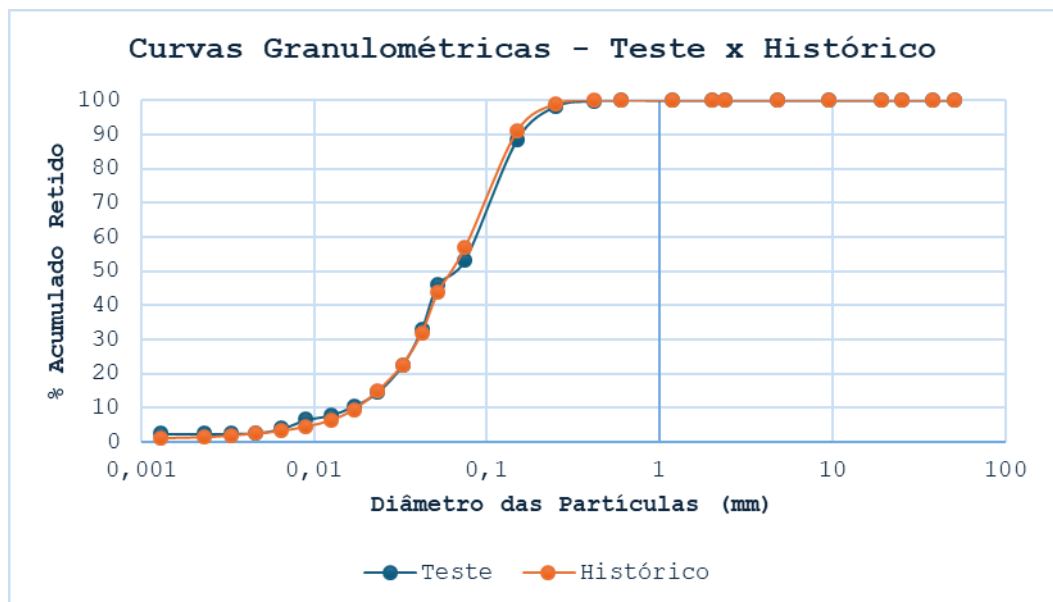
6.2 Análise Granulométrica

Conforme os procedimentos normativos previamente mencionados, foram realizados ensaios para a determinação da granulometria do material utilizado nos testes, assim como um comparativo com os resultados históricos desde o início do empilhamento na PDRE Sul.



Material	Percentual (%)
Argila	2,54
Silte	46,12
Areia	51,30
Pedregulho	0,00

Figura 6.1 : Curva granulométrica do material do teste



Material	% Teste	% Histórico
Argila	2,54	1,30
Silte	46,12	44,90
Areia	51,30	53,80
Pedregulho	0,00	0,00

Figura 6.2 : Curva granulométrica do material do teste versus histórico

Observa-se, no gráfico e nas tabelas de composições, que o rejeito gerado apresenta uma certa regularidade, não demonstrando grandes diferenças quando comparamos os resultados do teste com o histórico. Esse comportamento explica a similaridade no manejo e na compactação do material ao longo do tempo.

A regularidade nas características do rejeito é fundamental para garantir um comportamento previsível durante o manejo e compactação. Isso sugere que, ao longo do tempo, os parâmetros de operação e as condições de trabalho podem ser mantidos com poucas variações, otimizando a eficiência dos processos. A consistência nos resultados também facilita o planejamento e o controle de qualidade, já que menos ajustes operacionais são necessários. Esse comportamento está diretamente relacionado à estabilidade do material, o que é crucial em projetos de disposição de rejeitos.

6.3 Compactação

Os ensaios de compactação foram conduzidos na energia normal. O ensaio de Proctor é um teste fundamental na engenharia geotécnica, utilizado para determinar a relação entre a umidade e a densidade de um solo compactado. Desenvolvido pelo engenheiro Ralph Proctor em 1933, este método é essencial para garantir a qualidade e a estabilidade de aterros e fundações em obras de infraestrutura.

O principal objetivo do ensaio é identificar a umidade ótima e a densidade máxima que o solo pode atingir sob uma determinada energia de compactação. Isso é crucial para otimizar o desempenho estrutural e hidráulico das construções, reduzindo riscos de recalque e aumentando a resistência do solo.

O ensaio consiste em compactar uma amostra de solo em um cilindro com volume conhecido, variando a umidade para obter o ponto de compactação máxima. Os principais passos incluem:

- **Preparação da Amostra:** O solo deve ser seco, destorroado e peneirado.
- **Adição de Água:** A umidade é ajustada até alcançar a consistência desejada.
- **Compactação:** O solo é compactado em camadas, utilizando um soquete que aplica impactos. O número de camadas e golpes varia conforme o tipo de ensaio (normal, intermediário ou modificado)

Existem três tipos principais de ensaio Proctor, cada um com diferentes níveis de energia de compactação:

- Proctor Normal: 5 camadas com 12 golpes por camada.
- Proctor Intermediário: 5 camadas com 26 golpes por camada.
- Proctor Modificado: 5 camadas com 55 golpes por camada.

Os dados obtidos durante o ensaio são utilizados para traçar a curva de compactação, que relaciona o peso específico seco do solo à umidade. Essa curva ajuda a identificar o ponto onde se obtém a densidade máxima e a umidade ótima, facilitando o controle da qualidade durante a execução das obras.

