

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**JOÃO BATISTA CYRINO FLORENCE**

**ESTUDO DE MECANISMOS DE DRENAGEM DE ÁGUA LIVRE PARA**  
**VAGÕES TRANSPORTADORES DE MINÉRIO DE FERRO**

**SANTOS/SP**  
**2025**

**JOÃO BATISTA CYRINO FLORENCE**

**ESTUDO DE MECANISMOS DE DRENAGEM DE ÁGUA LIVRE PARA  
VAGÕES TRANSPORTADORES DE MINÉRIO DE FERRO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr. Felipe Bertelli e coorientação do Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa

**SANTOS/SP**

**2025**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

625.734 , João Batista Cyrino Florence.  
F653e Estudo de mecanismos de drenagem de água livre para vagões transportadores de minério de ferro / João Batista Cyrino Florence. 2025. 80 f.

Orientador: Dr. Felipe Bertelli.  
Coorientador: Dr. Vitor Silva Rosa.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2025.

I. Bertelli, Felipe . II. Estudo de mecanismos de drenagem de água livre para vagões transportadores de minério de ferro.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho à minha família por sempre me incentivar a tentar, buscar e alcançar meu melhor e meu máximo e por sempre acreditar em mim, mesmo nos momentos de maiores dificuldades.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais pela minha criação baseada em valores de honestidade, bondade, justiça e humildade, os quais me guiaram e me instruíram por toda minha vida a tentar ser a melhor pessoa possível nesses quesitos honrosos, sem jamais desistir de prover o meu melhor.

Agradeço aos engenheiros Beatriz Borges Garcia, Isabella Ezverzuthe Gonzaga, Isabella Vieira Moraes, Leonardo Henriques dos Santos, Lívia de Souza Alves, Luís Henrique Fernandes de Albuquerque e Roberto Patella Neto por toda a assistência e o suporte operacional prestados com dedicação e fornecidos durante a operação e manuseio dos equipamentos, contribuindo na montagem, desmontagem, coleta de informações e registro fotográfico dos testes realizados, garantindo que o trabalho pudesse ser concretizado.

Agradeço ao engenheiro Álvaro Luiz Moreira Conrado e aos técnicos Irineu da Penha Ressureição e Volnei de Lemos pelo empenho, pela dedicação, investido no desenvolvimento, elaboração, construção e manutenção de todos os equipamentos, estruturas e maquinários necessários na realização deste projeto.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Bertelli e ao meu colega de mestrado engenheiro Gabriel Alcalá Tabata por sempre me apoiarem e me incentivarem, sempre serem insistentes e persistentes, não desistindo de acreditar em mim e na minha capacidade, mesmo durante meus momentos mais difíceis e de maior fraqueza, e por todo seu auxílio e orientação, juntamente com meu coorientador Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa e com meu colaborador Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior, estes dois a quem também agradeço conjuntamente, garantindo que a realização desse sonho se tornasse concreta e consolidada.

Agradeço à Universidade Santa Cecília por fornecer o espaço para manter e operar os equipamentos desta pesquisa, junto ao seu corpo docente e aos coordenadores do programa de pós-graduação stricto sensu por sua contribuição na minha formação.

Agradeço à empresa VALE SA, pelo financiamento desta pesquisa e pelo fornecimento de materiais, permitindo a este estudo contemplar todos os resultados obtidos.

## RESUMO

O transporte de minério de ferro normalmente é feito pelo modal ferroviário por vagões a céu aberto do tipo gôndola. Em países com altos índices pluviométricos, como é o caso do Brasil, podem armazenar água de chuva na parte superior da carga durante o trajeto, sendo denominada por água livre. Esta condição ocorre por uma série de fatores, associados ou não, como a ineficiência do sistema de drenagem, compactação da carga, saturação de água no carregamento, dentre outros. Conseqüentemente, pode acarretar situações indesejadas na parte logística, pois é um peso extra a ser carregado em cada vagão, permite a formação de blocos de minério aderidos, que dificultam o descarregamento, além de propiciar a formação de aderência de minério nas chapas internas do vagão. A combinação da compactação da carga úmida durante o deslocamento na via férrea com a ineficiência dos atuais drenos são os fatores de maior relevância para formação de água livre. Neste sentido, esta pesquisa propõe analisar diferentes mecanismos de drenagem, considerando drenos de cabeceira produzidos com preenchimentos de partículas uniformes que permitam uma mobilidade interna para limpeza de frestas onde a água pode drenar após percolar pelo minério, como alternativa aos atuais drenos sem preenchimento. Foram testadas esferas poliméricas, espuma polimérica e pedra brita, comparando-se com drenos semelhantes aos usados em via com abertura de frestas de 0,6mm. Uma bancada experimental foi utilizada, contendo torres de acrílico para depósito de colunas de minério em diferentes alturas e drenos feitos por impressão 3D de polímero ABS. A partir de diferentes alturas de carregamento de minério em relação aos drenos, foi observado que a relevância da percolação está associada ao próprio minério e não ao sistema de drenagem. Dentre os preenchimentos, a espuma foi a que apresentou melhor relação drenagem rápida/perda mássica reduzida de minério, seguida da esfera e depois da pedra brita. A formação de canal preferencial do topo da torre aos drenos depende da altura inicial da coluna de minério, sendo um indicativo para rápida eliminação de água livre no transporte ferroviário. A perda mássica depende da altura de carregamento e do sistema avaliado, sendo mais expressiva para o preenchimento com pedra brita e menos para a espuma.

**Palavras-chave:** Água livre; vagões gôndola; *pellet feed*; drenagem; bancada experimental.

## ABSTRACT

The transportation of iron ore is typically carried out via rail using open-top gondola-type wagons. In countries with high rainfall levels, such as Brazil, rainwater can accumulate on the upper surface of the cargo during transit, a condition known as free water. This situation arises from a range of factors, whether related or not, such as inefficient drainage systems, cargo compaction, water saturation during loading, among others. As a result, it can lead to undesirable logistical outcomes, such as extra weight in each wagon, the formation of adhered ore blocks that hinder unloading, and the adherence of ore to the wagon's internal plates. The combination of compacted wet cargo during rail transit and inefficient current drainage systems are the most relevant factors in the formation of free water. In this context, this research proposes to analyze different drainage mechanisms, considering head drains filled with uniform particles that allow internal mobility for cleaning gaps where water can drain after percolating through the ore, as an alternative to the current unfilled drains. Polymeric spheres, polymeric foam, and crushed stone were tested and compared with drains similar to those currently used on tracks, featuring 0.6 mm gap openings. An experimental bench was used, consisting of acrylic towers to deposit ore columns at different heights and drains made using 3D printing with ABS polymer. Based on different ore loading heights relative to the drains, it was observed that the significance of percolation is associated with the ore itself rather than the drainage system. Among the fillings, foam showed the best performance in terms of fast drainage combined with minimal ore mass loss, followed by the spheres and then crushed stone. The formation of a preferential flow path from the top of the tower to the drains depends on the initial ore column height and serves as an indicator for the quick removal of free water during rail transport. Mass loss depends on the loading height and the drainage system evaluated, being most significant with crushed stone filling and least with foam.

**Keywords:** Free water; gondola car; pellet feed; drainage; experimental bench.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reservas de minério de ferro em 2017. (Fonte: NOTAS GEO, 2019) .....	14
Figura 2 - Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM. (Fonte: VALE/ANTF, 2021) .....	15
Figura 3 - Estrada de Ferro de Carajás - EFC. (Fonte: VALE/ANTF, 2021) .....	15
Figura 4 – Vagão gôndola, à céu aberto. (Fonte: LUCCIO, 2016) .....	16
Figura 5 - Precipitação acumulada no mês de janeiro de 2024, em mm, nos estados do Maranhão, Minas Gerais e Espírito Santo. (INMET, 2024) .....	17
Figura 6 - Estoques de minério de ferro depositados ao livre após mineração, sujeitos a intempéries climáticas. (Fonte: Jornal do Comércio, 2017) .....	18
Figura 7 - Vagões de minério com formação de água livre (a) e recheio de minério no assoalho (b). (Fonte: autor) .....	19
Figura 8 - Acidente marítimo envolvendo tombamento de um navio. (Fonte: MMIA, 2018).....	20
Figura 9 - Exemplo de tombamentos de navios devido ao excesso de umidade contida nas cargas de sólidos a granel, ultrapassando o TML. (Fonte: MUNRO, 2015) .....	21
Figura 10 – Carregamento de minério de ferro na mina de Brucutu, parte da EFVM, com destaque para drenos de fundo instalados no assoalho do vagão. (Fonte: autor) .....	22
Figura 11 – Dreno entupido, visão inferior. (Fonte: autor).....	22
Figura 12 - Esquemática da densidade aparente. (Fonte: autor) .....	26
Figura 13 – Eliminação de poros, espaços vazios e passagens/caminhos livres e bloqueio da percolação de água por compactação através de uma vibração induzida externa. (Fonte: autor) .....	28
Figura 14 – Jogo de peneiras para análise granulométrica. (Fonte: SP LABOR, 2024) .....	29
Figura 15 – a) Saturação próxima de 0% (completamente seco) e b) Saturação próxima de 100% (completamente úmido). (Fonte: autor).....	31
Figura 16 – Percolação de água por meios/sólidos porosos. (Fonte: HOWTOCIVIL, 2024) .....	33
Figura 17 – Versão original da bancada como construída por Bogsan (2022), sendo 1) torres de acrílico (reservatórios de ensaio); 2) drenos intercambiáveis; 3) espaço para posicionamento de recipientes coletores dos resultados dos ensaios de drenagem; 4) placa estrutural de MDF para suporte dos ensaios; 5) estrutura metálica de aço; e 6) controlador eletrônico. (Fonte: BOGSAN, 2022) .....	34
Figura 18 - Desenho do protótipo da bancada, sendo 1) torres de acrílico (reservatórios de ensaio); 2) centro geométrico da placa superior; 3) dreno intercambiável; 4) placa superior de MDF para apoio das torres de ensaio; 5) placa inferior de MDF para suporte de béqueres coletores dos resultados dos ensaios; 6) béqueres para coleta de mistura de água mais minério proveniente da drenagem; e 7) estrutura metálica de aço. (Fonte: autor).....	35
Figura 19 – Modelo novo da bancada: a) vista superior inclinada e b) vista frontal. (Fonte: autor)....	36
Figura 20 – Ilustração do dispositivo indutor de vibração. (Fonte: autor).....	37
Figura 21 – Minério de ferro do tipo <i>pellet feed</i> . (Fonte: autor) .....	37
Figura 22 – Configuração de dreno utilizada. (Fonte: BOGSAN, 2022) .....	38
Figura 23 - Torres de acrílico com acoplamento de fundo e lateral (a) e representação esquemática do acoplamento do dreno (b). .....	39
Figura 24 – Torre lateral com acoplamento lateral (esquerda) e montagem com sistema de vedação (direita).....	40
Figura 25 - Torres de acrílico com dimensões 80x80x500 mm, usadas nos ensaios, com suportes distintos e específicos para cada tipo de dreno/preenchimento testado, sendo 1) disposição original de fundo para o dreno reto utilizada por Bogsan (2022); 2) nova disposição lateral para o dreno reto; e 3) disposição lateral para os preenchimentos. (Fonte: autor) .....	40
Figura 26 – Da esquerda para a direita: dreno reto de polímero ABS de abertura de frestas de 0,6 mm, esferas de polímero de 6,0 mm de diâmetro, espuma polimérica e brita. ....	41
Figura 27 - Suportes preenchidos com preenchimentos específicos: esferas (esquerda), espuma (centro) e brita (direita). (Fonte: autor) .....	42
Figura 28 – Agitador eletromagnético de peneiras. (Fonte: autor) .....	42

Figura 29 – Provetas utilizadas em ensaios como saturação, densidade aparente e compactação, com diâmetros internos de: 1) 114 mm; 2) 53 mm; 3) 48 mm e 4) 44 mm. (Fonte: autor) .....	43
Figura 30 – Acelerômetro usado para análises de vibração. (Fonte: autor) .....	44
Figura 31 – Ensaio de granulometria. (Fonte: autor) .....	45
Figura 32 – Ensaio de saturação. (Fonte: autor) .....	46
Figura 33 - Provetas com minério acopladas no agitador eletromagnético (a) e na bancada experimental (b). (Fonte: autor) .....	47
Figura 34 – Acelerômetro acoplado em torre carregada com minério na bancada (a) e no agitador eletromagnético (b). (Fonte: autor) .....	48
Figura 35 - (a) Funil de acrílico e (b) Funil acoplado à torre. (Fonte: autor) .....	49
Figura 36 – Torre carregada com minério depositado, sendo (a) dreno reto de fundo; (b) dreno reto lateral e (c) preenchimento lateral. (Fonte: autor) .....	49
Figura 37 - Dispositivo amortecedor de impacto de água. (Fonte: autor) .....	50
Figura 38 – Esquemática do ensaio com amortecedor. (Fonte: BOGSAN, 2022) .....	51
Figura 39 – Esquemática do ensaio de drenagem. (Fonte: autor) .....	52
Figura 40 – Exemplo de ensaio com dreno reto de fundo. (Fonte: autor) .....	52
Figura 41 – Curva granulométrica do <i>pellet feed</i> .....	54
Figura 42 – Determinação gráfica de $d_{60}$ e $d_{10}$ . .....	55
Figura 43 - Níveis de compactação para <i>pellet feed</i> nos dois dispositivos estudados, de acordo com o grau de saturação.....	57
Figura 44 – Compactação na proveta em escala ampliada .....	58
Figura 45 – Posicionamento das torres na bancada experimental. (Fonte: autor) .....	59
Figura 46 – Comportamento vibracional para cada posição da bancada experimental: posição A em azul (esquerda), posição B em laranja (centro) e posição C em verde (direita). .....	59
Figura 47 – Comportamento vibracional para o agitador eletromagnético de peneiras. ....	59
Figura 48 – Legendas para dispositivos e alturas iniciais da coluna de minério. ....	60
Figura 49 – Drenagem média para altura inicial de 100 mm. ....	61
Figura 50 - Drenagem média para altura inicial de 150 mm.....	62
Figura 51 - Drenagem média para altura inicial de 200 mm.....	62
Figura 52 - Drenagem média para altura inicial de 300 mm.....	63
Figura 53 - Drenagem média para o dreno de fundo.....	63
Figura 54 - Drenagem média para o dreno lateral.....	64
Figura 55 - Drenagem média para o preenchimento lateral de esferas. ....	64
Figura 56 - Drenagem média para o preenchimento lateral de espuma.....	65
Figura 57 - Drenagem média para o preenchimento lateral de brita. ....	65
Figura 58 – Perda mássica por dispositivo. ....	66
Figura 59 – Perda mássica por altura. ....	66
Figura 60 – Minério compactado ao final dos ensaios de 100, 150, 200 e 300 mm de altura, para o dreno reto de fundo, respectivamente.....	67
Figura 61 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o dreno reto lateral, para a altura inicial de 100 mm, com formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista de topo. ....	68
Figura 62 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o dreno reto lateral, para a altura inicial de 150 mm, sem formação de canal preferencial, sendo (a) vista lateral inclinada; (b) vista frontal e (c) vista posterior. ....	69
Figura 63 – Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de esferas, para a altura inicial de 100 mm, com formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista de topo.....	70
Figura 64 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de esferas, para a altura inicial de 300 mm, sem formação de canal preferencial, sendo (a) vista lateral e (b) vista frontal.....	71
Figura 65 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento	

lateral de espuma, para a altura inicial de 300 mm, sem formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal e (b) vista lateral.....	71
Figura 66 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de brita, para a altura inicial de 100 mm, com formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista de topo.....	72
Figura 67 – Sentido da percolação da água na torre de acrílico e proximidade dos acoplamentos de fundo e lateral entre si. (Fonte: autor) .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Densidade da espuma utilizada no projeto. ....	41
Tabela 2 – Granulometria de amostra de <i>pellet feed</i> . ....	53
Tabela 3 - Resultados de saturação para cada ensaio. ....	55
Tabela 4 – Resultados de densidade aparente para cada ensaio. ....	56
Tabela 5 – Indicativo de formação de canal preferencial. ....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	–	Em 3 dimensões
ABS	–	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i> (Acrilonitrila Butadieno Estireno)
EFC	–	Estrada de Ferro de Carajás
EFVM	–	Estrada de Ferro Vitória-Minas
GDE	–	Gôndola de descarga por extremidade
GDT	–	Gôndola de descarga por tombamento
MDF	–	<i>Medium Density Fiberboard</i> (Painel de Fibra de Média Densidade)
<i>Pellet Feed</i>	–	Minério de ferro do tipo utilizado na produção de pelotas
TML (LUT)	–	<i>Transportable Moisture Limit</i> (Limite de Umidade Transportável)

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta H$	–	Altura inicial de minério depositado
$\varphi$	–	Fração mássica de sólidos retidos
$\rho$	–	Densidade
$\rho_a$	–	Densidade aparente
B	–	Preenchimento lateral de brita
$C_u$	–	Coeficiente de Uniformidade
$C_x$	–	Concentração mássica da substância X
$d_i$	–	Diâmetro no qual i% da massa peneirada passa
$D_{ms}$	–	Diâmetro Médio de Sauter
$d_{pi}$	–	Diâmetro médio entre as peneiras que definem o intervalo
ESF	–	Preenchimento lateral de esferas
ESP	–	Preenchimento lateral de espuma
F	–	Dreno reto de fundo
L	–	Dreno reto lateral
m	–	Massa
$m_i$	–	Massa de outras substâncias
$m_t$	–	Massa total
$m_x$	–	Massa da substância X
V	–	Volume
$V_p$	–	Volume de preenchimento
$x_i$	–	Fração mássica do intervalo entre peneiras consecutivas