Para a amostra do solo em questão, foi traçada a curva mostrada na figura 6.3:

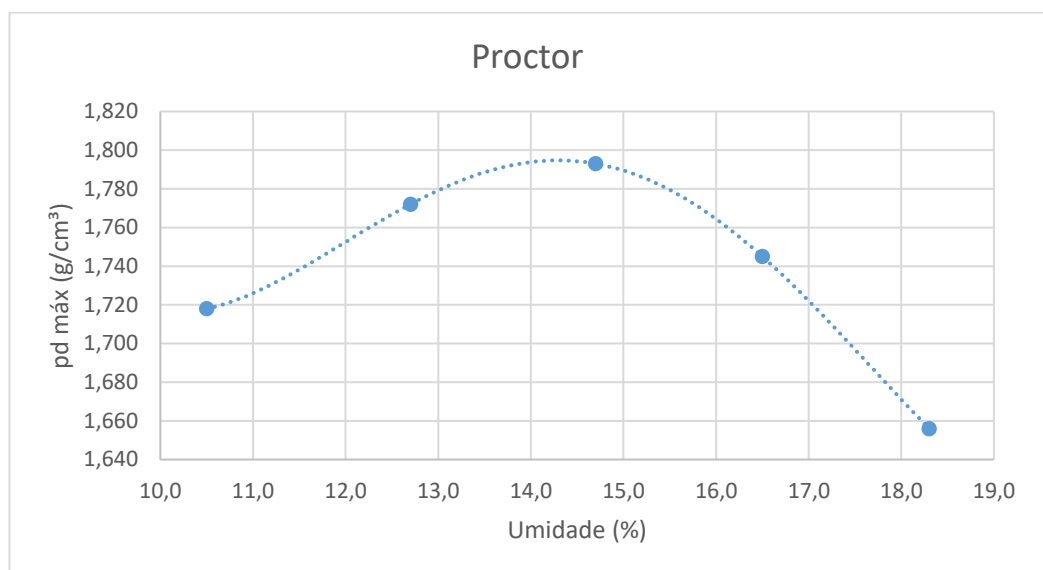


Figura 6.3 : Curva Proctor Normal

O ensaio de Hilf é um método utilizado para o controle de compactação de solos, especialmente em obras de aterros. Este ensaio é normatizado pela ABNT NBR 12102:2020 e é aplicável quando se refere à energia normal de compactação. O método permite a determinação do grau de compactação e do desvio de umidade do solo sem a necessidade de conhecer previamente o teor de umidade do solo compactado no ponto de controle.

Os principais objetivos do ensaio de Hilf são:

- Determinar o grau de compactação do solo no ponto de controle.
- Avaliar o desvio de umidade, permitindo decisões rápidas sobre a liberação da camada compactada, geralmente em menos de uma hora.

O ensaio envolve os seguintes passos:

1. Coleta da Amostra: Coletar uma amostra representativa do solo a ser ensaiado.
2. Compactação: A amostra é compactada em um molde cilíndrico sob condições controladas.
3. Determinação da Umidade: Após a compactação, o teor de umidade é medido, e a massa da amostra é registrada.
4. Cálculo do Grau de Compactação: O grau de compactação é calculado com base na diferença entre a massa específica aparente da amostra compactada e a massa específica aparente máxima obtida pelo ensaio Proctor.

Os ensaios de Hilf e Proctor são métodos utilizados para avaliar a compactação de solos, mas possuem diferenças significativas em sua metodologia e aplicação.

- Proctor: Utilizado principalmente em laboratório para preparar curvas que serão usadas como referência durante a construção. É fundamental para entender como diferentes níveis de umidade afetam a densidade do solo.
- Hilf: Mais prático para uso em campo, permitindo ajustes imediatos no processo de compactação sem necessidade de testes laboratoriais prévios. É ideal para monitorar a qualidade da compactação durante a execução da obra.

Enquanto o ensaio de Proctor é essencial para estabelecer parâmetros iniciais e teóricos sobre a compactação do solo, o ensaio de Hilf oferece uma abordagem prática e rápida para garantir que esses parâmetros sejam atendidos durante a construção. Ambos são complementares, mas servem a propósitos distintos dentro do controle tecnológico da compactação de solos.

A determinação da massa específica aparente in situ foi realizada com emprego de cilindro de cravação (cilindro biselado), de acordo com a NBR 9813 (ABNT, 2016).

Para a obtenção do grau de compactação do solo em cada um dos 40 pontos amostrados, foram realizadas medições nos cilindros coletados, a fim de determinar a massa específica em cada um dos pontos. Com base nessas massas específicas, foram feitas comparações com os valores obtidos no ensaio de Hilf, permitindo o cálculo do grau de compactação em termos percentuais. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.1:

Tabela 6.1: Resultados das amostras

Data	Local Praça	Altura da camada (cm)	Equipamento de compactação	Nº Passadas	Nº Cilindro	Massa específica "in situ"		MÉTODO HILF			
						Topo	Base	$\rho_{hmaxconv.}$ (g/cm³)		GC _h (%)	
						$\rho_{h\ aterro}$ (g/cm³)	$\rho_{h\ aterro}$ (g/cm³)	Topo	Base	Topo	Base
02/10/24	22G	75,5	Rolo Chapa lisa	2	1	1,994	1,920	1,981	1,958	100,7%	98,1%
					2	1,903	1,817			96,1%	92,8%
					3	2,085	1,976			105,2%	100,9%
					4	2,012	1,912			101,6%	97,7%
					5	2,024	1,929			102,2%	98,5%
02/10/24			Rolo Chapa lisa		6	2,098	1,988	1,982	1,955	105,9%	101,7%
					7	2,089	1,968			105,4%	100,7%
					8	2,089	1,968			105,4%	100,7%
					9	2,114	2,085			106,7%	106,6%
					10	1,970	1,857			99,4%	95,0%
02/10/24			Trator de esteira		11	2,002	1,913	1,963	1,961	102,0%	97,6%
					12	1,974	1,911			100,6%	97,5%
					13	1,961	1,935			99,9%	98,7%
					14	1,923	1,880			98,0%	95,9%
					15	1,931	1,872			98,4%	95,5%
03/10/24			Trator de esteira		16	2,051	1,951	2,014	1,968	101,8%	99,1%
					17	2,052	1,964			101,9%	99,8%
					18	2,039	1,946			101,2%	98,9%
					19	2,027	1,942			100,6%	98,7%
					20	2,029	1,942			100,7%	98,7%