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 IMPORTÂNCIA.....	14
1.2 PROBLEMÁTICA.....	17
1.3 JUSTIFICATIVA.....	23
1.4 OBJETIVO.....	23
1.4.1 <i>Objetivo geral</i> .....	23
1.4.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	23
1.5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
1.5.1 <i>Densidade aparente</i> .....	24
1.5.2 <i>Compactação</i> .....	27
1.5.3 <i>Granulometria</i> .....	28
1.5.3.1 <i>Diâmetro Médio de Sauter</i> .....	29
1.5.3.2 <i>Coefficiente de Uniformidade</i> .....	30
1.5.4 <i>Concentração mássica e saturação de água</i> .....	30
1.5.5 <i>Permeabilidade</i> .....	32
1.5.6 <i>Canal preferencial</i> .....	33
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
2.1 MATERIAIS.....	35
2.1.1 <i>Bancada experimental</i> .....	35
2.1.2 <i>Minério de ferro pellet feed</i> .....	37
2.1.3 <i>Dreno reto</i> .....	38
2.1.4 <i>Reservatórios de ensaio (torres de acrílico)</i> .....	39
2.1.5 <i>Preenchimentos</i> .....	41
2.1.6 <i>Agitador eletromagnético e jogo de peneiras</i> .....	42
2.1.7 <i>Provetas de acrílico</i> .....	43
2.1.8 <i>Acelerômetro</i> .....	43
2.2 MÉTODOS.....	44
2.2.1 <i>Caracterização do minério</i> .....	44
2.2.1.1 <i>Granulometria</i> .....	44
2.2.1.2 <i>Saturação</i> .....	45
2.2.1.3 <i>Densidade aparente</i> .....	46
2.2.1.4 <i>Compactação</i> .....	46
2.2.2 <i>Caracterização da bancada</i> .....	47
2.2.2.1 <i>Vibração</i> .....	47
2.2.3 <i>Percolação e drenagem</i> .....	48
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MINÉRIO.....	53
3.1.1 <i>Granulometria</i> .....	53
3.1.2 <i>Saturação</i> .....	55
3.1.3 <i>Densidade aparente</i> .....	56
3.1.4 <i>Compactação</i> .....	56
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BANCADA.....	58
3.2.1 <i>Vibração</i> .....	58
3.3 DRENAGEM.....	60
4 CONCLUSÕES.....	75
4.1 TRABALHOS FUTUROS.....	75
REFERÊNCIAS.....	76

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Importância

O Brasil configura no cenário mundial como um dos países com as maiores jazidas de minérios de ferro no mundo, assim como Austrália, Rússia, China e Índia (Figura 1) (ANDRADE, CUNHA, VIEIRA, 1995; ANM, 2023; CARVALHO, et al, 2014; IPEA, 2023). Em 2020, após ultrapassar óleos brutos de petróleo, o minério de ferro se posicionou como o produto de maior receita e participação na indústria do país (IBGE, 2023).

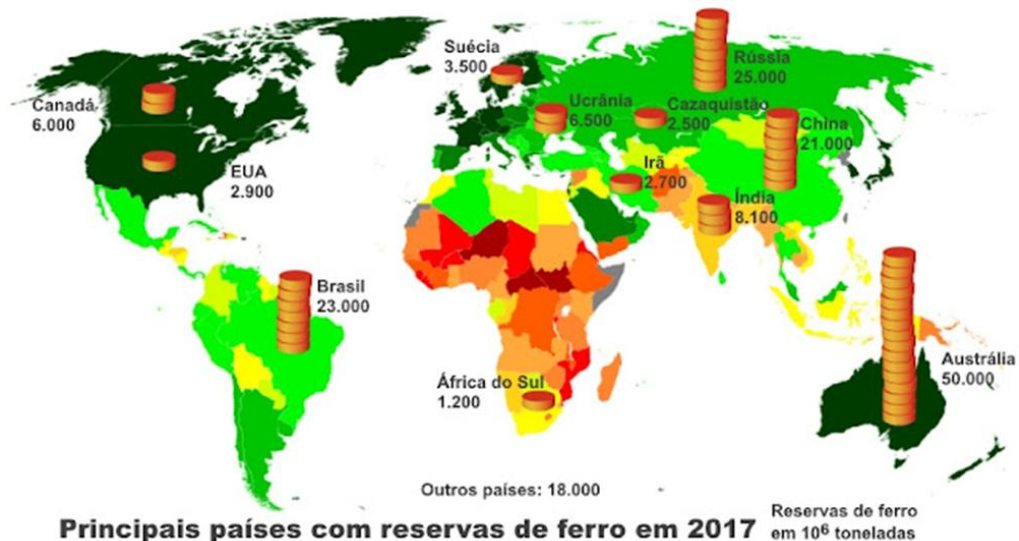


Figura 1 - Reservas de minério de ferro em 2017. (Fonte: NOTAS GEO, 2019)

O transporte de minério no Brasil é feito quase que exclusivamente pelo modal ferroviário, com mais de 90% das exportações em 2023 (ANTF, 2024). Tal transporte é feito por malhas ferroviárias, sendo a Estrada de Ferro Vitória-Minas (EFVM) e a Estrada de Ferro de Carajás (EFC) duas das principais do país (CBFA, 2024; WASAKI 2024), conforme ilustrado nas Figura 2 e Figura 3.



Figura 2 - Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM. (Fonte: VALE/ANTF, 2021)



Figura 3 - Estrada de Ferro de Carajás - EFC. (Fonte: VALE/ANTF, 2021)

Os vagões que operam em tais vias são do tipo gôndola (GDT – Gôndola de Descarga por Extremidade ou GDE – Gôndola de Descarga por Tombamento), a céu aberto, conforme mostrado na Figura 4. Nesta condição de operação, as intempéries regionais das estradas de ferro mencionadas podem se tornar um problema para o transporte desde a mina até o porto.



Figura 4 – Vagão gôndola, à céu aberto. (Fonte: LUCCIO, 2016)

Por ser um país de natureza tropical, o Brasil possui altos índices pluviométricos ao longo de seu vasto território, principalmente na região norte, onde boa parte do minério de ferro brasileiro é escoado. Na Figura 5 vemos o índice em milímetros acumulado apenas em janeiro de 2024 em todo o Brasil, mostrando o tom mais escuro em quase toda a faixa destacada na linha pontilhada vermelho, onde o minério é escoado pelas estradas de ferro EFC (Estrada de Ferro de Carajás) e EFVM (Estrada de Ferro Vitória-Minas).

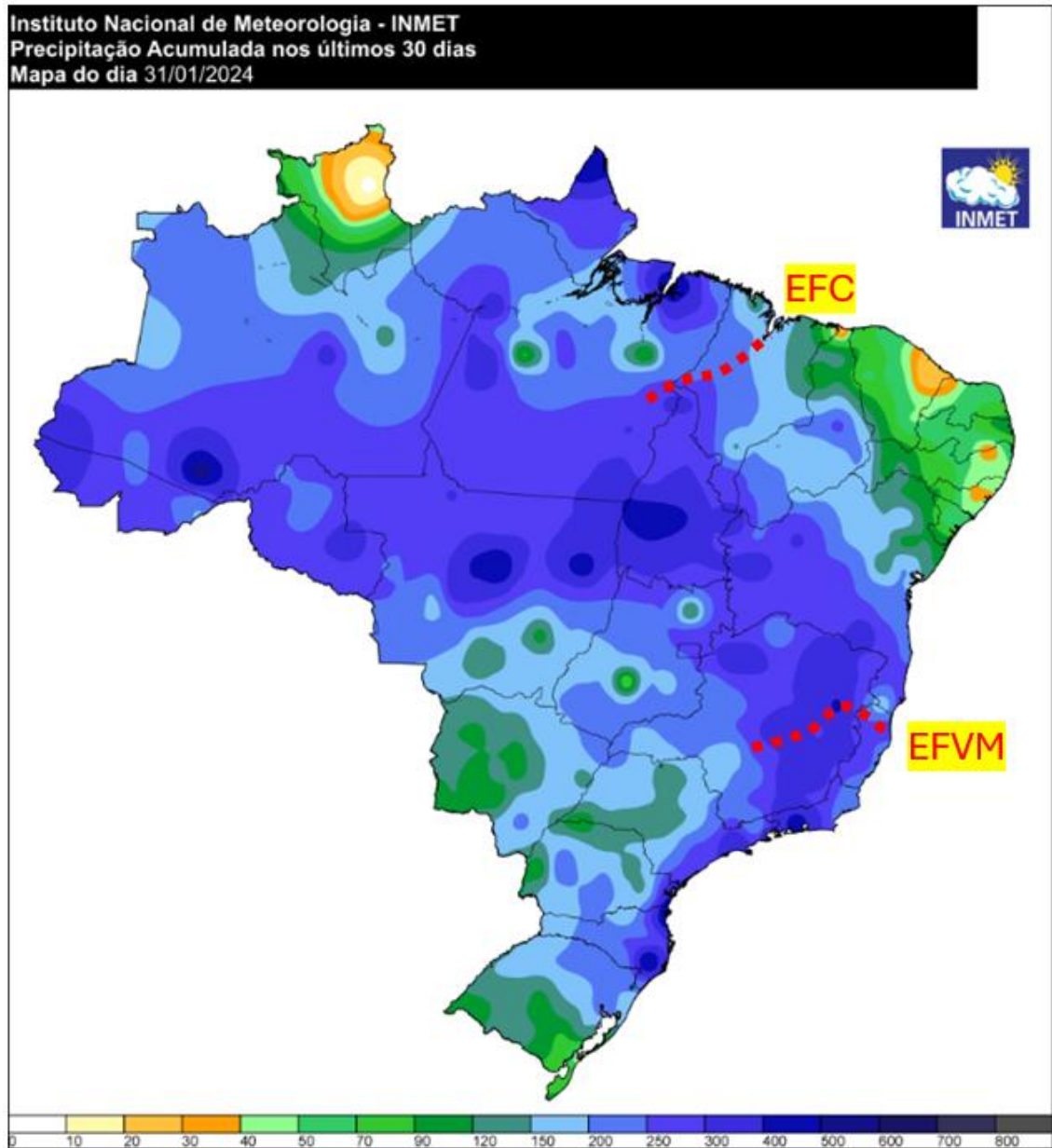


Figura 5 - Precipitação acumulada no mês de janeiro de 2024, em mm, nos estados do Maranhão, Minas Gerais e Espírito Santo. (INMET, 2024)

## 1.2 Problemática

Devido aos números expressivos de volume de processamento, o minério de ferro é armazenado em pilhas ao ar livre, sujeitas às intempéries, impondo à sua condição prévia para o carregamento nos vagões altos índices de umidade acumulada ou saturação (Figura 6).



Figura 6 - Estoques de minério de ferro depositados ao livre após mineração, sujeitos a intempéries climáticas. (Fonte: Jornal do Comércio, 2017)

Por ser aberto em sua parte superior, o vagão do tipo gôndola pode apresentar acúmulo de água decorrente das chuvas na superfície do minério (Figura 7 - a), a qual denomina-se água livre, e recheio de minério (Figura 7 - b), que é o material aderido nas paredes internas após o descarregamento. Esta formação de água livre pode se dar por uma série de fatores, dentre eles:

- a) ineficiência da percolação da água entre o minério e posterior drenagem para fora do vagão;
- b) entupimento do sistema de drenagem;
- c) umidade da carga no carregamento;
- d) compactação pelas vibrações inerentes da dinâmica de deslocamento na via.



Figura 7 - Vagões de minério com formação de água livre (a) e recheio de minério no assoalho (b).

(Fonte: autor)

A formação de água livre sobre o minério transportado no vagão pode desencadear uma série de problemas logísticos. Por exemplo, considerando um vagão do tipo GDE com dimensões de aproximadamente 8,5 m de comprimento e 2,4 m de largura na parte superior e adotando a densidade da água à temperatura ambiente como aproximadamente  $1000 \text{ kg/m}^3$ , cada 10 cm de coluna de água equivale a aproximadamente 2 toneladas de peso extra.

Quanto à questão dos recheios, se faz necessário a interrupção do descarregamento para efetuar a remoção com métodos manuais de limpeza para manutenção dos vagões, acarretando um prejuízo temporal e financeiro. Além disso, o descarregamento de uma carga com excesso de umidade pode danificar os sistemas de recebimento da carga pelo fato de grandes blocos de minérios compactados se desprenderem, o que tende a quebrar as esteiras ou reservatórios de estocagem abaixo do descarregador de vagões (FLORENCE, et al, 2024; MASSARSCH, 2002).

Uma outra questão logística diz respeito ao TML (*Transportable Moisture Limit*, ou Limite de Umidade Transportável – LUT em português). O TML é caracterizado como limite máximo permitido de umidade (água) contida numa carga de sólido a granel, no qual é seguro carregar o material em uma embarcação (MUNRO, MOHAJERANI, 2015). Seu propósito é evitar possíveis acidentes marítimos (tombamentos) devido a fatores físicos e morfogeométricos, como a desestabilização e o desequilíbrio do centro de gravidade de um navio enquanto transporta tal carga.

O deslocamento de navios ao longo de rotas marítimas tempestuosas e afetadas pela movimentação oceânica (ondas), somado a alterações causadas nos centros de gravidade e geométrico da embarcação, devido ao acúmulo excessivo de água livre dentro da carga de sólido granulado (umidade), levam a tombamentos, conforme ilustrado nas Figura 8 e Figura 9, ou outros tipos de acidentes marítimos; culminando em grandes perdas financeiras, materiais e, até mais importantes, perdas de vida. Sendo assim, é fundamental e imprescindível que a carga a ser transportada seja carregada próxima do LUT, no caso dos vagões, evitando contratempos de secagem mais demorada próximo aos terminais portuários. O teor de umidade deve estar abaixo do TML para que a carga seja aceita para transporte no navio.



Figura 8 - Acidente marítimo envolvendo tombamento de um navio. (Fonte: MMIA, 2018)



Figura 9 - Exemplo de tombamentos de navios devido ao excesso de umidade contida nas cargas de sólidos a granel, ultrapassando o TML. (Fonte: MUNRO, 2015)

Logo, as técnicas de drenagem da carga desempenham um papel crucial na eliminação deste excesso de água e sua manutenção ou projeção de melhorias no projeto se tornam foco de estudos para as empresas transportadoras. Atualmente drenos posicionados na cabeceira ou no assoalho dos vagões, como exemplificado na Figura 10, demonstram-se ineficientes em razão de dois principais motivos.

O primeiro é o fato de a água estar basicamente impossibilitada de percolar até tais drenos em virtude do efeito da compactação do minério de ferro; a água demora a chegar até os drenos de fundo e fica acumulada na superfície livre até o descarregamento. O segundo caracteriza-se pela evolução do entupimento de tais drenos (BOGSAN, et al, 2022) ao longo do tempo, conforme a Figura 11, o que dificulta ainda mais a drenagem da água, se essa eventualmente consegue alcançar os drenos de fundo em pequenas quantidades.

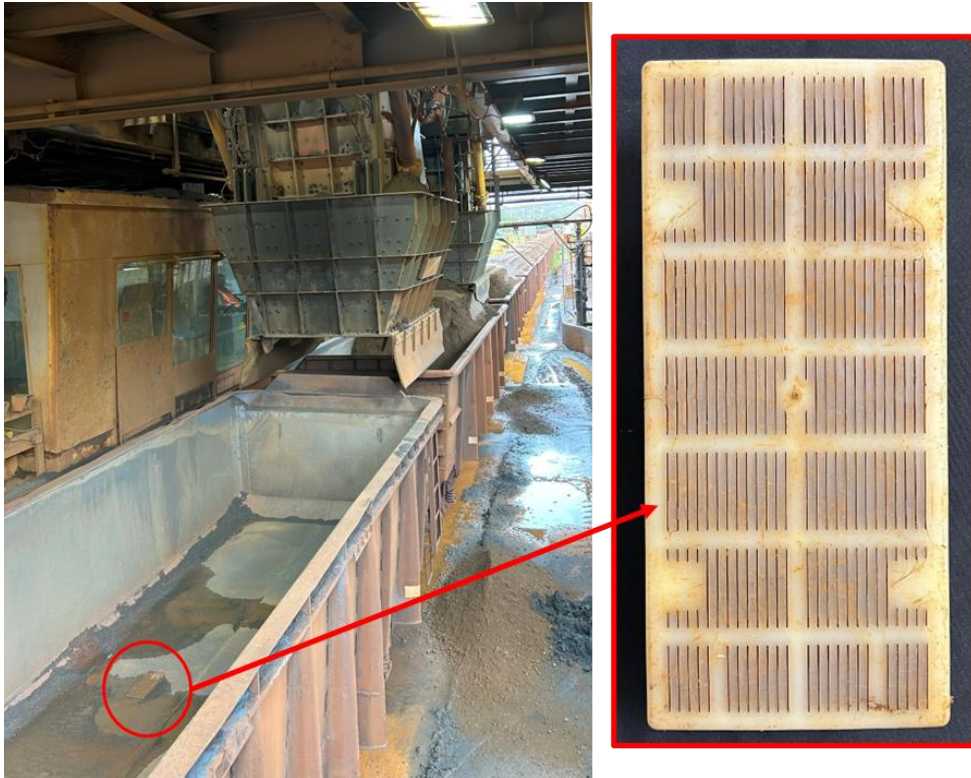


Figura 10 – Carregamento de minério de ferro na mina de Brucutu, parte da EFVM, com destaque para drenos de fundo instalados no assoalho do vagão. (Fonte: autor)



Figura 11 – Dreno entupido, visão inferior. (Fonte: autor)

Em virtude dessas questões, outros tipos de dispositivos de drenagem que se utilizem de meios permeáveis podem representar uma forma alternativa, reduzindo o carregamento de partículas e melhorando as condições de fluxo para drenagem (ALMEIDA, et al, 2005; MATOS, 2019; PEREIRA, 1988).