Para melhor entendimento dos valores, vamos representar graficamente a fim de compararmos os dois métodos de compactação operacional:

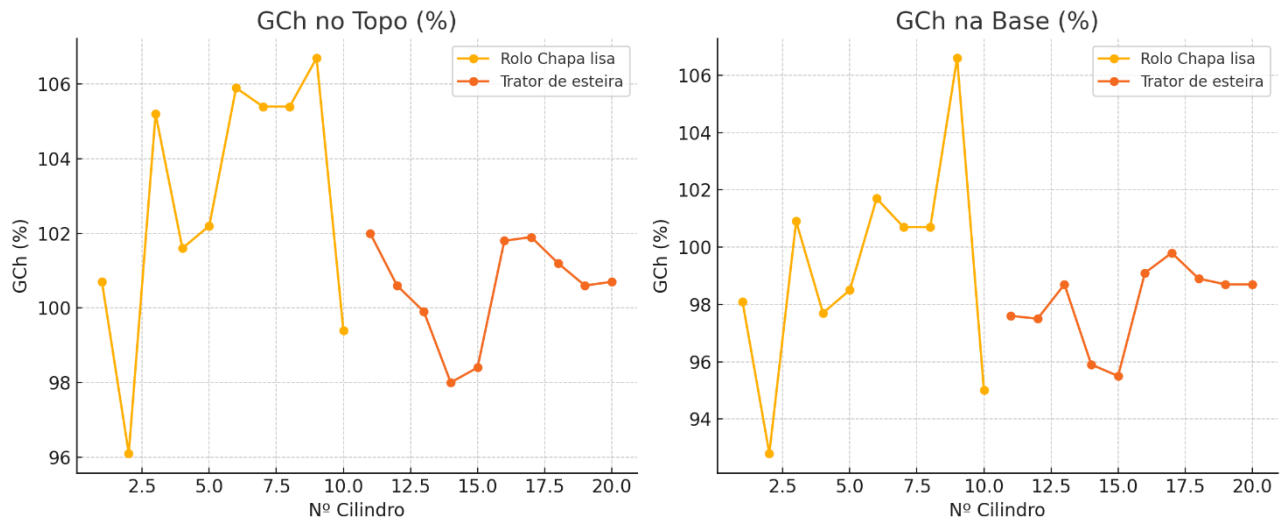


Figura 6.4 : Grau de Compactação Topo e Base para cada equipamento

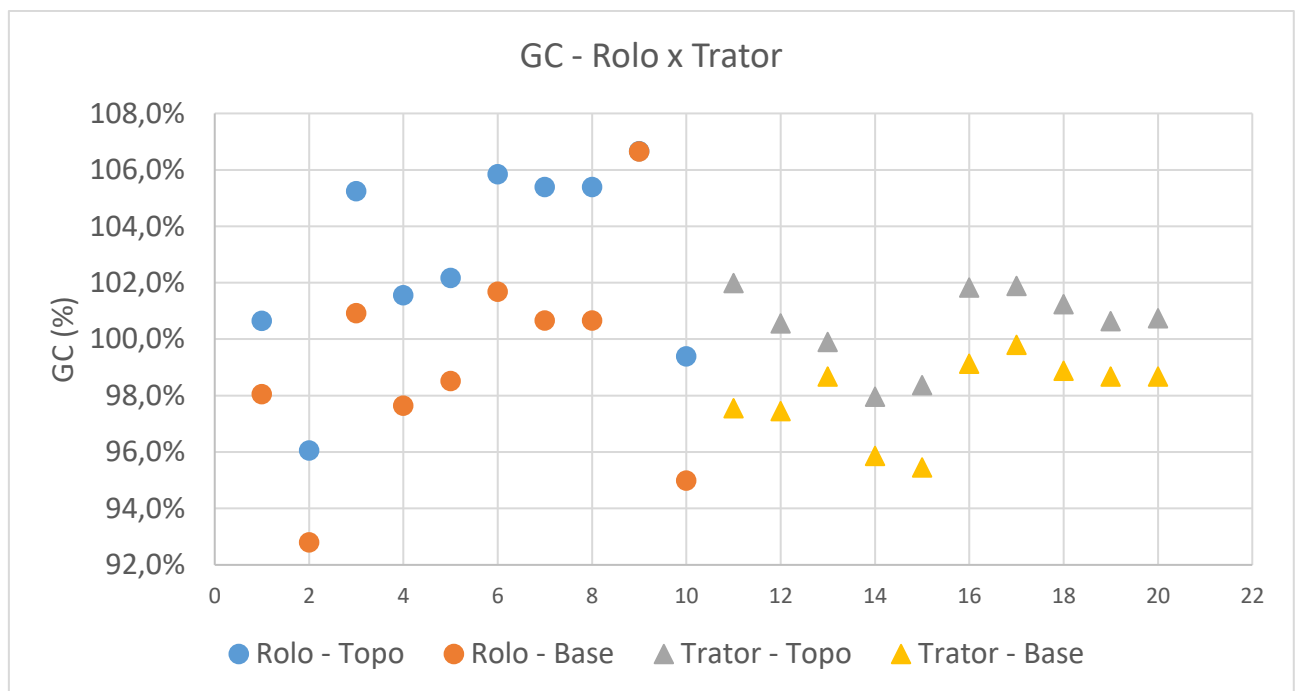


Figura 6.5 : Grau de Compactação para cada equipamento

1. GC Rolo - Topo:

- O desempenho do rolo no topo parece atingir valores mais altos de compactação, com alguns pontos próximos a 106%. No entanto, há variações que caem para abaixo de 98%, sugerindo uma certa inconsistência.

2. GC Rolo - Base:

- Na base, os valores de compactação do rolo variam mais amplamente, com alguns caindo até 92%, enquanto os valores mais altos chegam a 106%. A variação é mais significativa aqui, indicando que o rolo pode compactar menos eficientemente na base em alguns pontos.