### 1.3 Justificativa

A ineficiência dos drenos atuais para vagões do tipo gôndola transportadores de minério de ferro leva à procura de outros sistemas de drenagem, considerando o fato da grande dificuldade e até impossibilidade de percolação da água até o assoalho do vagão.

O acúmulo de água no vagão devido a esta incapacidade de drenagem acarreta diversos contratempos de natureza logística como, por exemplo, contaminação das malhas ferroviárias, maiores despesas com combustível e paradas para desobstrução, diminuindo a eficiência no transporte e descarga do minério.

Portanto, é fundamental o desenvolvimento de novos modelos de drenagem para viabilizar um melhor transporte e manuseio de minério de ferro desde as minas produtoras até os portos para exportação (SEABRA, 2021).

### 1.4 Objetivo

#### 1.4.1 Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo investigar qualitativa e quantitativamente alternativas ao dreno de fundo tradicional de vagões gôndola utilizados no transporte de minério de ferro, visando identificar soluções mais eficientes para a drenagem de água acumulada durante o transporte.

#### 1.4.2 Objetivos específicos

Visando alcançar o objetivo geral do trabalho, teve-se como objetivos específicos:

- a) Revisão bibliográfica sobre mecanismos de compactação e percolação de água em meios granulométricos;
- b) Levantamento bibliográfico frente aos modelos de drenagem empregados em vagões de transporte de minério;
- c) Aprimoramento de uma bancada experimental, desenvolvida previamente a este projeto para os estudos de drenagem;
- d) Desenvolvimento de projetos de mecanismos de drenagem com

inserção de preenchimentos para bloqueio de perdas de massa de minérios;

- e) Avaliação dos parâmetros de compactação, percolação e drenagem de água para os modelos de drenagem propostos.

## 1.5 Fundamentação teórica

Sólidos granulados não são sólidos densos e contínuos, mas sim caracterizam-se como um aglomerado de partículas que os constituem.

Naturalmente, quando depositado e acomodado, um sólido a granel apresenta espaços vazios entre as partículas que o compõe. Quando misturados com água, tais espaços são usados como caminhos no processo de distribuição da mistura, denominado percolação. Pela ação da gravidade, os meios vazios tendem a ser ocupados verticalmente de modo descendente, a fim de escoar para a parte inferior. Quando estes sólidos são submetidos a vibração, os particulados do minério, principalmente os menores, tendem a se alocar e se reacomodar, preenchendo e eliminando os espaços vazios entre si, ficando assim cada vez mais compactados (TRINDADE, et al, 2003). Dessa forma, essas passagens são eliminadas, o que impede o escoamento da água através do minério.

No caso do minério de ferro transportado em vagões, a drenagem da água durante o transporte possui limitações físicas como os exemplificados anteriormente, pois existirão cada vez menos espaços vazios disponíveis por onde a água pode percolar para ser drenada para fora do vagão. Com o passar do tempo, o fenômeno de compactação tende a prolongar o tempo necessário para a drenagem da água, resultando no acúmulo de água livre sobre a carga.

Esta pesquisa, que analisará o comportamento da percolação e drenagem da água por meio de novos mecanismos propostos, incluirá uma análise baseada na caracterização mineralógica, contemplando a determinação da densidade aparente, granulometria, concentração mássica e saturação. (KLEIN, DUTROW, 2011).

### 1.5.1 Densidade aparente

É importante saber a densidade real do sólido granulado, pois é a carga que está sendo carregada e transportadas, e isso impacta em fatores como consumo de

combustível e até mesmo quanto pode ser comportado em cada vagão; uma densidade aparente maior implica numa quantidade mais elevada de material por vagão, otimizando o transporte. Densidades aparentes mais baixas podem afetar a estabilidade do trem, sendo que tais cargas tender a ser mais volumosas e suscetíveis ao deslocamento, enquanto cargas mais densas e compactas normalmente são mais estáveis. Por fim, densidades mais altas exigem equipamentos que suportem maiores cargas mecânicas.

Designa-se como densidade ou massa específica a razão entre a massa de uma quantidade de matéria, seja ela sólida, líquida ou gasosa, e o volume ocupado por ela, conforme a (Eq.1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Sendo

$\rho$  a densidade da substância estudada [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$m$  a massa da substância estudada [ $\text{kg}$ ];

$V$  o volume ocupado pela substância estudada [ $\text{m}^3$ ].

No caso de sólidos granulados, como o minério de ferro, o conceito de densidade se adapta devido à natureza particulada do material. Quando depositados e acomodados, os sólidos granulados apresentam espaços vazios entre as partículas. Esses espaços, inicialmente preenchidos pelo ar, um dos fluidos gasosos mais comuns em materiais a granel, afetam a medição da densidade.

Como a densidade do ar é significativamente menor que a densidade do sólido, a presença desses vazios reduz o valor obtido para a densidade total do material. Essa medida, denominada densidade aparente, considera tanto a massa do sólido quanto os espaços vazios preenchidos pelo ar, resultando em um valor inferior à densidade real do sólido propriamente dito (WOODCOCK, MASON, 1987).

Essa quantidade de inúmeros poros preenchidos com ar, ilustrados na Figura 12, aumenta significativamente o volume real que seria ocupado apenas por uma massa densa, completamente sólida. Através de vibração, ou golpes/impactos no recipiente, que leva a compactação, propicia-se a diminuição expressiva desse volume através da expulsão de ar e da eliminação dos espaços vazios. Juntamente, a perda de massa do sistema devido a expulsão do ar é insignificante e desprezível, devido à baixa massa específica do ar.

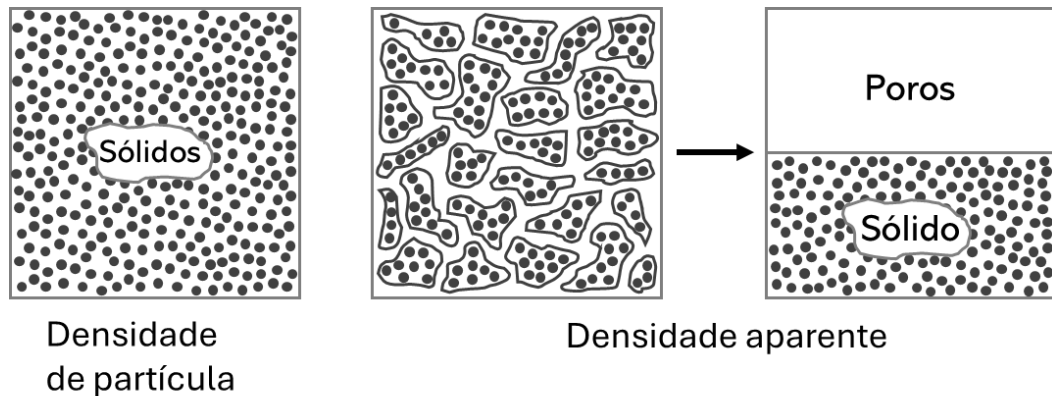


Figura 12 - Esquemática da densidade aparente. (Fonte: autor)

Propriedades que influenciam na densidade aparente:

- a) Tamanho de partícula;
- b) Distribuição do tamanho de partícula;
- c) Área de superfície;
- d) Rugosidade da superfície;
- e) Entre outros.

Portanto, a densidade aparente de um sólido granulado determina a massa específica de um material levando em consideração a porosidade das partículas e do meio, sendo descrita através da (Eq. 2).

$$\rho_a = \frac{m_t}{V_p} \quad (2)$$

Em que

$\rho_a$  é a densidade aparente do sólido a granel estudado [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];

$m_t$  é a massa total do sólido a granel estudado [kg];

$V_p$  é o volume de preenchimento ocupado pelo sólido a granel estudado [ $\text{m}^3$ ].

### 1.5.2 Compactação

A compactação atua diretamente nas capacidades de percolação e drenagem de água acumulada em excesso, tanto intrinsecamente ao acondicionamento do minério de ferro quanto acima dele em superfície livre. É crucial entender esse comportamento para poder ser feita uma análise e um estudo minuciosos e completos de tais características. Quanto maior a compactação, mais difícil é a percolação, portanto mais inviável fica a drenagem, uma desvantagem. Porém, contraditoriamente, uma compactação maior implica, positivamente, num maior transporte de massa, otimizando a logística. Ainda mais, a compactação também interfere de maneira favorável na estabilidade dos vagões e do trem.

Compactação refere-se à compressão do sólido a granel pela expulsão do ar e rearranjo de suas partículas por meio da aplicação de energia mecânica. A energia aplicada durante a compactação obriga as partículas a ocuparem os espaços vazios disponíveis. Sólidos granulados com uma ampla variedade de tamanhos de partículas, como o minério de ferro, tendem a compactar de maneira mais eficiente do que solos com uma distribuição de partículas menos uniforme (GONTIJO, 2017). Apresenta-se na Figura 13 de forma esquemática a forma como os poros de uma mistura de sólido granel com água são eliminados ao se aplicar uma força vibracional externa.

A compactação modifica a porosidade e a permeabilidade, causando efeitos adversos tais quais uma expressiva redução na capacidade de percolação de água, uma vez que os espaços vazios e as passagens livres que se constituem como caminhos para trânsito por ela deixam de existir.

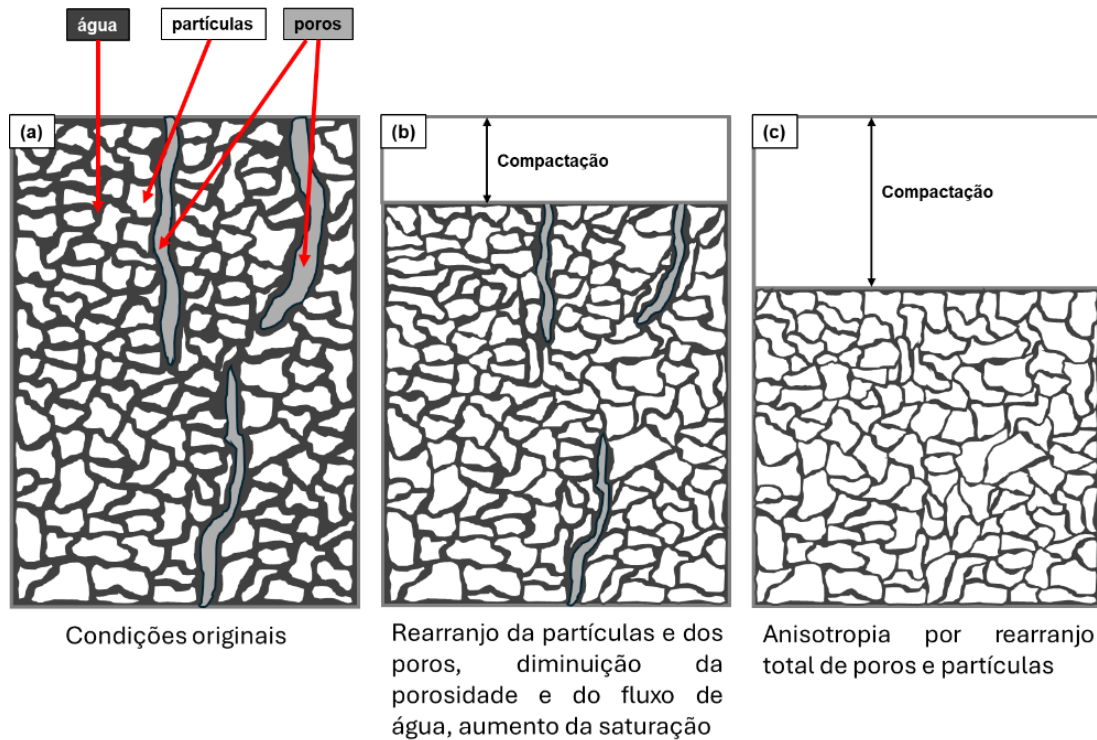


Figura 13 – Eliminação de poros, espaços vazios e passagens/caminhos livres e bloqueio da percolação de água por compactação através de uma vibração induzida externa. (Fonte: autor)

### 1.5.3 Granulometria

O formato do particulado transportado está diretamente ligado à condição de compactação, que pode dificultar a drenagem e o carregamento úmido do minério. Por outro lado, as frestas dos drenos precisam ser dimensionadas adequadamente para evitar perdas excessivas no deslocamento mina/porto. Ademais, uma boa distribuição granulométrica garante melhor acomodamento no vagão, o que evita deslocamentos que podem causar instabilidade ou tombamentos durante o transporte. Um minério com tamanhos de partículas mistas finas e grosserias pode aumentar a densidade aparente, sendo que as menores preenchem os espaços entre as maiores.

A análise granulométrica avalia a distribuição das dimensões dos grãos de um sólido a granel. Ou seja, é a determinação das dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência. É a medida que descreve a distribuição dos diferentes tamanhos de partículas minerais presentes em um sólido granulado. Essa distribuição é importante porque afeta diversas propriedades do sólido, como porosidade, permeabilidade e higroscopia (WOODCOCK, MASON, 1987).

A análise granulométrica é comumente realizada por peneiramento em jogo de peneiras com malhas de aberturas gradativas (Figura 14), da maior para menor, umas sobre as outras e dispostas sobre um agitador eletromagnético. A curva granulométrica mostra a percentagem acumulada de partículas nas bandejas que são maiores que cada malha, revelando sua distribuição morfológica por separação da mistura inicial (SHATOKHA, 2018).



Figura 14 – Jogo de peneiras para análise granulométrica. (Fonte: SP LABOR, 2024)

#### 1.5.3.1 Diâmetro Médio de Sauter

O Diâmetro Médio de Sauter é uma medida média de tamanho de partícula. É determinado como o diâmetro de uma esfera que tem a mesma relação volume por área superficial que a partícula estudada, sendo obtido a partir da relação entre a peneira maior e a menor de um intervalo específico de fração mássica retida no peneiramento (KOWALCZUK, DRZYMALA, 2016). Por considerar a relação volume-superfície, é mais relevante em comparação com médias aritméticas ou geométricas, o que o torna especialmente útil. É calculado através da equação da (Eq. 3).

$$D_{MS} = \frac{1}{\sum_1^i \left( \frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (3)$$

Sendo

$D_{MS}$  o Diâmetro Médio de Sauter [ $\mu\text{m}$ ];

$x_i$  a fração mássica do intervalo;

$d_{pi}$  o diâmetro médio entre as peneiras que definem o intervalo [mm].

### 1.5.3.2 Coeficiente de Uniformidade

O Coeficiente de Uniformidade é um parâmetro indicativo da regularidade do tamanho de partícula do particulado que compõe um sólido granulado (CAPUTO, 2022). Ele demonstra se a maioria das partículas constituintes desse tipo de sólido possuem dimensões similares ou não. Calcula-se o Coeficiente de Uniformidade através da (Eq. 4).

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4)$$

Sendo

$C_u$  o Coeficiente de Uniformidade;

$d_{60}$  o diâmetro no qual 60% da massa passa no peneiramento [mm];

$d_{10}$  o diâmetro no qual 10% da massa passa no peneiramento [mm].

Para valores de  $C_u$  inferiores a 5, considera-se o material estudado muito uniforme, para valores entre 5 e 15, uniforme, e por fim, valores acima de 15 determinam que o material é não uniforme.

### 1.5.4 Concentração mássica e saturação de água

Uma maior quantidade de água presente nos espaços vazios entre as partículas do sólido granulado implica em um peso desnecessário, o qual deve ser contabilizado, por exemplo, no consumo de combustível para efetuar o transporte de toda a carga pela malha ferroviária. Além disso, a influência da umidade pode ser observada tanto na densidade aparente quanto nos fatores de adesão, coesão e união do particulado, acarretando a formação de minério aderido nas partes internas dos vagões (recheio), e também levando a entupimentos dos drenos.

A concentração mássica de uma substância é a proporção entre sua massa e a massa total do sistema do qual faz parte, expressa em porcentagem pela (Eq. 5).

$$C_x = \frac{m_x}{m_x + \sum_1^i m_i} \times 100 \quad (5)$$

Em que

$C_x$  é a concentração mássica da substância estudada;

$m_x$  é a massa da substância estudada [kg];

$m_i$  são as massas das outras substâncias que compõem o sistema, variando da primeira até a última [kg].

A saturação, representada pela concentração mássica de água na mistura de água com particulado granular, refere-se ao grau de umidade do material. Essa propriedade é essencial para analisar as características de adesão do minério às superfícies, como as paredes internas dos vagões. Trata-se de uma análise que considera, de forma quantitativa e qualitativa, o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas sólidas com água.

Materiais a granel, como o minério de ferro, possuem porosidade natural. Quando depositados e acomodados, esses poros podem ser preenchidos por água (Figura 15), proveniente de fontes externas, como a chuva, ou mesmo da umidade presente no ar atmosférico. A saturação, portanto, desempenha um papel crucial no comportamento do material em condições reais de transporte e armazenamento (LIMA, et al, 2013).

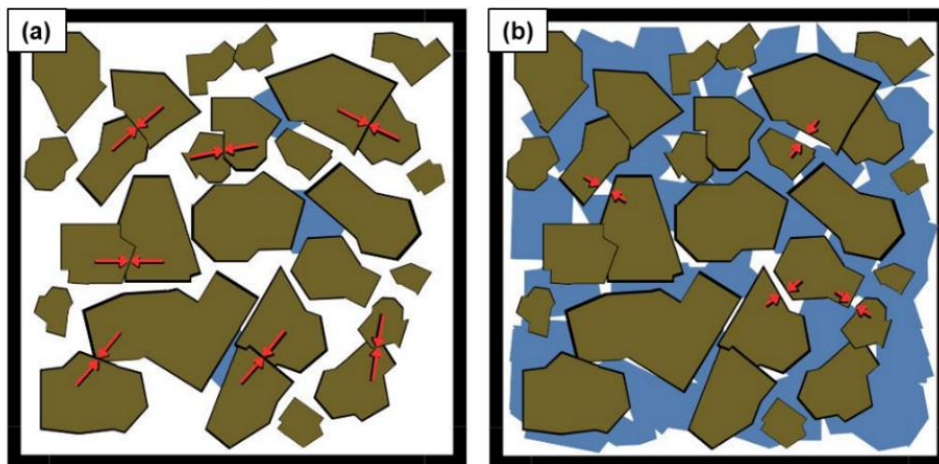


Figura 15 – a) Saturação próxima de 0% (completamente seco) e b) Saturação próxima de 100% (completamente úmido). (Fonte: autor)

Quando o minério está completamente seco, nenhum de seus poros estão preenchidos com água. Em contrapartida, numa saturação máxima de 100%, todos os seus poros encontram-se repletos de água. Há também casos de supersaturação, acima de 100%, onde acumula-se água em excesso sobressalente no minério.