3. GC Trator - Topo:

- O trator tem uma variação mais concentrada no topo, com valores entre 97% e 102%. Embora os valores não sejam tão altos quanto os do rolo, há mais consistência nos resultados.

4. GC Trator - Base:

- O trator na base mostra uma compactação bastante uniforme, com valores entre 95% e 99%. Embora os valores sejam menores do que os do rolo em alguns casos, a consistência é evidente.

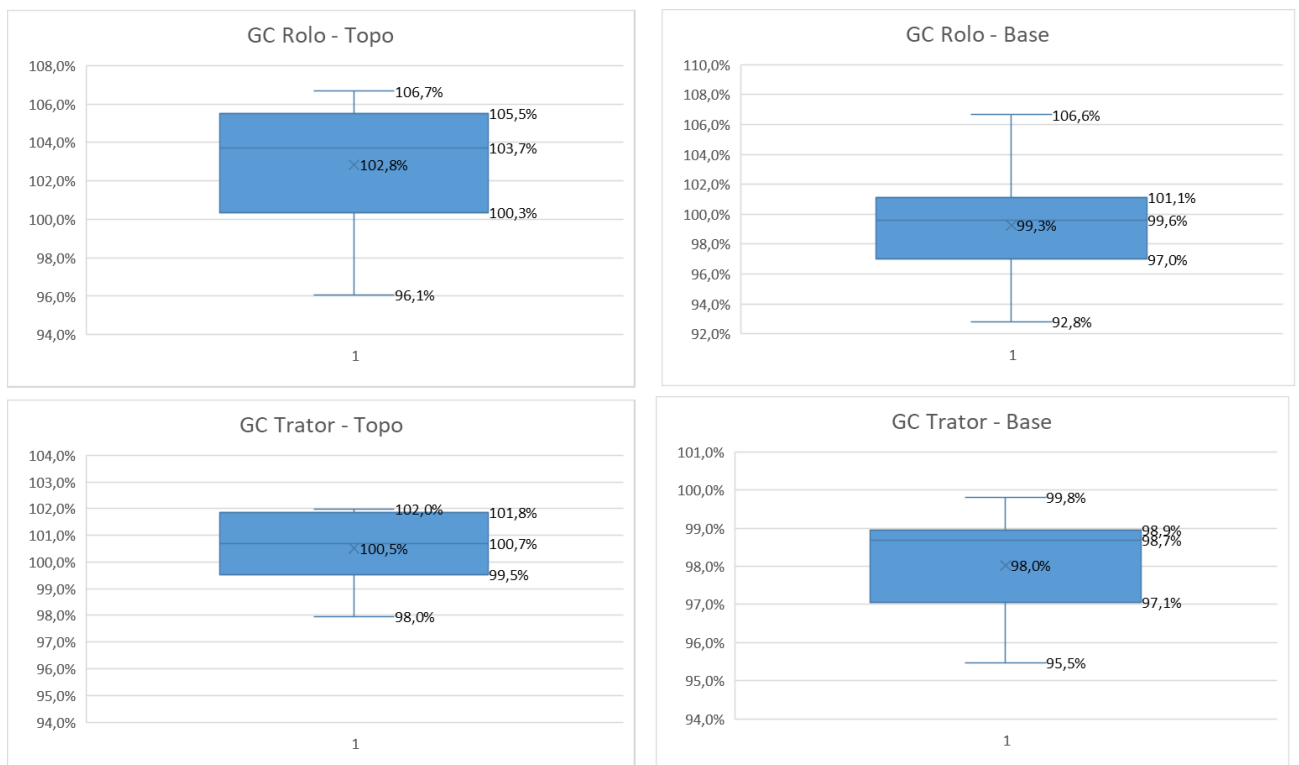


Figura 6.6 : Analise Box Plot

Esses gráficos representam uma análise comparativa da compactação entre o rolo compactador (GC Rolo) e o trator de esteira (GC Trator) em duas condições diferentes: topo e base. Abaixo, apresento uma análise para cada gráfico:

1. GC Rolo - Topo

- Média: A média é de aproximadamente 102,8%, mostrando uma compactação acima de 100%, o que indica uma densificação eficiente.
- Intervalo de dados: A compactação varia de 96,1% a 106,7%, o que mostra uma faixa ampla de compactação. Isso pode ser resultado de uma maior variabilidade no topo, provavelmente devido a variações no tipo de material ou na distribuição da força de compactação.
- Amplitude interquartil (IQR): O intervalo entre o 1º quartil (100,3%) e o 3º quartil (105,5%) mostra que a maioria dos dados está próxima da média, mas há alguns valores mais extremos (outliers), principalmente na faixa superior.

2. GC Rolo - Base

- Média: A média aqui é de 99,3%, o que significa que a compactação na base está próxima, mas ligeiramente abaixo de 100%.
- Intervalo de dados: Os valores variam de 92,8% a 106,6%. A faixa de variação é maior comparada ao topo, sugerindo uma maior variabilidade na compactação da base, o que pode ser causado por diferenças na densidade do solo ou na metodologia aplicada.
- Amplitude interquartil (IQR): A maioria dos valores está entre 97,0% e 101,1%, indicando que, embora haja variabilidade, a compactação na base é relativamente estável.

3. GC Trator - Topo

- Média: A média de 100,5% indica uma boa compactação no topo, com valores próximos de 100%, o que sugere uma eficiência adequada.
- Intervalo de dados: A compactação varia de 98,0% a 102,0%, com uma menor dispersão em comparação com o rolo compactador no topo. Isso sugere que o trator oferece um controle mais consistente no topo.

- Amplitude interquartil (IQR): A maioria dos valores está entre 99,5% e 101,8%, mostrando uma compactação muito uniforme e eficiente.