#### 1.5.5 Permeabilidade

A permeabilidade também interfere na percolação, escoamento e drenagem de água e, inclusive, na passagem de ar, propiciando a retenção ou a formação de bolsões do mesmo. Baixa permeabilidade é desvantajosa para a drenagem eficiente de água, enquanto a alta permeabilidade é almejada por ajudar na drenagem natural. A permeabilidade desempenha um papel fundamental e essencial na garantia da passagem de fluidos, contribuição da estabilidade da carga, eficiência do descarregamento, controle da umidade e na asseguuração de um transporte seguro.

Permeabilidade é a característica dos corpos que admitem a passagem de outros corpos, especificamente fluidos como ar e água, por entre os seus poros. É a capacidade de um material (tipicamente uma rocha, como na Figura 16 ou sólidos granulares) para transmitir fluidos; consiste em uma propriedade dos corpos de permitirem, com maior ou menor facilidade, o escoamento de, por exemplo, água através dos seus poros. Sendo uma propriedade que caracteriza a capacidade de um meio poroso de permitir a passagem de fluidos, é a medida da condutividade de fluidos de um material em particular (CHILDS, COLLIS-GEORGE, 1950).

A permeabilidade está relacionada com o índice de vazios e interconectividade deles, logo, com a porosidade do material a ser analisado. Quanto mais poroso for o substrato, especificamente tratando-se de sólidos granulados, ou seja, maior a dimensão e a quantidade dos poros, maior será o índice de vazios; por conseguinte, mais permeável será esse material.

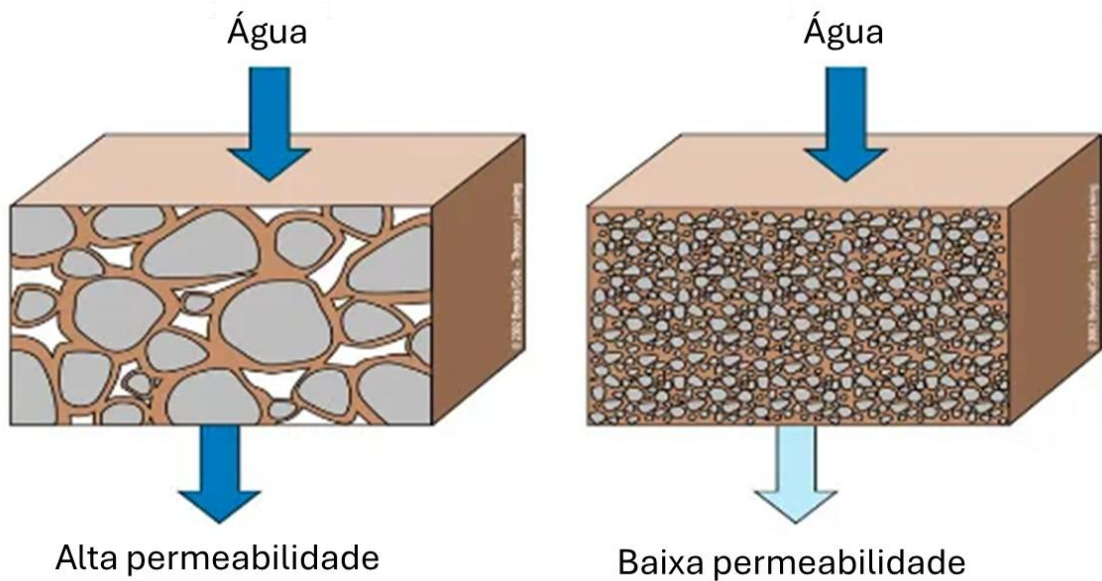


Figura 16 – Percolação de água por meios/sólidos porosos. (Fonte: HOWTOCIVIL, 2024)

#### 1.5.6 Canal preferencial

O canal preferencial é um caminho (ou erosão) que se forma subitamente nas paredes onde o material particulado está acondicionado, ou mesmo entre o próprio particulado, abrindo passagem para a água escoar de maneira abrupta, provocando um arraste das partículas.

Pensando no transporte em gôndolas abertas e expostas a intempéries, pode ser vantajoso a formação do canal preferencial por implicar uma drenagem acelerada da água acumulada sobre a carga, algo extremamente desejável. Todavia, sua principal desvantagem é o fato de a água, ao escoar dessa maneira intensa, arrastar e carregar consigo um excesso de material, acarretando desperdícios indesejáveis. Portanto, a avaliação de drenos com aberturas de frestas muito maiores que o diâmetro médio de particulados transportados permite que seja quantificado o limite a ser considerado, sendo necessário impor mecanismos que diminuam ou controlem essa perda, como é o caso dos preenchimentos propostos nesta pesquisa.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília dispõe de uma bancada experimental desenvolvida previamente a este projeto por Bogsan (2022), conforme indicada na Figura 17. É composta de uma mesa em MDF e estrutura de aço, torres de acrílico e um sistema de impactos acoplado na parte interior, a fim de promover a vibração da superfície. A proposta de Bogsan (2022) permitiu avaliar as condições de saturação e compactação de minérios de ferro durante ensaios de percolação e drenagem em uma bancada de tamanho reduzido, sendo usados drenos impressos em impressora 3D de materiais poliméricos, com formato de frestas semelhantes aos empregados pela empresa VALE S.A. nos vagões gôndola de transporte de minério na EFC e EFVM.

Tal bancada foi aprimorada nesta investigação com relação à disposição das torres, sistema de vibração, ergonomia e, mais especificamente, em relação aos modelos de drenagem.

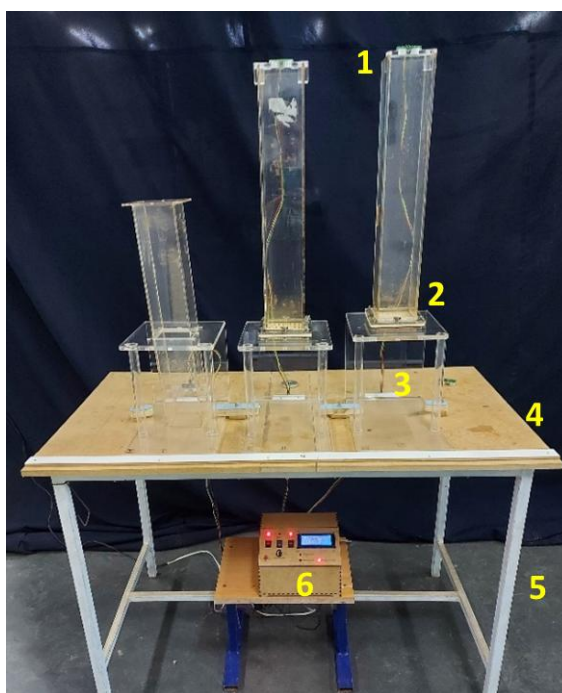


Figura 17 – Versão original da bancada como construída por Bogsan (2022), sendo 1) torres de acrílico (reservatórios de ensaio); 2) drenos intercambiáveis; 3) espaço para posicionamento de recipientes coletores dos resultados dos ensaios de drenagem; 4) placa estrutural de MDF para suporte dos ensaios; 5) estrutura metálica de aço; e 6) controlador eletrônico. (Fonte: BOGSAN, 2022)

## 2.1 Materiais

### 2.1.1 Bancada experimental

Adotando a estrutura básica inicial da bancada original, a nova bancada possui uma estrutura metálica a qual sustenta duas placas de MDF, onde são apoiadas torres de acrílico que receberão o minério de ferro para os ensaios de compactação associada à percolação de água. O modelo 3D da nova bancada é ilustrado na Figura 18.

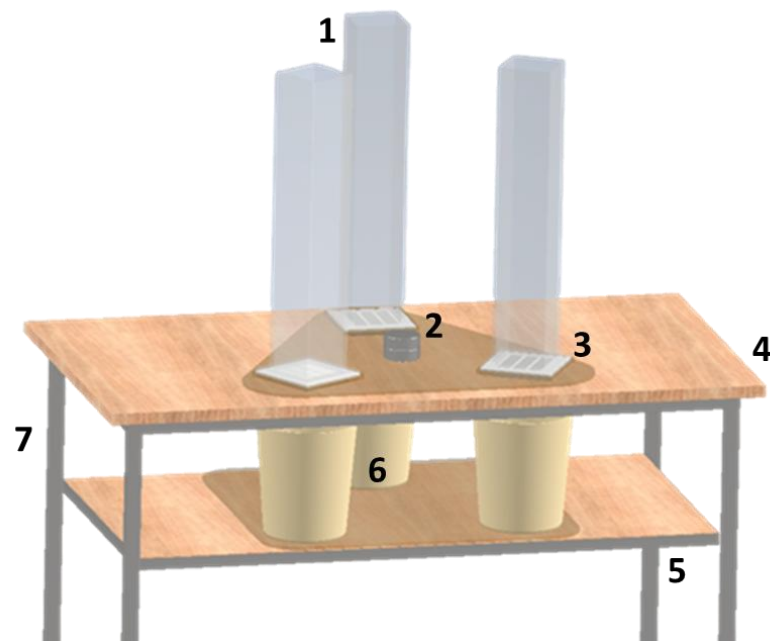


Figura 18 - Desenho do protótipo da bancada, sendo 1) torres de acrílico (reservatórios de ensaio); 2) centro geométrico da placa superior; 3) dreno intercambiável; 4) placa superior de MDF para apoio das torres de ensaio; 5) placa inferior de MDF para suporte de béqueres coletores dos resultados dos ensaios; 6) béqueres para coleta de mistura de água mais minério proveniente da drenagem; e 7) estrutura metálica de aço. (Fonte: autor)

A placa superior de MDF sustenta três torres idênticas de acrílico, posicionadas em diferentes locais ao redor de um centro geométrico. Nesse ponto central, ocorre o impacto gerado por um mecanismo de vibração fixado na parte inferior da placa superior. Já a placa inferior serve exclusivamente para acomodar os recipientes de coleta, como béqueres, destinados à mistura de água e minério resultante da drenagem final do ensaio, conforme apresentado na Figura 19.

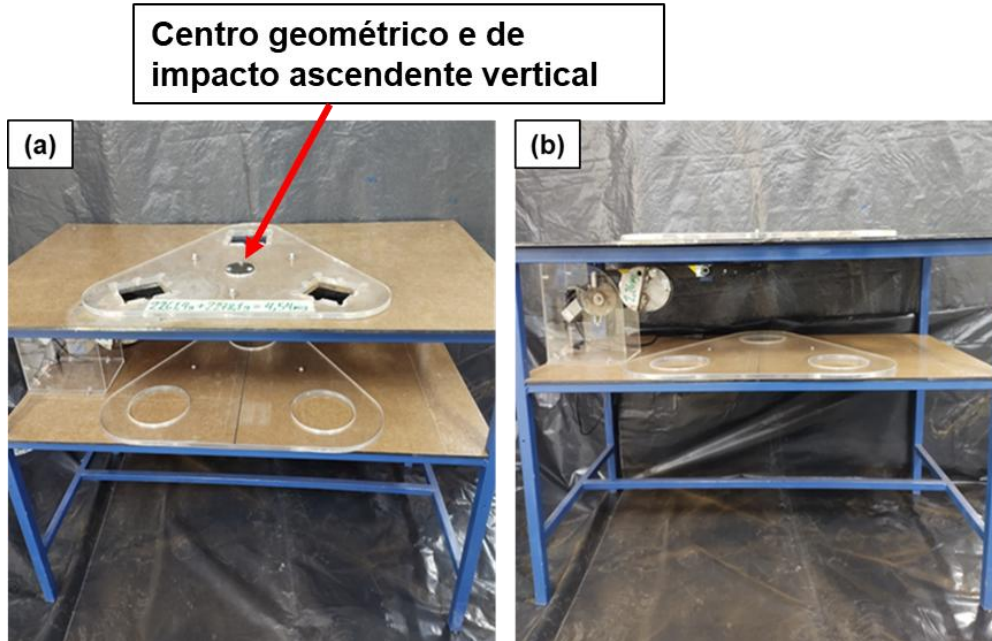


Figura 19 – Modelo novo da bancada: a) vista superior inclinada e b) vista frontal. (Fonte: autor)

O mecanismo de indução de vibração para simulação da compactação constitui-se em um eixo excêntrico, com um contrapeso e uma alavanca, que produzem um impacto ascendente vertical exatamente no centro geométrico da placa superior. É evidenciado na Figura 20, pela seta vermelha, o local de impacto (que ocorre na parte inferior), em torno do qual se situam equidistantes os buracos de encaixe das três torres de acrílico. Tal característica constitui-se como principal diferença entre o formato original da bancada, no qual a disposição era de maneira retilínea ao longo do comprimento da bancada. O centro de impacto originalmente também focava na região central da placa estrutural de MDF para suporte dos ensaios, porém a disposição das torres em relação a ele podia gerar significativos graus diferentes de vibração em cada umas delas.

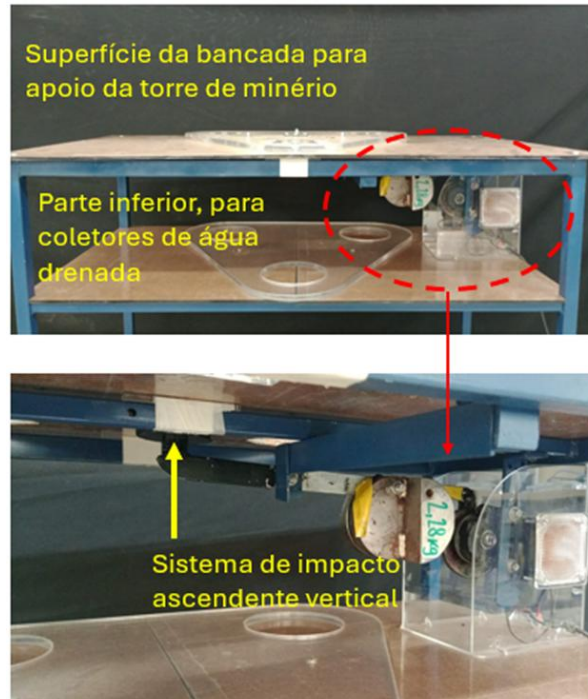


Figura 20 – Ilustração do dispositivo indutor de vibração. (Fonte: autor)

### 2.1.2 Minério de ferro *pellet feed*

O minério de ferro utilizado para os estudos foi o minério do tipo *pellet feed*, evidenciado na Figura 21, relevante por ser um dos mais exportados a partir da mina de Brucutu – MG e disponibilizados pela empresa VALE S.A. para esta pesquisa.



Figura 21 – Minério de ferro do tipo *pellet feed*. (Fonte: autor)

### 2.1.3 Dreno reto

Devido à granulometria fina do minério *pellet feed*, o tipo de dreno selecionado para este estudo foi o dreno reto com abertura de fresta de 0,6 mm. Segundo Bogdan (2022), esse dreno recebe essa denominação porque apresenta uma seção transversal constante ao longo de toda a sua espessura. A escolha foi fundamentada em ensaios de perda de massa realizados por Garcia (2023), que demonstraram que aberturas de fresta superiores a 0,6 mm resultam em perdas mássicas significativamente elevadas, tornando esse tamanho mais adequado para minimizar esse problema. Os drenos retos são compostos por 45 frestas com aberturas de 20 mm x 0,6 mm com espessura de 6 mm, impressos em ABS por impressão 3D, como destacado na Figura 22. Tais dimensões foram confirmadas por uma régua para medição de calibre de folga, uma vez que a expansão/contração no processo de fabricação pode alterar as aberturas.

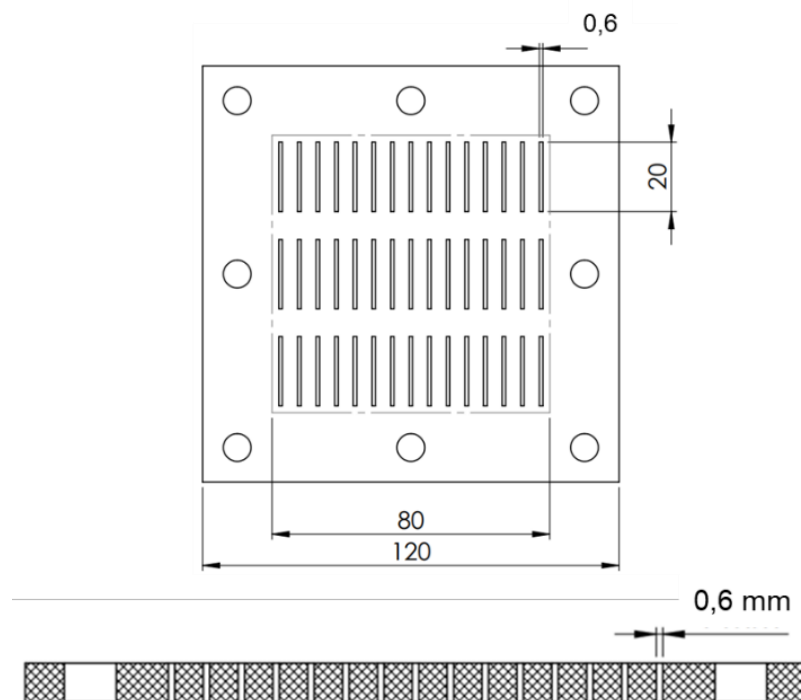


Figura 22 – Configuração de dreno utilizada. (Fonte: BOGSAN, 2022)

#### 2.1.4 Reservatórios de ensaio (torres de acrílico)

Os reservatórios para ensaios nos quais são depositados o minério e a água consistem basicamente em torres de acrílico com seção transversal quadrada de aresta de 80 mm e com altura de 500 mm, divergindo no tipo de acoplamento para cada posição do dreno, conforme mostradas na Figura 23 - a. Uma flange parafusada na sua extremidade permite o acoplamento de drenos intercambiáveis, contendo uma borracha para vedação conforme detalhado na Figura 23 - b.