4. GC Trator - Base

- Média: A média é de 98,0%, abaixo de 100%, o que sugere que a compactação na base pelo trator foi um pouco menos eficaz que a do topo.
- Intervalo de dados: A variação é de 95,5% a 99,8%, com uma dispersão menor do que no caso do rolo compactador na base. Isso indica uma compactação mais consistente, embora levemente insuficiente em alguns pontos.
- Amplitude interquartil (IQR): A maior parte dos dados está entre 97,1% e 98,7%, confirmando que o trator produziu resultados mais uniformes na base do que o rolo.

Conclusão Comparativa

- Variabilidade: O rolo compactador apresenta maior variabilidade tanto no topo quanto na base, enquanto o trator de esteira oferece resultados mais consistentes.
- Eficiência de compactação: O rolo compactador mostra uma compactação superior à do trator no topo, mas apresenta maior variação nos valores. Já o trator, embora tenha uma menor média de compactação, proporciona resultados mais uniformes, especialmente no topo.
- Desempenho na base: Ambos os métodos apresentam dificuldades na base, com o rolo mostrando uma maior variabilidade, e o trator oferecendo maior consistência, mas com valores de compactação levemente abaixo de 100%.

6.4 Análise dos resultados

6.4.1 Motivos da maior variabilidade no uso de rolo compactador

A maior variação observada no desempenho do rolo compactador em comparação ao trator de esteira pode ser atribuída a uma série de fatores técnicos e operacionais. Aqui estão algumas das principais razões que podem explicar essa diferença:

1. Diferença no Modo de Operação:

- **Rolo Compactador:** O rolo compactador exerce uma compactação estática e dinâmica. Ele aplica uma pressão significativa em áreas específicas durante o movimento de rolagem, mas a densidade e a uniformidade podem variar dependendo da velocidade, do número de passadas, e até das condições de vibração do equipamento.
- **Trator de Esteira:** O trator de esteira distribui o peso de forma mais uniforme devido à grande área de contato das esteiras com o solo. A compactação ocorre mais por pressão estática, resultando em uma compactação mais homogênea ao longo da superfície, especialmente em áreas mais difíceis de compactar.

2. Área de Contato e Pressão Aplicada:

- **Rolo Compactador:** Embora aplique uma força de compactação intensa, o rolo liso tem uma área de contato menor comparado às esteiras do trator, o que significa que a pressão é mais concentrada em pontos específicos. Isso pode levar a inconsistências, especialmente em materiais que respondem de maneira não uniforme à pressão.
- **Trator de Esteira:** O trator, com suas esteiras largas, aplica a pressão de maneira distribuída sobre uma área maior, o que reduz a chance de variações extremas de compactação.

3. Interação com o Material Compactado:

- O comportamento do solo ou rejeito durante a compactação também pode influenciar a eficiência de cada equipamento. Materiais mais coesivos (com maior quantidade de argila, por exemplo) podem reagir de maneira diferente à vibração do rolo, causando compactação desigual, enquanto o trator pode ter mais facilidade em lidar com esses materiais, resultando em uma compactação mais uniforme.
- Na base (camadas mais profundas), onde o material pode ser mais heterogêneo ou úmido, o rolo pode encontrar dificuldades adicionais para compactar de maneira eficaz, especialmente se o material não responder bem à vibração.

4. Vibração e Frequência do Rolo:

- **Rolos compactadores vibratórios**, como o Hamm 3520 que estamos analisando, utilizam a vibração para ajudar a quebrar partículas e consolidar o solo. No entanto, se a frequência da vibração ou o número de passadas não forem ajustados corretamente

para o tipo de material e a profundidade desejada, isso pode causar uma compactação irregular.

- **Ausência de Vibração no Trator:** O trator de esteira não depende de vibração para compactação, aplicando apenas pressão estática. Isso reduz as variações que podem ocorrer devido a diferentes frequências de vibração inadequadas para o tipo de material.

5. Sensibilidade a Condições do Solo:

- **Rolo Compactador:** O desempenho do rolo é mais sensível às condições do solo, como umidade, granulometria e densidade natural. Solos mais úmidos ou irregulares podem levar a resultados inconsistentes, já que a vibração e o peso podem não ser distribuídos uniformemente.
- **Trator de Esteira:** O trator tende a ser mais adaptável a diferentes condições de solo, devido à sua capacidade de deslocar materiais e redistribuí-los de forma mais uniforme antes de compactar. Isso resulta em uma variação menor na compactação.

6. Número de Passadas e Padrão de Movimentação:

- **Rolo Compactador:** A qualidade da compactação pode variar dependendo do número de passadas e do padrão de movimentação aplicado. Se o número de passadas não for suficiente ou se houver sobreposição irregular, podem ocorrer pontos de compactação excessiva ou insuficiente.
- **Trator de Esteira:** Por sua maior área de contato, o trator tende a ser menos sensível ao número de passadas. Cada passada cobre uma área maior, diminuindo a necessidade de múltiplas passagens para atingir um nível uniforme de compactação.

7. Tipo de Solo ou Rejeito:

- **Rolo Compactador:** O rolo pode ser mais eficiente em solos granulares, mas quando utilizado em solos coesivos ou com alta umidade, a variação na compactação pode ser maior, especialmente nas camadas mais profundas (base), onde o solo pode ter uma maior heterogeneidade.
- **Trator de Esteira:** O trator de esteira é geralmente mais versátil e consegue compactar diferentes tipos de solo de maneira mais uniforme, independentemente da umidade ou composição do material.

6.4.2 Motivos das maiores compactações com rolo compactador

De modo geral, o rolo compactador consegue atingir compactações mais elevadas em comparação ao trator de esteira por vários fatores relacionados à sua construção e modo de operação. Aqui estão as principais razões para essa maior eficiência em compactação:

1. Aplicação de Maior Pressão Pontual:

- O rolo compactador, especialmente modelos como o Hamm 3520, aplica uma pressão muito intensa em uma área menor de contato. Isso faz com que o solo ou rejeito compactado sob o rolo seja pressionado com mais força por unidade de área, resultando em uma densificação maior do material.
- Em contraste, o trator de esteira distribui seu peso em uma área mais ampla (devido às esteiras), resultando em uma menor pressão por unidade de área. Isso contribui para uma compactação mais uniforme, mas com valores gerais de compactação menores.