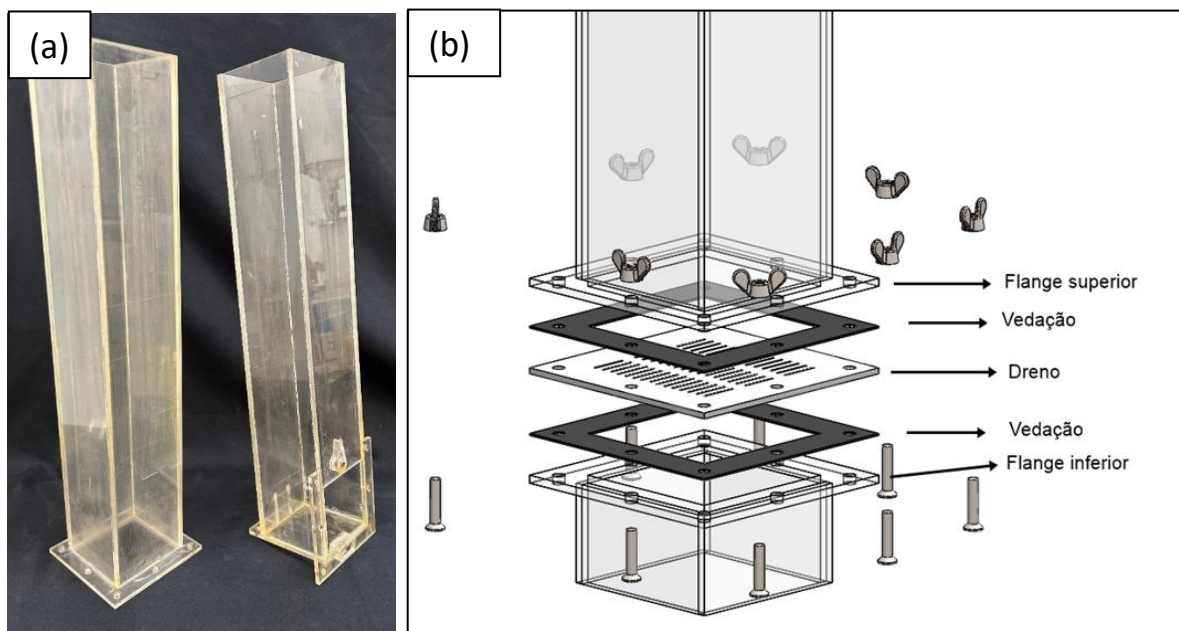


Figura 23 - Torres de acrílico com acoplamento de fundo e lateral (a) e representação esquemática do acoplamento do dreno (b).

Como aprimoramento destas torres, um novo acoplamento foi desenvolvido para suportar preenchimentos laterais, de acordo com a Figura 24. Na nova torre com acoplamento lateral foi elaborada uma grade de contenção apenas com o objetivo de reter o minério no seu compartimento dentro da torre de acrílico, garantindo estabilidade e protegendo o preenchimento específico usado. Tal grade de proteção/contenção apresenta duas fileiras de 10 frestas cada com dimensões 5 mm x 36 mm, evidenciado também na Figura 24.

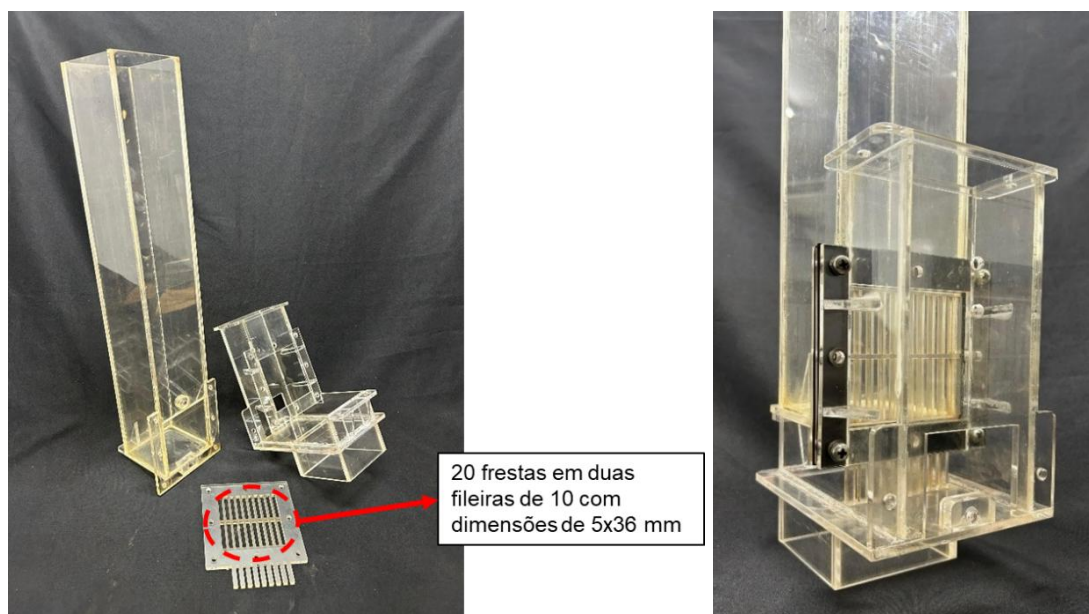


Figura 24 – Torre lateral com acoplamento lateral (esquerda) e montagem com sistema de vedação (direita).

Ao todo, foram usadas nesse trabalho 3 diferentes torres de acrílico, contendo acoplamentos para dreno de fundo, lateral e lateral com preenchimento, demonstrados na Figura 25.

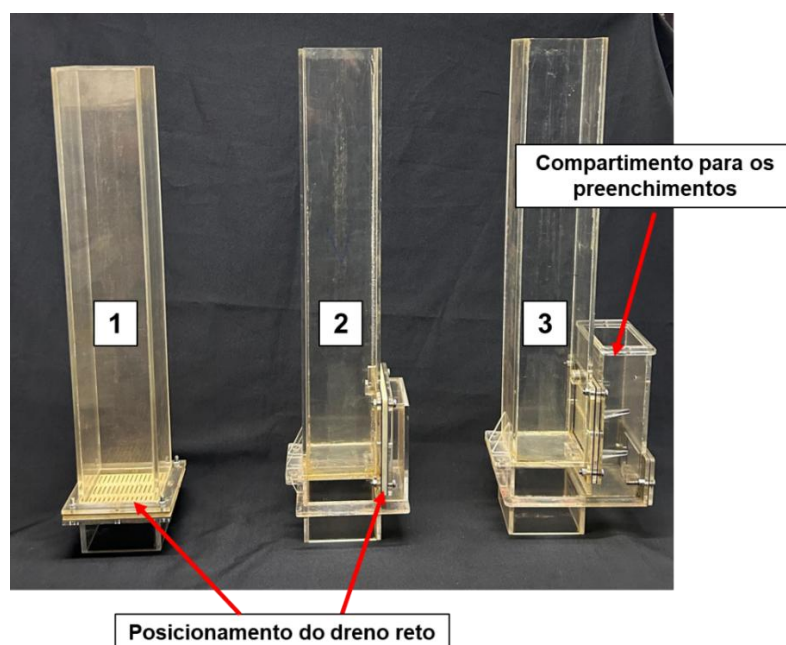


Figura 25 - Torres de acrílico com dimensões 80x80x500 mm, usadas nos ensaios, com suportes distintos e específicos para cada tipo de dreno/preenchimento testado, sendo 1) disposição original de fundo para o dreno reto utilizada por Bogsan (2022); 2) nova disposição lateral para o dreno reto; e 3) disposição lateral para os preenchimentos. (Fonte: autor)

### 2.1.5 Preenchimentos

Os preenchimentos são alternativas viáveis ao dreno reto tradicional e sua função é exercer mais eficientemente o mesmo papel dele, tendo propriedades físicas características como porosidade e permeabilidade que possam permitir tal objetivo, mitigando questões de problemática como entupimento.

Os três tipos de preenchimentos ensaiados foram: esferas poliméricas (plástico) com diâmetro de 6,0mm, espuma polimérica do tipo comum multiuso de densidade de aproximadamente 0,013 g/cm<sup>3</sup>, conforme determinado na Tabela 1 e brita de construção civil, ilustrados na Figura 26. A brita usada é formada por uma combinação majoritária de Brita 1 e Brita 2, sendo portanto, um agregado de partículas com tamanhos variando predominantemente entre 9,5 mm e 25 mm (ABNT, 2022).

Tabela 1 – Densidade da espuma utilizada no projeto.

Dimensões Comprimento 230 mm/Largura 130 mm/Espessura 80 mm		
Amostras	Massas [g]	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]
1	28,85	0,01206
2	31,50	0,01317
3	33,26	0,01390
	<b>média</b>	<b>0,01304</b>

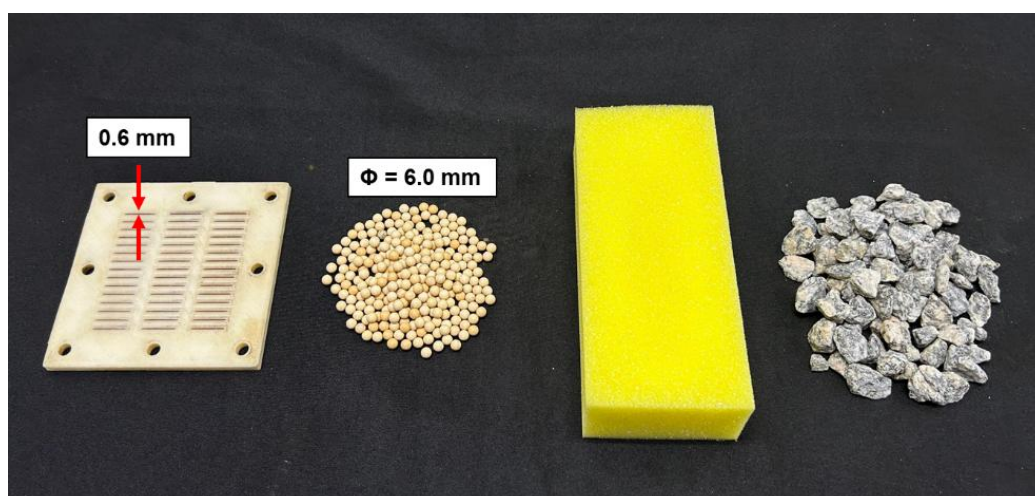


Figura 26 – Da esquerda para a direita: dreno reto de polímero ABS de abertura de frestas de 0,6 mm, esferas de polímero de 6,0 mm de diâmetro, espuma polimérica e brita.

A Figura 27 detalha a deposição no compartimento lateral com cada tipo de preenchimento.

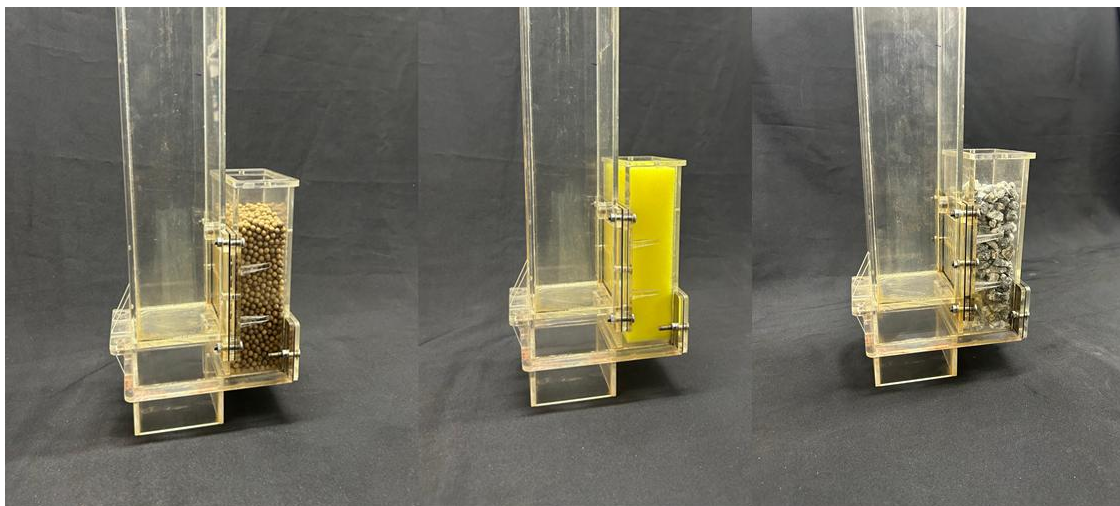


Figura 27 - Suportes preenchidos com preenchimentos específicos: esferas (esquerda), espuma (centro) e brita (direita). (Fonte: autor)

#### 2.1.6 Agitador eletromagnético e jogo de peneiras

Para o estudo granulométrico, utilizou-se um agitador eletromagnético modelo SP-1100 SPLABOR, ilustrado na Figura 28, em conjunto com um conjunto de peneiras com aberturas variando entre 0,020 mm e 1,18 mm. Além disso, o mesmo agitador foi empregado nos ensaios de densidade aparente, saturação e compactação, garantindo uniformidade e precisão nos procedimentos.

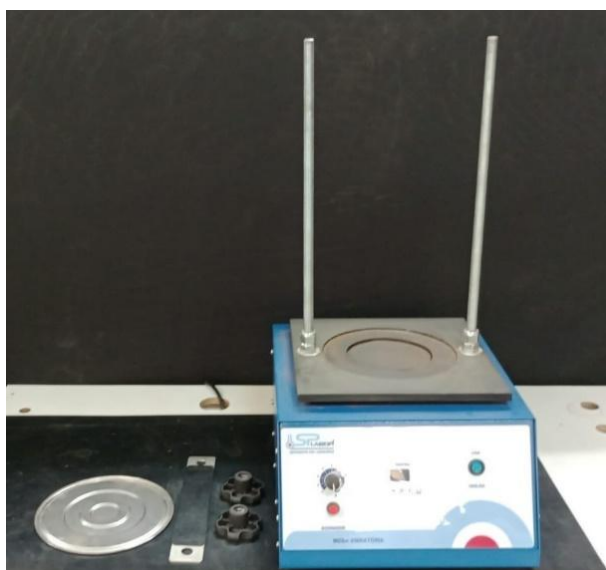


Figura 28 – Agitador eletromagnético de peneiras. (Fonte: autor)

### 2.1.7 Provetas de acrílico

Três provetas semelhantes de acrílico com diâmetros interno de 44, 48 e 53 mm e com altura de 250 mm foram usadas nos ensaios de densidade aparente, saturação e compactação, além de uma proveta com 114 mm de diâmetro interno e 440 mm de altura, todas apresentadas na Figura 29. Esta última, especificamente para o ensaio de compactação.

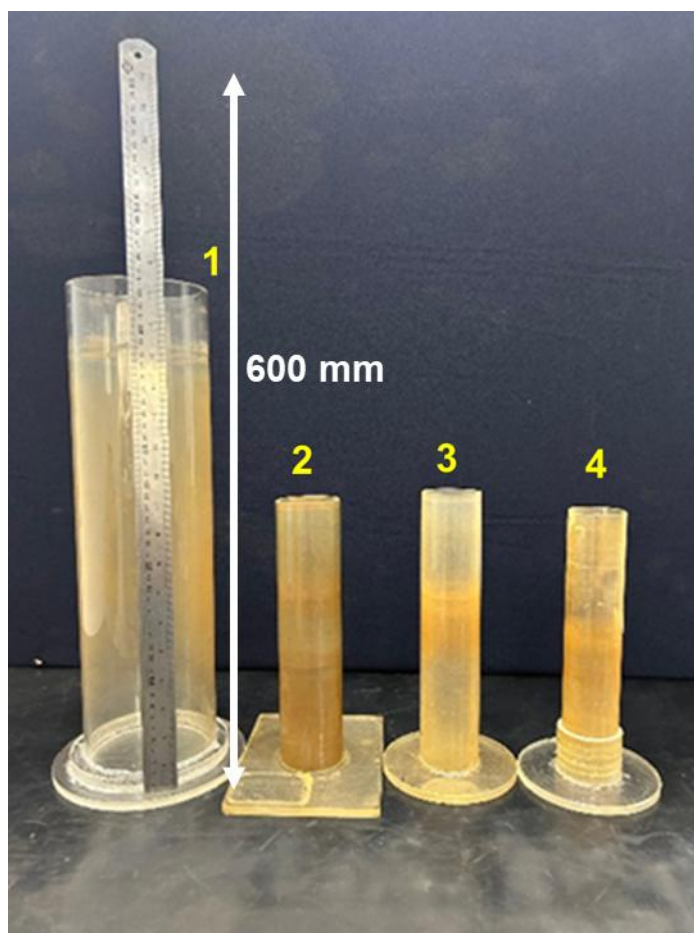


Figura 29 – Provetas utilizadas em ensaios como saturação, densidade aparente e compactação, com diâmetros internos de: 1) 114 mm; 2) 53 mm; 3) 48 mm e 4) 44 mm. (Fonte: autor)

### 2.1.8 Acelerômetro

Para avaliar a vibração dos ensaios foram usados um acelerômetro LYNX modelo SNS-ABS05  $\pm 8g$  (Figura 30), em conjunto com uma placa de aquisição de modelo ADS500 LYNX



Figura 30 – Acelerômetro usado para análises de vibração. (Fonte: autor)

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Caracterização do minério

#### 2.2.1.1 Granulometria

Foram realizados ensaios granulométricos de caracterização utilizando o agitador eletromagnético, com peneiras de aberturas variando entre 0,020 mm (20  $\mu\text{m}$ ) e 1,18 mm (1180  $\mu\text{m}$ ), para o minério do tipo pellet feed (Figura 31), seguindo a norma ABNT NBR ISO 4701:2020 (ABNT, 2020). As peneiras foram empilhadas em ordem crescente de abertura sobre uma bandeja fechada no agitador, e uma amostra de 900 g foi depositada uniformemente na peneira de maior abertura. O agitador foi então acionado por 15 minutos e, ao final do processo, a fração mássica retida em cada peneira, bem como o material acumulado na bandeja final, foram pesados e registrados.