2. Compactação Dinâmica com Vibração:

- O rolo compactador utiliza a vibração, que é um dos fatores críticos para alcançar uma compactação mais densa. A vibração ajuda a reorganizar as partículas do solo ou rejeito, permitindo que elas se aproximem mais umas das outras, eliminando vazios no material e, assim, aumentando a densidade.
 - A vibração induz a movimentação de partículas finas e granulares para preencher os vazios entre as partículas maiores, criando uma estrutura mais compactada.
- O trator de esteira, por outro lado, realiza a compactação apenas por pressão estática (peso), sem o benefício da vibração para mobilizar as partículas de forma eficaz. Isso limita sua capacidade de alcançar os níveis mais altos de compactação que o rolo consegue.

3. Maior Eficácia em Materiais Granulares:

- O rolo compactador é particularmente eficaz em materiais granulares (areia, cascalho, solos não coesivos), que respondem melhor à vibração e à alta pressão aplicada. Esses materiais tendem a se reorganizar de forma mais eficiente sob vibração, atingindo maiores densidades.

- O trator de esteira é mais adequado para compactar solos coesivos, que não reagem tão bem à vibração. Embora ele possa alcançar uma compactação uniforme, esses materiais não permitem que o trator atinja as mesmas densidades que o rolo consegue com materiais granulares.

4. Efeito de Impacto Repetitivo:

- O rolo compactador gera uma compactação cíclica devido à rotação contínua e repetição da aplicação de pressão em cada ponto à medida que se desloca. Isso permite uma consolidação progressiva do material. Com múltiplas passadas, o rolo consegue alcançar um nível de compactação muito elevado, superando o trator em termos de densidade.
- O trator de esteira, por outro lado, aplica seu peso de maneira estática e sem vibração. Mesmo com múltiplas passadas, a eficiência adicional em termos de densificação é limitada, pois o solo não é "reorganizado" da mesma maneira que acontece com a vibração do rolo.

5. Concentração de Peso em um Ponto Menor:

- O rolo compactador concentra grande parte do peso de sua estrutura em uma área relativamente pequena (cilindro liso), o que cria uma maior pressão em pontos localizados, levando a uma maior compactação.
- No trator de esteira, o peso é distribuído ao longo de toda a superfície das esteiras, o que gera menos pressão por unidade de área, limitando a capacidade de alcançar as mesmas densidades de compactação.

6. Melhor Controle sobre a Profundidade da Compactação:

- O rolo compactador tem a capacidade de compactar camadas de material de maior espessura em comparação ao trator, especialmente em materiais que reagem bem à vibração. Isso significa que o rolo consegue compactar camadas mais espessas de solo ou rejeito em uma única passada, resultando em uma maior densificação em profundidade.
- O trator de esteira tem mais dificuldade em compactar camadas espessas de material de maneira eficiente. A pressão estática aplicada tende a se dissipar mais rapidamente em

profundidade, o que significa que a compactação é menos eficiente em camadas profundas.

7. Flexibilidade no Ajuste de Frequência e Amplitude:

- Em muitos rolos compactadores modernos, é possível ajustar a frequência e a amplitude da vibração de acordo com o tipo de solo ou rejeito e a profundidade de compactação desejada. Isso permite uma otimização da compactação para diferentes materiais, maximizando a densidade alcançada.
- O trator de esteira não tem essa flexibilidade, pois depende apenas de sua pressão estática. Isso limita sua capacidade de ajustar a compactação para diferentes condições de material ou de terreno.

8. Mais Passadas com Menor Custo de Tempo:

- O rolo compactador, devido à sua maior eficiência em compactar camadas mais espessas com vibração, pode atingir uma compactação alta com menos passadas em comparação ao trator, que geralmente requer múltiplas passagens sobre a mesma área para atingir um nível aceitável de compactação.
- Esse fator contribui para o fato de o rolo compactador ser preferido quando se deseja alcançar maiores densidades em um tempo mais curto, o que pode ser essencial em projetos de grandes volumes.

6.4.3 Análise técnico econômica comparativa

Considerando os dados de custo operacional, produtividade e os resultados de compactação observados nos gráficos, é possível ter uma análise completa que aborde tanto os aspectos técnicos quanto os aspectos econômicos da utilização do trator de esteira e do rolo compactador no processo de compactação. Aqui estão os principais pontos:

1. Custo por metro quadrado compactado

Uma forma direta de comparar os dois equipamentos é calcular o custo operacional por metro quadrado compactado com base nos custos por hora e nas produtividades de cada equipamento.

Cálculo do Custo Operacional por m²:

- **Trator de esteira:**

- Custo por hora: R\$1.417,00
- Produtividade: 2.468 m²/h
- Custo por metro quadrado:

$$\frac{1.417,00}{2.468} \approx R\$0,57/\text{m}^2$$

- **Rolo compactador:**

- Custo por hora: R\$435,00
- Produtividade: 3.824 m²/h
- Custo por metro quadrado:

$$\frac{435,00}{3.824} \approx R\$0,11/\text{m}^2$$

Tabela 6.2: Custos e Produtividades

Equipamento	Custo por Hora (R\$)	Produtividade (m ² /h)	Custo por m ² (R\$)
Trator de Esteira	1.417,00	2.468	0,57
Rolo Compactador	435,00	3.824	0,11

2. Eficiência Econômica

Com base nos cálculos acima, o rolo compactador tem um custo significativamente mais baixo por metro quadrado compactado em comparação ao trator de esteira. O rolo compactador custa R\$0,11 por m², enquanto o trator custa R\$0,57 por m², o que faz com que o rolo seja aproximadamente 5 vezes mais econômico no que diz respeito ao custo por área compactada.

3. Produtividade

Além do menor custo por metro quadrado, o rolo compactador também oferece uma produtividade maior (3.824 m²/h) em comparação ao trator de esteira (2.468 m²/h). Isso significa que o rolo é capaz de compactar uma área maior em menos tempo, o que é particularmente importante em projetos onde o cronograma de execução é crítico.

4. Qualidade da Compactação

Do ponto de vista da qualidade da compactação:

- **Rolo compactador:**
 - Embora o rolo apresente uma compactação mais elevada (valores máximos de até 106%) e maior produtividade, ele também mostrou uma maior variação, especialmente nas camadas mais profundas (base), com valores mínimos de compactação abaixo de 95%. Isso pode resultar em uma compactação inconsistente em áreas específicas, o que pode ser uma preocupação dependendo das exigências de uniformidade do projeto.
- **Trator de esteira:**
 - O trator, embora tenha uma compactação média mais baixa (em torno de 98% a 102%), apresenta uma compactação mais uniforme e consistente, especialmente na base, com menor variação nos valores obtidos. Isso pode ser vantajoso em situações onde a uniformidade é mais importante do que atingir valores máximos de compactação.

5. Análise de Custo-Benefício

- Para projetos onde a uniformidade da compactação é prioritária, o trator de esteira pode ser mais apropriado, mesmo com o custo por metro quadrado sendo mais alto, pois garante que a base compactada tenha menor variação.
- No entanto, em projetos onde produtividade e custo são os principais fatores de decisão, o rolo compactador se mostra uma escolha mais vantajosa, oferecendo compactação elevada a um custo significativamente menor.

6. Conclusão Técnica e Econômica

Com base nos dados analisados:

- O rolo compactador tem uma vantagem econômica clara, tanto em termos de custo por metro quadrado quanto de produtividade. Ele também pode alcançar compactações mais elevadas, o que pode ser benéfico em solos granulares ou em projetos onde uma alta densidade é crítica.
- O trator de esteira, por outro lado, oferece uma compactação mais uniforme e consistente, com menor variação nos resultados, o que pode ser essencial em materiais coesivos ou em camadas de base onde a uniformidade é um fator decisivo.
- A escolha entre um e outro dependerá das especificações do projeto: se o foco for produtividade e economia, o rolo é a melhor opção. Se o foco for qualidade e uniformidade na compactação, o trator pode ser a escolha mais adequada, mesmo com o custo mais elevado.

7 – Conclusões

A disposição de rejeitos de mineração é um dos maiores desafios enfrentados pelo setor, especialmente em razão das tragédias recentes envolvendo barragens de rejeitos. O estudo realizado focou na comparação entre a compactação de rejeitos filtrados utilizando dois tipos de equipamentos de grande porte: o trator de esteira CAT D10T e o rolo compactador Hamm 3520 de 20 toneladas. Os testes realizados em campo permitiram avaliar a eficiência de cada equipamento em termos de compactação, produtividade e variabilidade dos resultados, proporcionando uma base técnica sólida para a tomada de decisões em projetos de empilhamento de rejeitos.

Os resultados mostraram que o rolo compactador apresentou maior eficiência em termos de compactação, com densidades mais elevadas, sobretudo nas camadas superiores. No entanto, esse equipamento demonstrou maior variabilidade nos resultados, especialmente nas camadas mais profundas, o que pode comprometer a uniformidade da compactação em determinadas situações. Por outro lado, o trator de esteira proporcionou uma compactação mais uniforme, ainda que com valores ligeiramente inferiores. Essa consistência pode ser vantajosa em áreas onde a regularidade da compactação é essencial para a estabilidade das estruturas de disposição.

Além disso, a análise técnico-econômica revelou que o rolo compactador é significativamente mais produtivo e econômico do que o trator de esteira, apresentando menor custo por metro quadrado compactado. Entretanto, a escolha entre os equipamentos deve

considerar não apenas o custo, mas também as características específicas do material a ser compactado, as exigências de compactação do projeto e o cronograma de execução.

Em conclusão, a disposição de rejeitos utilizando técnicas de empilhamento a seco, como o dry stacking, associada ao uso de equipamentos de grande porte, se mostra uma alternativa promissora para a mitigação dos riscos associados ao armazenamento de rejeitos líquidos. A decisão entre o uso de trator de esteira ou rolo compactador dependerá do equilíbrio entre a necessidade de compactação uniforme, a variabilidade dos resultados e os custos operacionais envolvidos, sendo fundamental que os engenheiros responsáveis avaliem cuidadosamente esses fatores para garantir a segurança e eficiência das operações.

8 – Sugestões para Pesquisas Futuras

Este trabalho apresentou uma análise detalhada sobre a disposição de rejeitos a seco utilizando trator de esteira e rolo compactador, bem como uma comparação técnico-econômica desses métodos. No entanto, a complexidade do tema e as constantes inovações tecnológicas no setor de mineração abrem uma vasta gama de oportunidades para pesquisas futuras. Algumas sugestões de estudos que podem contribuir para o aprimoramento e evolução dessa área são destacadas a seguir:

1. Estudo sobre a influência da granulometria e composição dos rejeitos na eficiência da compactação

A granulometria e a composição dos rejeitos são fatores críticos para a eficácia da compactação. Estudos futuros podem explorar como diferentes proporções de frações finas e granulares afetam o desempenho de compactadores e tratores de esteira, além de como variações na composição mineralógica influenciam a estabilidade das pilhas de rejeitos. Pesquisas experimentais que envolvam materiais com diferentes características podem ajudar a ajustar a escolha de equipamentos e técnicas de compactação.