Figura 31 – Ensaio de granulometria. (Fonte: autor)

### 2.2.1.2 Saturação

Uma massa pré-determinada de água foi adicionada a uma das provetas de ensaio, sendo em seguida coberta com minério até que não houvesse mais formação de filme d'água na superfície. A proveta contendo a mistura foi então acoplada ao agitador eletromagnético, onde era submetida a vibração induzida por cinco minutos. Após esse intervalo, verificou-se novamente a formação de filme d'água sobre o minério. Caso ainda houvesse película, adicionava-se mais minério e repetia-se o processo de vibração, até que a formação do filme d'água cessasse completamente. Nesse ponto, o ensaio era concluído, determinando-se a saturação máxima de 100%. O procedimento completo é ilustrado na Figura 32.

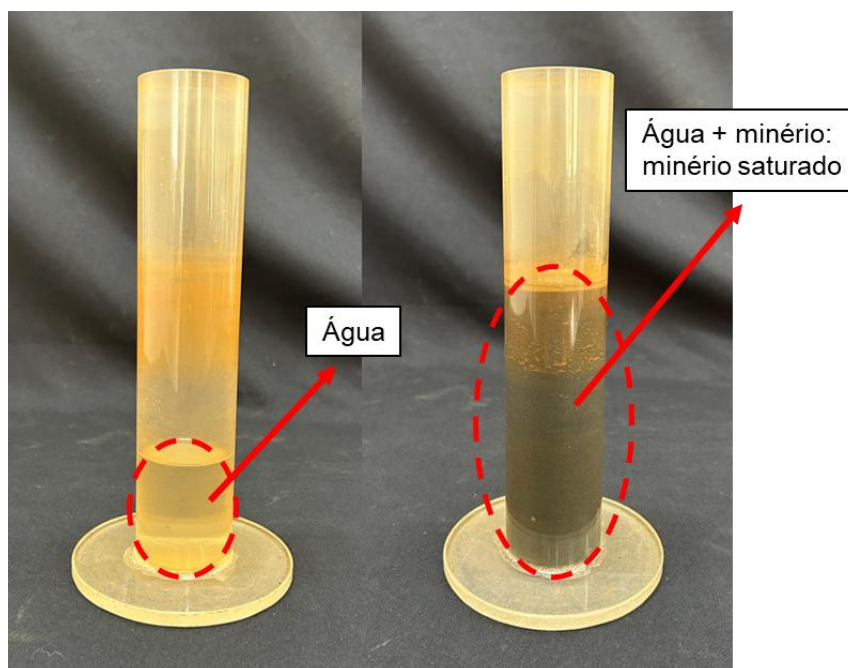


Figura 32 – Ensaio de saturação. (Fonte: autor)

#### 2.2.1.3 Densidade aparente

Uma massa pré-determinada foi depositada dentro de uma proveta de ensaio, a qual era acoplada no agitador eletromagnético que, através de uma vibração induzida, impunha a acomodação dos particulados até o instante que se observasse a estabilidade da altura. Por fim, sabendo as duas medidas, massa e volume final, aplicava-se a relação descrita na Equação 1.

#### 2.2.1.4 Compactação

Uma massa de minério completamente seco (0% de saturação) era depositada em uma das três provetas menores de ensaio a uma altura pré-determinada de 160 mm. A proveta era então acoplada no agitador eletromagnético de peneiras (Figura 33 - a), o qual foi acionado em potência máxima. A cada intervalo de 6 minutos, a vibração era interrompida para efetuar-se manualmente a medição das respectivas novas alturas, durante um período de uma hora, totalizando 10 medições. O processo era repetido para a condição 100% saturado no agitador e, posteriormente, nas duas condições de saturação (seco e 100%) também na bancada experimental (Figura 33 - b). Tal efeito tinha o propósito de comparar a evolução do

perfil de compactação no aparato desenvolvido com o obtido pelo agitador eletromagnético, que é o caso mais extremo devido à maior amplitude e frequência atingida por esse último.

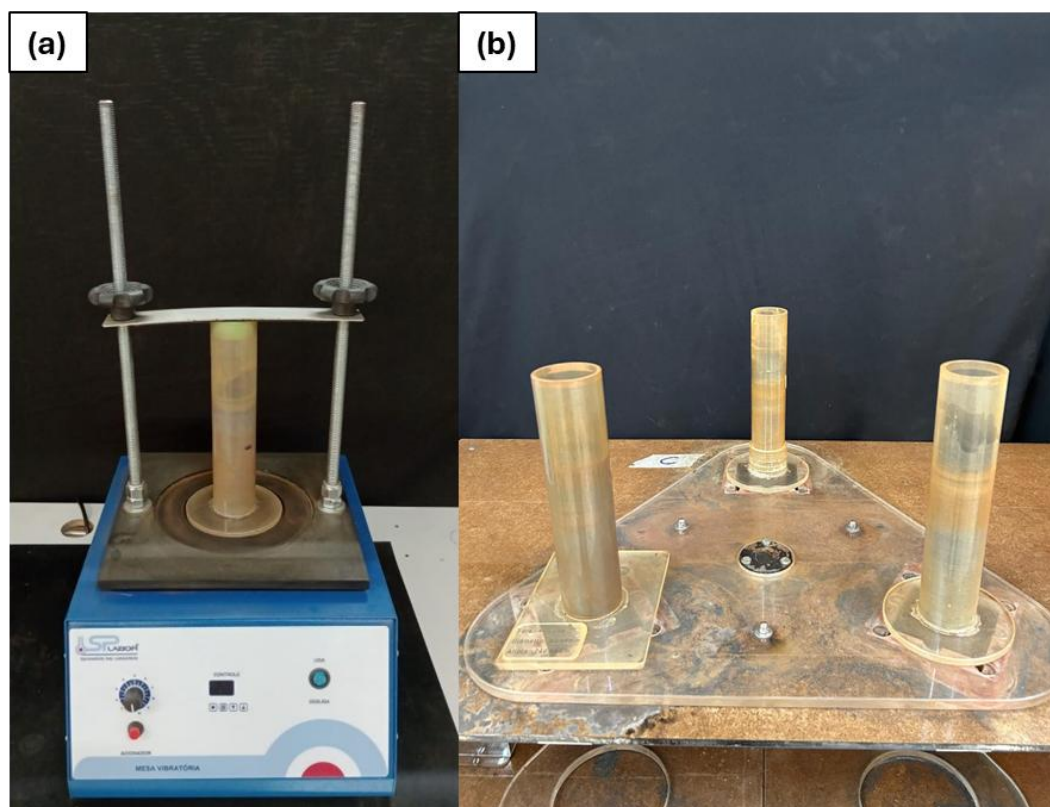


Figura 33 - Provetas com minério acopladas no agitador eletromagnético (a) e na bancada experimental (b). (Fonte: autor)

## 2.2.2 Caracterização da bancada

### 2.2.2.1 Vibração

A medição da frequência e da amplitude de vibração no ensaio de compactação foi feita através de um acelerômetro acoplado na torre, carregada com uma massa pré-determinada de minério, na condição completamente seco e 100% saturado com água deionizada, exemplificado na Figura 34 – a; a torre foi fixada na bancada em uma das três posições e então o mecanismo de vibração da bancada foi acionado.

Com isso, as leituras do comportamento vibratório foram registradas para cada posição, repetindo-se o procedimento para as demais posições. Posteriormente, o mesmo processo foi conduzido no agitador eletromagnético (Figura 34 – b), permitindo a comparação entre a bancada desenvolvida e o mecanismo mais intenso do equipamento comercial.

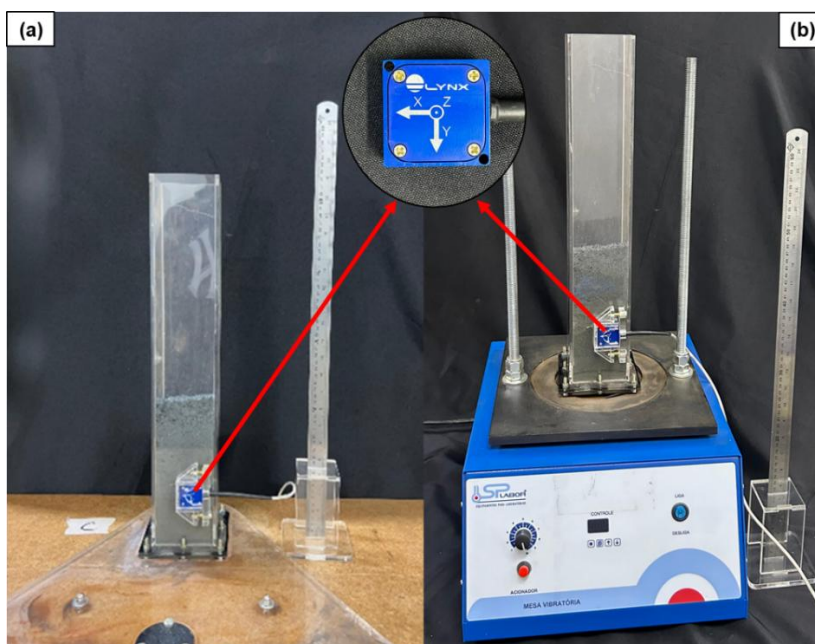


Figura 34 – Acelerômetro acoplado em torre carregada com minério na bancada (a) e no agitador eletromagnético (b). (Fonte: autor)

### 2.2.3 Percolação e drenagem

Para realização dos ensaios de drenagem, o minério foi seco em uma estufa entre 100 °C e 110 °C durante um período de 24 horas, atingindo 0% saturação. Depois, foi feita a saturação a 100%, pois esse é o parâmetro de campo para o carregamento de vagões na mina de Brucutu, de onde provém o minério. Após a homogeneização do minério saturado, a mistura foi depositada dentro das torres, com o auxílio de um dispositivo de acrílico com função de funil (Figura 35), até as alturas  $\Delta H$  pré-determinadas de 100, 150, 200 e 300 mm.

Cada ensaio foi feito em triplicata para cada altura e o posicionamento das distâncias entre a superfície do minério e a posição do dreno pode ser vista na Figura 36. Para as posições laterais, cada altura representa uma elevação de minério acima do dreno ou do preenchimento, sendo elas 20 mm (altura de 100 mm), 70 mm (altura de 150 mm), 120 mm (altura de 200 mm) e 220 mm (altura de 300 mm), considerando que a altura do dreno lateral é de 80 mm, conforme demonstrado na Figura 36.

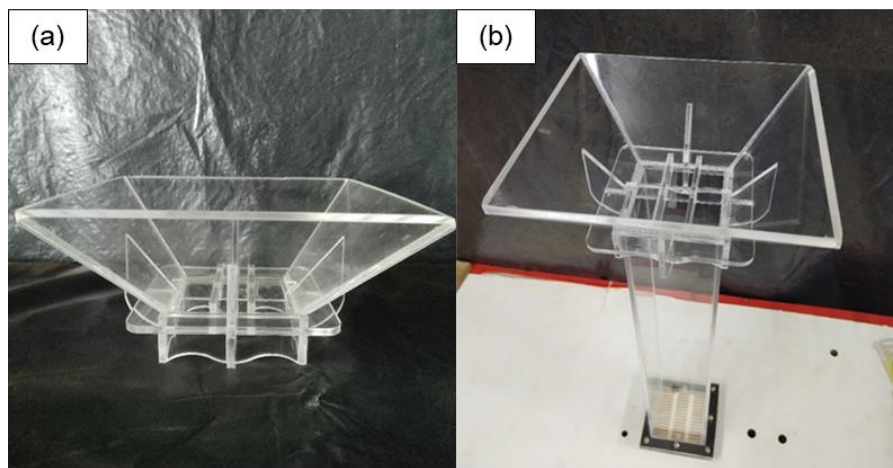


Figura 35 - (a) Funil de acrílico e (b) Funil acoplado à torre. (Fonte: autor)

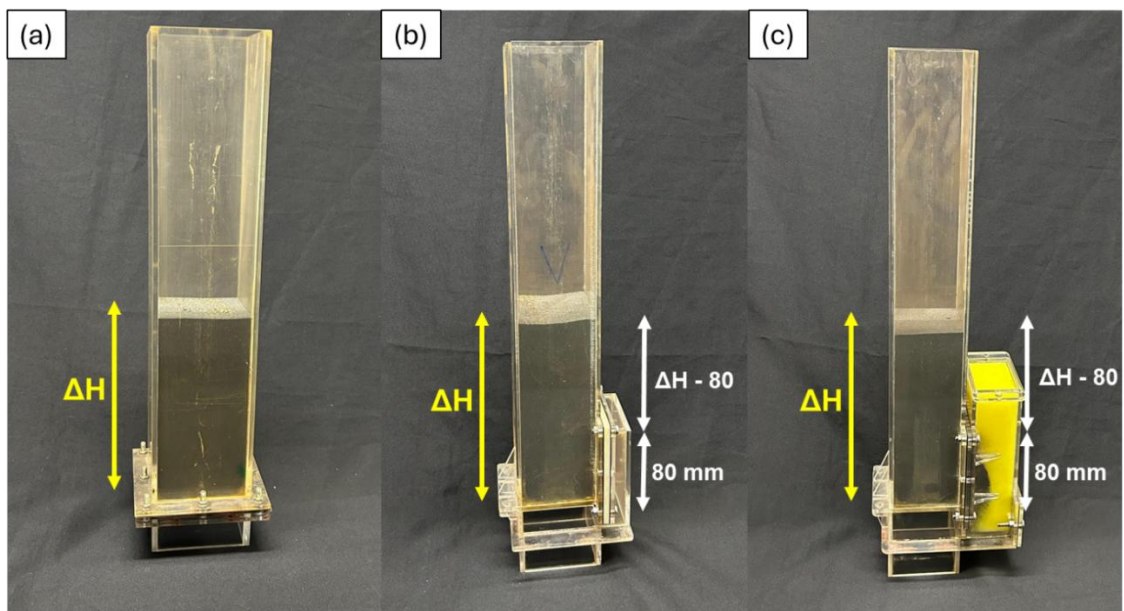


Figura 36 – Torre carregada com minério depositado, sendo (a) dreno reto de fundo; (b) dreno reto lateral e (c) preenchimento lateral. (Fonte: autor)

Com a torre carregada de minério e devidamente posicionada em uma das três disposições da bancada, uma massa padrão de 1000 g de água foi adicionada pela parte superior; para essa adição foi utilizado um dispositivo em acrílico contendo preenchimento polimérico, conforme pode ser identificado na Figura 37 e na Figura 38. A finalidade de tal dispositivo baseia-se na prevenção da formação de canais preferenciais nas paredes internas da torre, evitando agitação excessiva e turbulência causadas devido à queda pela ação da força gravitacional. Tal aparato amortecedor se desloca verticalmente para cima, dentro da torre, mantendo uma distância constante de aproximadamente 40 mm da superfície do minério e da, posterior, superfície livre da coluna de água que vai se formando.