2. Avaliação da estabilidade a longo prazo de pilhas de rejeitos compactados

Embora o método de empilhamento de rejeitos filtrados mostre-se promissor no curto prazo, a estabilidade dessas pilhas ao longo dos anos deve ser investigada com maior profundidade. Pesquisas futuras podem focar em estudos de monitoramento de longo prazo, investigando o comportamento das pilhas compactadas com diferentes técnicas e em diferentes condições

climáticas e de carga. Isso pode incluir a modelagem de possíveis cenários de falha e a definição de estratégias de mitigação.

3. Desenvolvimento de modelos computacionais para otimização da compactação

A utilização de ferramentas computacionais avançadas, como a modelagem de elementos finitos e a inteligência artificial, pode ser uma área promissora para futuras pesquisas. Tais modelos podem ser usados para prever o comportamento de pilhas de rejeitos sob diferentes condições de compactação e carga, facilitando o planejamento de operações mais eficientes e seguras. Modelos computacionais também podem otimizar o uso de equipamentos, reduzindo custos operacionais e riscos ambientais.

4. Investigações sobre o uso de tecnologias de sensoriamento remoto e drones para monitoramento de pilhas de rejeitos

O monitoramento contínuo da estabilidade das pilhas de rejeitos compactados é essencial para evitar acidentes. Pesquisas que envolvam o uso de drones e tecnologias de sensoriamento remoto para monitorar deformações, variações de umidade e outros fatores de risco podem ser altamente relevantes. Tais estudos podem ajudar a desenvolver sistemas automatizados de monitoramento em tempo real, permitindo respostas rápidas a potenciais instabilidades.

9 – Referências Bibliográficas

- **ABNT. Amostra de solo** - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. NBR 6457. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 9p.
- **ABNT. Solo - Determinação do limite de liquidez.** NBR 6459. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 6p.
- **ABNT. Solo - Determinação do limite de plasticidade.** NBR 7180. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 3p.
- **ABNT. Solo - Análise Granulométrica.** NBR 7181. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 13p.
- **ABNT. Solo - Ensaio de compactação.** NBR 7182. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 9p.
- **ABNT. Solo** - Determinação da massa específica aparente *in situ*, com emprego de cilindro de cravação. NBR 9813. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016. 3p.
- **AGÊNCIA BRASIL.** Desastre em Mariana é o maior acidente mundial com barragens em 100 anos. Notícia disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016-01/desastre-em-mariana-e-o-maior-acidente-mundial-com-barragens-em-100-anos>. 2015.
- **ALVES, P. I. A.** Empilhamento de rejeito filtrado - a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. Ouro Preto: UFOP, 2020. 114 p. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- **AMARAL, E.** Gestão de resíduos sólidos em barragens de rejeitos. Belo Horizonte, 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- **AMARANTE, Sérgio Coutinho.** Filtragem de minérios de ferro: comparação entre métodos de filtragem de laboratório: Testes de Folha e de Funil de Büchner. Belo Horizonte, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais.
- **BAREITHER, C. A., GORAKHKI, M. H., SCALIA, J., & JACOBS, M.** Compression behavior of filtered tailings and waste rock mixtures: GeoWaste. In: Tailings and Mine Waste Conference. Outubro, 2018.
- **BOCCAMINO, G. D.** Desenvolvimento de geometria para empilhamento de rejeitos desaguados de minério de ferro: Estudo de caso para os rejeitos gerados na instalação de tratamento de minérios itabiríticos (ITM-I) em operação na Mina do Pico. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2017.
- **BORGES, Rodrigo dos Passos.** Análise experimental de um aterro de rejeito arenoso compactado para fins de disposição em pilha. 2022. 150 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Geotécnica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

- **CRYSTAL, C.; CHORE, C.; EZAMA, I.** Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience. In: Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, 2018.
- **GOMES, M. F. M.** Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subproduto da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2009.
- **GUIMARÃES, N.C.** Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011.
- **HAWLEY, M & CUNNING, J.** Diretrizes para despejo de resíduos de mina e projeto de estoque. Publicação CSIRO, 2017.
- **IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração.** Economia Mineral do Brasil. Relatório disponível em: <http://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2018/08/economiamineral-brasil-set2018.pdf>. 2018.
- **IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.** Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Relatório de pesquisa, disponível em: http://ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriospesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf. 2012.
- **LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V.** Soil Mechanics. John Wiley and Sons, 1969.
- **LIMA, L. M. K.** Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo. Dissertação (Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2006.
- **MACHADO, W. G. F.** Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.
- **MEND – Mine Environment Neutral Drainage Project.** Study of Tailings Management Technologies. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), 2017.
- **MENDES, M. B.** Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito de minério de ferro alteada para montante. Dissertação de Mestrado, Departamento de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- **MILTONAS, J. G.** Análise do processo de reconstituição de amostras para caracterização do comportamento de barragens de rejeito de minério de ferro em aterro hidráulico. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, 2006.

- **MILTONAS, R.** Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- **MORGENSTERN, N.R., VICK, S.G., VIOTTI, C.B, WATTS, B.D.** Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. August, 2016. Available from: <http://fundaoinvestigation.com/the-report/>, acesso em 6/10/2016, 2016.
- **OLIVEIRA-FILHO, W. L.** Manejo de estéreis e de rejeitos de mineração. Notas de aula, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.
- **PIMENTA, L.** In: PORTES, A. M. C. Estudo do empilhamento drenado em barragens de rejeitos de minério de ferro. 2011.
- **PORTES, A. M. C.** Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2013.
- **SMITH, M.** Liquefaction in Dump Leaching. Mining Magazine, 2002.
- **ULRICH, B.** Practical thoughts regarding filtered tailings. In: AJC Paterson, AB Fourie & D Reid. Proceedings of the 22nd International Conference on Paste. Thickened and Filtered Tailings, Center for Geomechanics, Australian, 2019. p. 71-79.
- **ULRICH, B. & COFFIN, J.** Considerações para o projeto e operação da instalação de rejeitos usando rejeitos filtrados. In: 16º Seminário Internacional de Pasta e Rejeitos Espessados, Center for Geomechanics, Australian, 2013. p. 201-210.