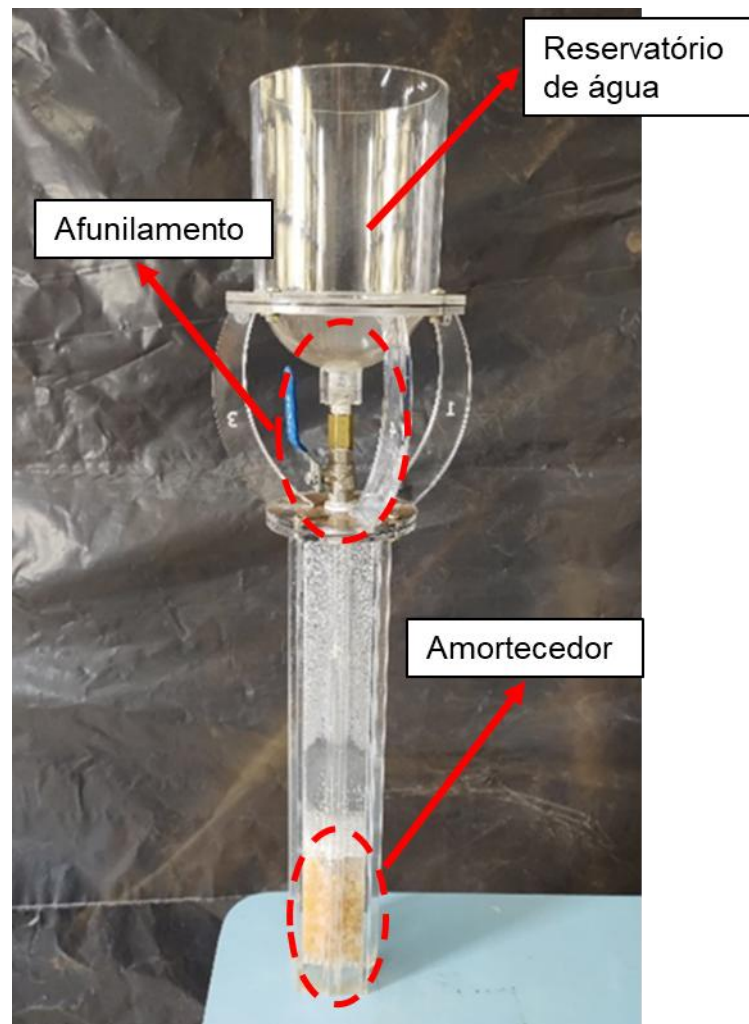


Figura 37 - Dispositivo amortecedor de impacto de água. (Fonte: autor)

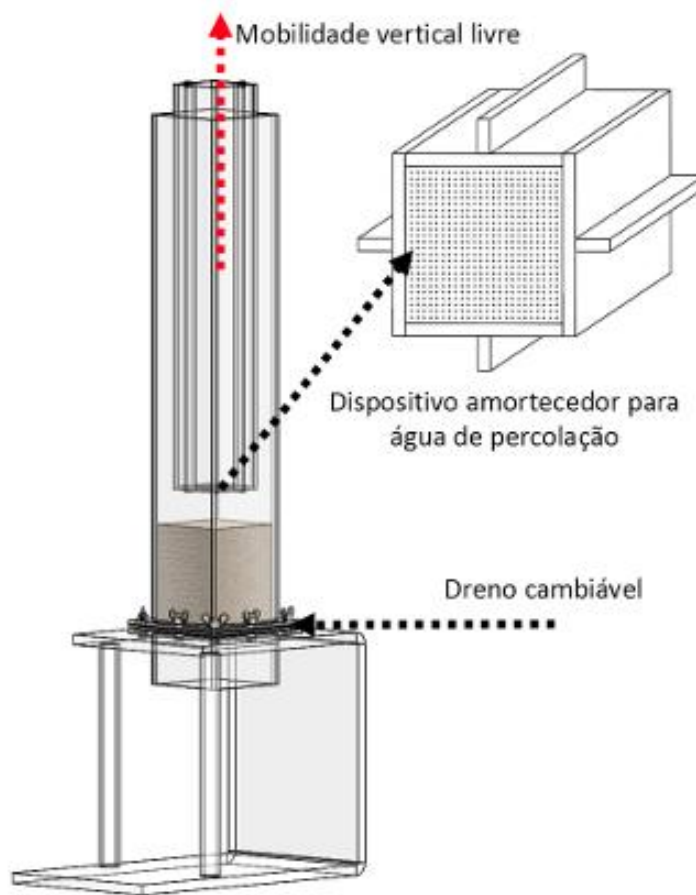


Figura 38 – Esquemática do ensaio com amortecedor. (Fonte: BOGSAN, 2022)

Simultaneamente, à medida que a água começava a ser inserida dentro do reservatório, o mecanismo de impacto da bancada era acionado, sendo que tal condição foi determinada com o intuito de simular o início de chuvas após o carregamento de minério nos vagões e o início do deslocamento do trem no percurso (o minério começará a ser compactado à medida que a chuva começa a acontecer). Após toda a quantidade de água ser despejada em cima da coluna de minério, o tempo de redução da coluna de água era contabilizado.

No decorrer do ensaio, esquematizado na Figura 39 e ilustrado na Figura 40, durante os primeiros 20 minutos, eram feitas medições manuais da altura de água sobre o minério em intervalos de dois minutos. Posteriormente, as medições eram feitas ainda manualmente de cinco em cinco minutos até o término do ensaio, quando não havia mais água livre em cima da superfície da coluna de minério.

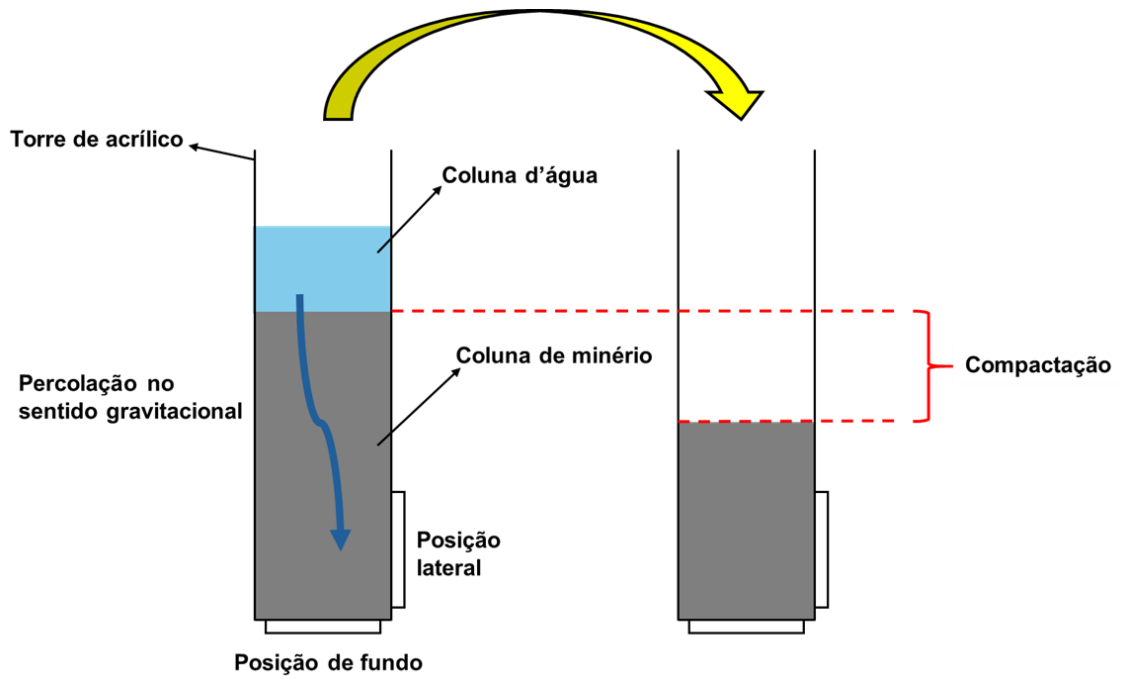


Figura 39 – Esquemática do ensaio de drenagem. (Fonte: autor)

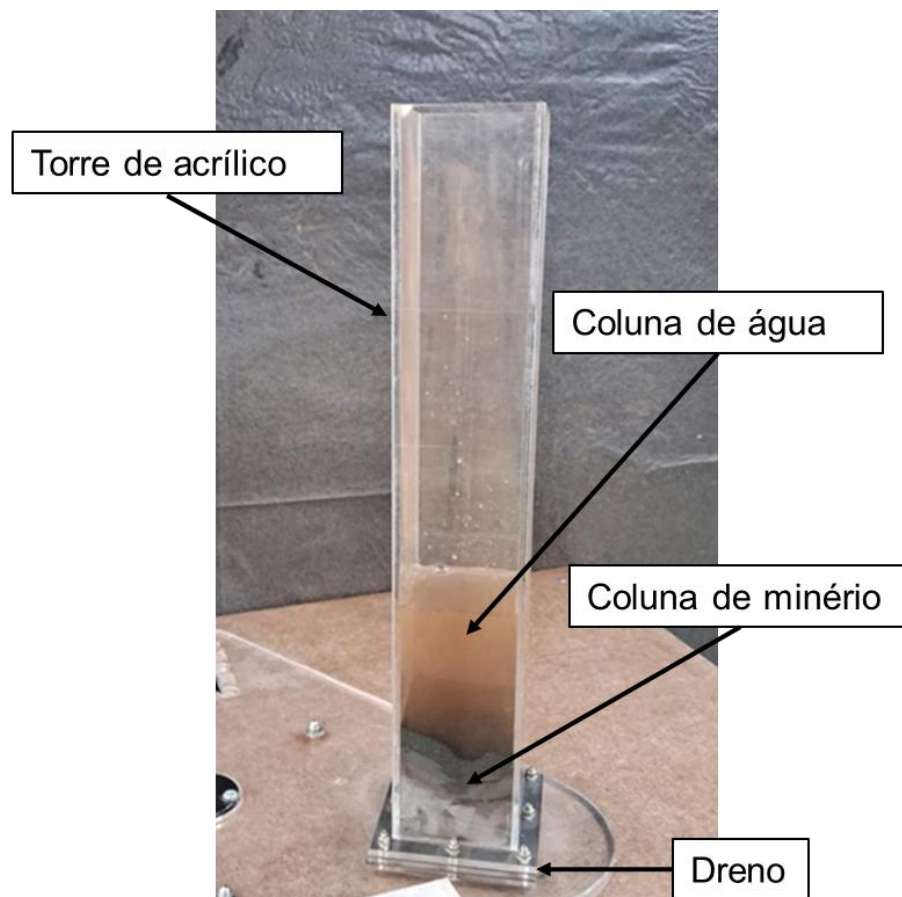


Figura 40 – Exemplo de ensaio com dreno reto de fundo. (Fonte: autor)

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização do minério

##### 3.1.1 Granulometria

A granulometria do minério de ferro, do tipo *pellet feed*, a partir de uma amostra seca, é indicada na Tabela 2.

Tabela 2 – Granulometria de amostra de *pellet feed*.

Abertura de peneira (mm)	$D_m$ (mm)	Massa retida (g)	% mássico	% acumulado	% mássico/ $D_m$
1,18	1,29	0	0,000	0,000	0
1	1,09	0,76	0,001	0,001	0,00078
0,71	0,855	1,01	0,001	0,002	0,00131
0,5	0,605	2,13	0,002	0,004	0,00392
0,355	0,4275	2,50	0,003	0,007	0,00650
0,25	0,3025	7,97	0,009	0,016	0,02931
0,18	0,215	25,27	0,028	0,044	0,13073
0,125	0,1525	62,77	0,070	0,114	0,45783
0,09	0,1075	159,53	0,177	0,291	1,65065
0,063	0,0765	220,43	0,245	0,537	3,20502
0,045	0,054	213,52	0,237	0,774	4,39811
0,038	0,0415	67,88	0,076	0,850	1,81934
0,025	0,0315	106,18	0,118	0,968	3,74933
0,02	0,0225	18,90	0,021	0,989	0,93433
Bandeja	0,01	10,19	0,011	1,000	1,13343
Total	-	899,04	1,0000	-	-

A partir do diâmetro médio ( $D_m$ ) das aberturas das peneiras e da fração acumulada de material ou fração mássica de sólidos retidos em cada peneira ( $\varphi$ ), foi possível construir a curva granulométrica, apresentada na Figura 41, e calcular o Diâmetro Médio de Sauter, utilizando a Equação 3. Essa curva representa a distribuição das partículas conforme seus tamanhos médios, proporcionando uma análise detalhada da granulometria do material.

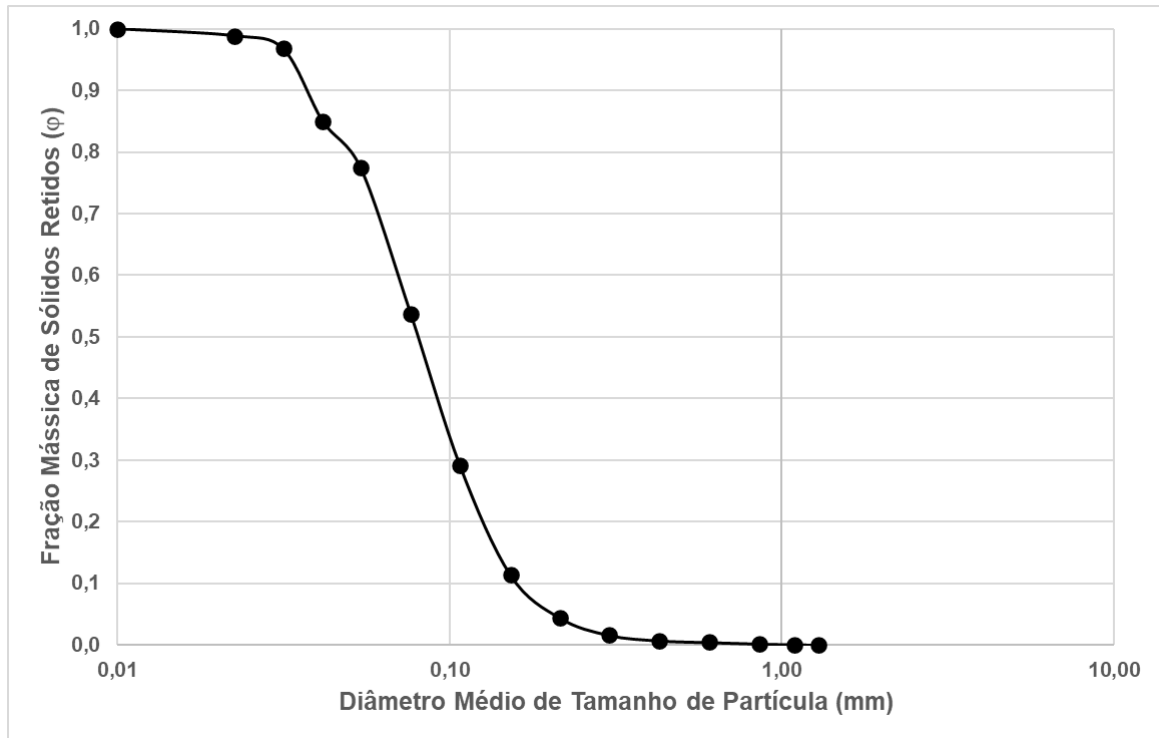


Figura 41 – Curva granulométrica do *pellet feed*

Qualitativamente, o minério de ferro do tipo *pellet feed* apresentou-se como um material caracteristicamente refinado e homogêneo. Com base em uma análise quantitativa, verificou-se que aproximadamente 70% da fração retida de sólidos possuía tamanho médio inferior a 0,10 mm (100  $\mu\text{m}$ ), enquanto os 30% restantes encontravam-se em uma faixa de tamanho médio entre 0,10 mm (100  $\mu\text{m}$ ) e 1,0 mm (1000  $\mu\text{m}$ ). O Diâmetro Médio de Sauter obtido foi de aproximadamente 57  $\mu\text{m}$ .

Com a carta granulométrica, indicada na Figura 42, foi possível obter  $d_{60}$  ( $\cong$  0,091 mm) e  $d_{10}$  ( $\cong$  0,037 mm) para efetuar o cálculo do Coeficiente de Uniformidade através da Equação 4. Tal coeficiente foi de aproximadamente 2,46, sendo concluído que o minério estudado era uniforme.

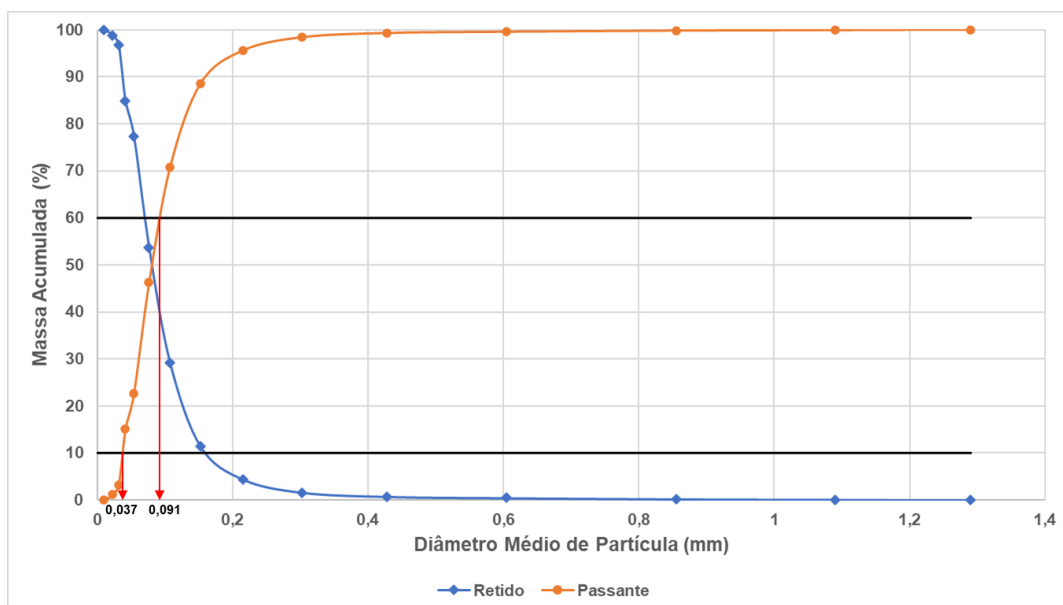


Figura 42 – Determinação gráfica de  $d_{60}$  e  $d_{10}$ .

### 3.1.2 Saturação

Na Tabela 3 estão apresentados os ensaios realizados para se alcançar 100% de saturação do minério, com uma concentração mássica média de água deionizada  $C_w$  em torno de 9,69%.

Tabela 3 - Resultados de saturação para cada ensaio.

Ensaio	Massa de água [g]	Massa de minério [g]	Concentração Mássica [%]
A	80,1	759,2	9,544
B	120,0	1104,5	9,800
C	85,2	784,7	9,794
D	80,2	737,1	9,814
E	86,0	819,4	9,498
<b>média</b>			<b>9,690</b>

### 3.1.3 Densidade aparente

Na Tabela 4 estão ilustrados oito ensaios realizados de densidade aparente para o *pellet feed*. A densidade aparente média calculada para tal minério foi de aproximadamente 3,059 g/cm<sup>3</sup> ou 3,059 t/m<sup>3</sup>.

Tabela 4 – Resultados de densidade aparente para cada ensaio.

Ensaio	Massa de minério [g]	Altura do minério [mm]	Altura do minério [cm]	Densidade Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]
A	442,6	94,9	9,5	3,150
B	1032,3	157,5	15,8	2,986
C	985,1	150,3	15,0	2,987
D	726,9	106,4	10,6	3,114
			<b>média</b>	<b>3,059</b>

### 3.1.4 Compactação

O perfil de compactação ao longo do tempo para uma coluna de 160 mm de altura do minério *pellet feed* é apresentado na Figura 43. Uma queda brusca na altura ocorre nos instantes iniciais de vibração, acompanhada de uma posterior estabilização, no caso do agitador eletromagnético. Já a bancada de testes apresenta uma compactação de maneira mais gradual, porém, também com uma queda mais intensa também nos primeiros instantes.

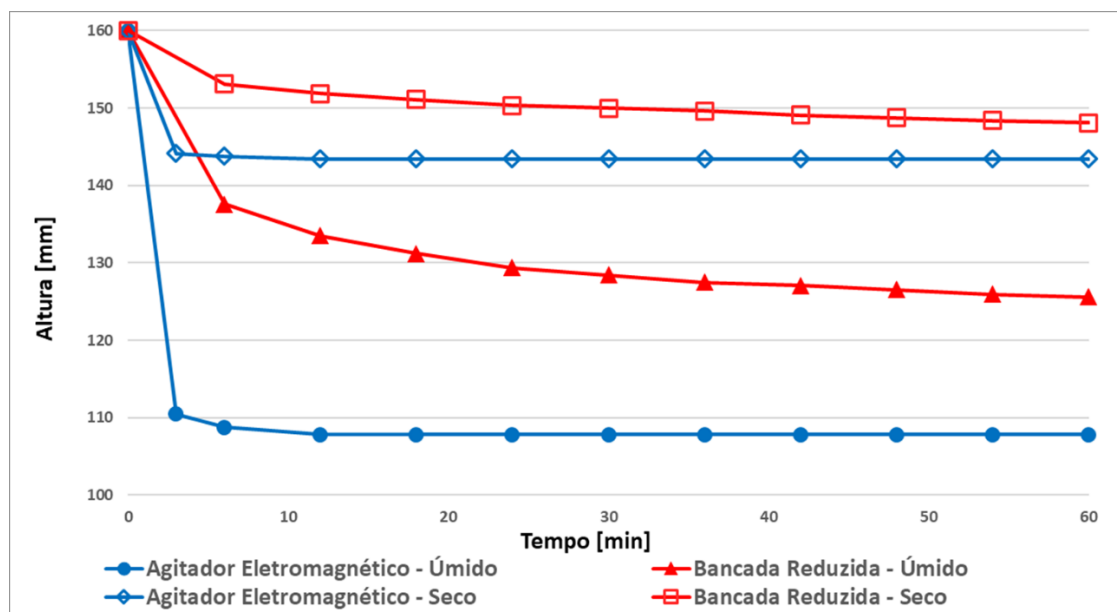


Figura 43 - Níveis de compactação para *pellet feed* nos dois dispositivos estudados, de acordo com o grau de saturação.

No caso completamente seco, a compactação foi menor devido aos esforços de atrito entre as partículas, que são reduzidos quando misturados com água, permitindo uma maior densificação do material (LIMA et al., 2013; TRINDADE et al., 2003).

Os ensaios mostraram um grau de compactação de 7,4% para o minério seco na bancada experimental e de 10,3% no agitador eletromagnético. Já para o minério 100% saturado, a compactação alcançou aproximadamente 21,5% na bancada experimental e 32,6% no agitador eletromagnético (tais valores são concebidos calculando a razão entre a altura inicial menos a final, e a altura inicial), representando um aumento de quase três vezes em relação ao material seco em ambos os procedimentos.

Para avaliar o impacto de uma massa maior de minério, cerca de 8200 g, foi utilizada a proveta de maior dimensão descrita anteriormente. O comportamento de compactação, ilustrado na Figura 44, indicou que o nível de compactação se estabiliza em torno de 32% no caso 100% saturado, exibindo uma tendência inicial de queda acentuada, seguida por uma estabilização. Os resultados refletem a análise média realizada em triplicata.

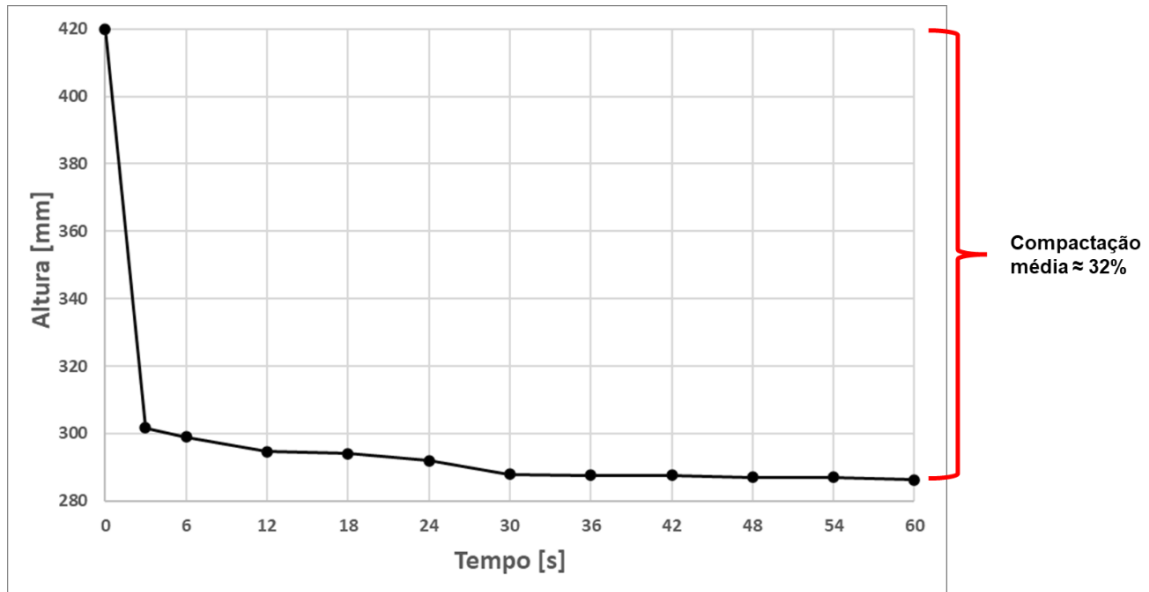


Figura 44 – Compactação na proveta em escala ampliada.

## 3.2 Caracterização da bancada

### 3.2.1 Vibração

São indicados na Figura 45 a disposição específica dos posicionamentos característicos das torres na bancada experimental e nas Figura 46 e Figura 47 os níveis de vibração de cada uma delas, bem como do agitador eletromagnético. Comparando as posições das torres na bancada experimental, a frequência se mantém praticamente inalterada, mas a amplitude tem leve distinção. Já em comparação com o agitador eletromagnético, expressivamente a frequência aumenta, dentro de uma amplitude levemente maior. Conseqüentemente, os gráficos apresentados na Figura 43 refletem o cenário mais crítico observado no agitador eletromagnético, servindo como um indicativo limitador do grau máximo de compactação alcançado pelo particulado analisado.

O agitador eletromagnético apresenta uma intensidade constante de vibração de amplitude aproximada de 2 G, com frequência de 60 Hz. Já a bancada experimental, agitada por um mecanismo de impacto, nas posições A, B e C apresentam, respectivamente, amplitudes máximas e frequências de vibração de aproximadamente 1,7 G com 6 Hz, 1,22 G com 6 Hz, e 0,8 G com 5 Hz, devido à estrutura onde as torres são apoiadas.

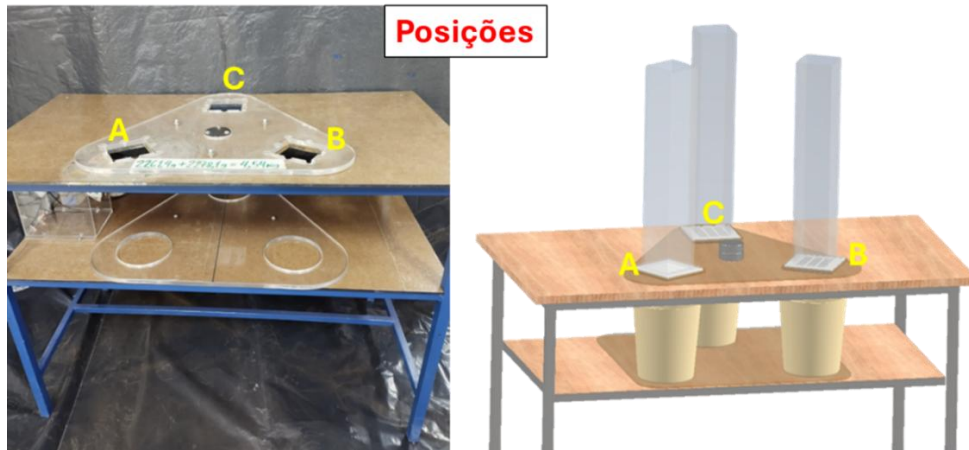


Figura 45 – Posicionamento das torres na bancada experimental. (Fonte: autor)

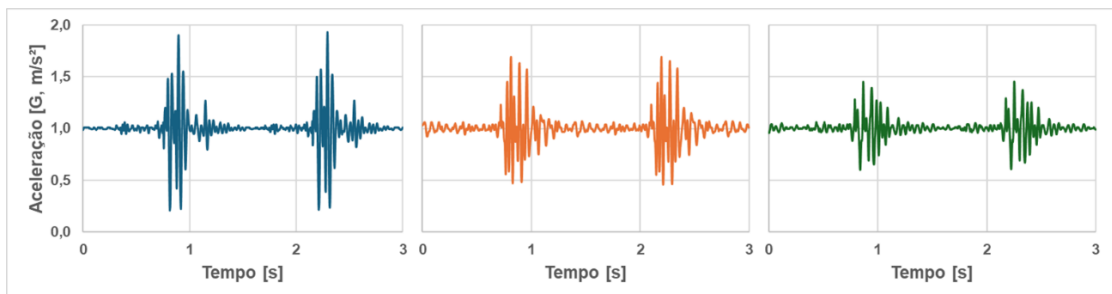


Figura 46 – Comportamento vibracional para cada posição da bancada experimental: posição A em azul (esquerda), posição B em laranja (centro) e posição C em verde (direita).

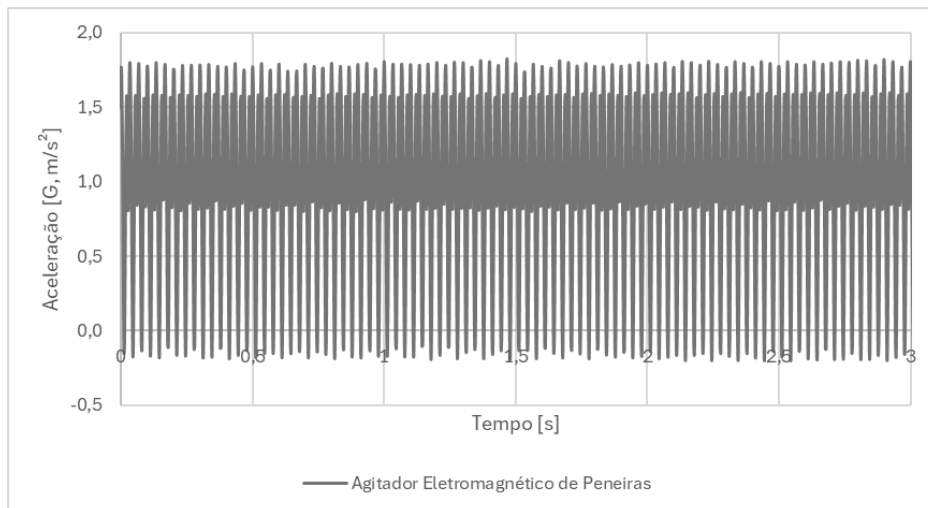


Figura 47 – Comportamento vibracional para o agitador eletromagnético de peneiras.

### 3.3 Drenagem

Primeiramente, é apresentado na Figura 48 um diagrama esquemático explicando as legendas dos gráficos dos ensaios de drenagem, classificando a disposição na torre de ensaio e o tipo de dreno, com a altura inicial da coluna formada com a massa de minério antes da inserção de água e contagem do tempo experimental para drenagem.

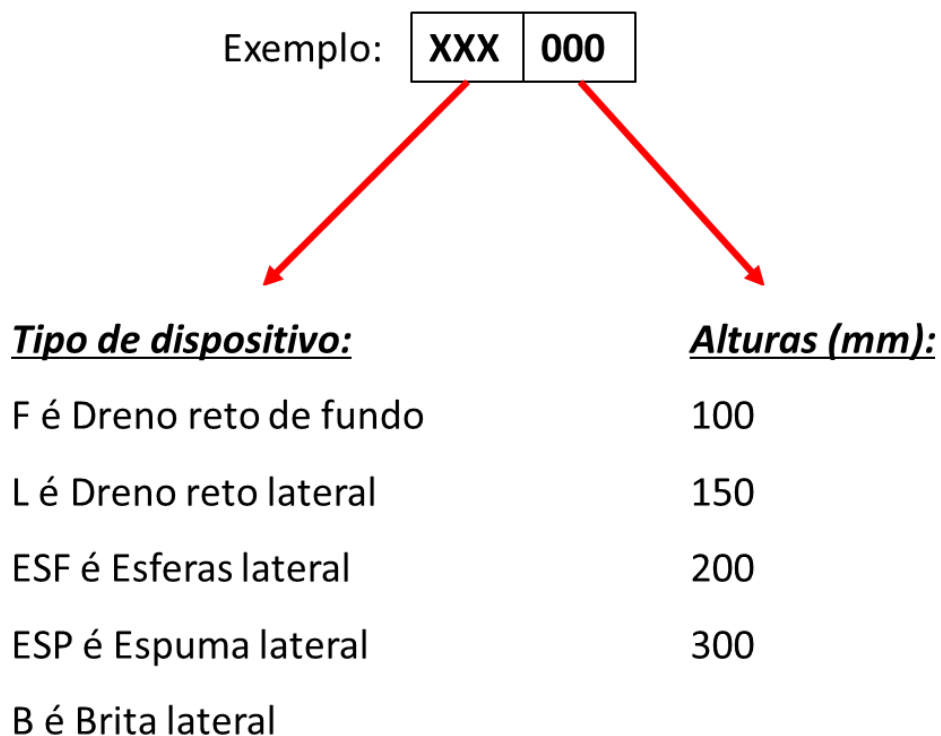


Figura 48 – Legendas para dispositivos e alturas iniciais da coluna de minério.

Uma observação inicial precisa ser adicionada quanto aos resultados dos ensaios. Entre os diferentes dispositivos, são identificados na Tabela 5 com um “X” aqueles que apresentaram canal preferencial, constatado visualmente, e a água foi eliminada abruptamente. Por não haver tempo suficiente de ensaio para contabilização, devido à maneira rápida e súbita como o fenômeno acontece e ao fato de a medição ser feita manualmente, não foi possível construir gráficos com os perfis de drenagem quando ocorre a formação de canal preferencial nas figuras subsequentes.

Tabela 5 – Indicativo de formação de canal preferencial.

Dispositivos de Drenagem	Alturas (mm)			
	100	150	200	300
Dreno Reto de Fundo				
Dreno Reto Lateral	X			
Esferas Poliméricas Lateral	X	X		
Espuma Lateral	X			
Brita Lateral	X	X	X	X*

\* Canal preferencial após 20 a 25 minutos de ensaio

Observam-se nas Figura 49 à Figura 52 os perfis médios de drenagem para o minério estudado, comparando cada tipo de dispositivo nas mesmas condições de alturas iniciais.

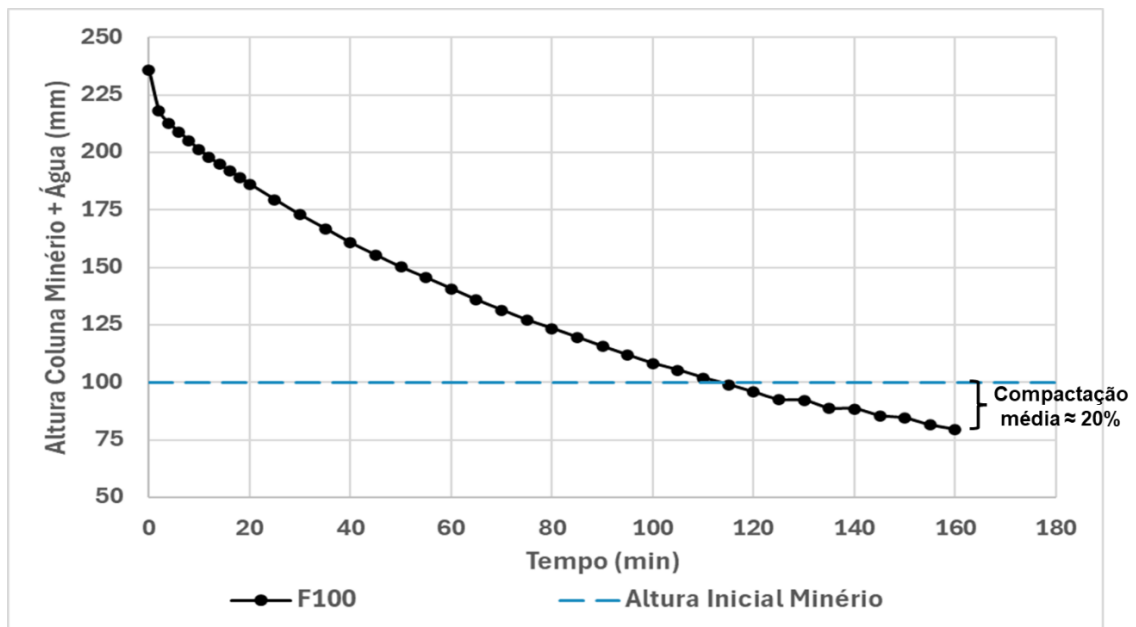


Figura 49 – Drenagem média para altura inicial de 100 mm.

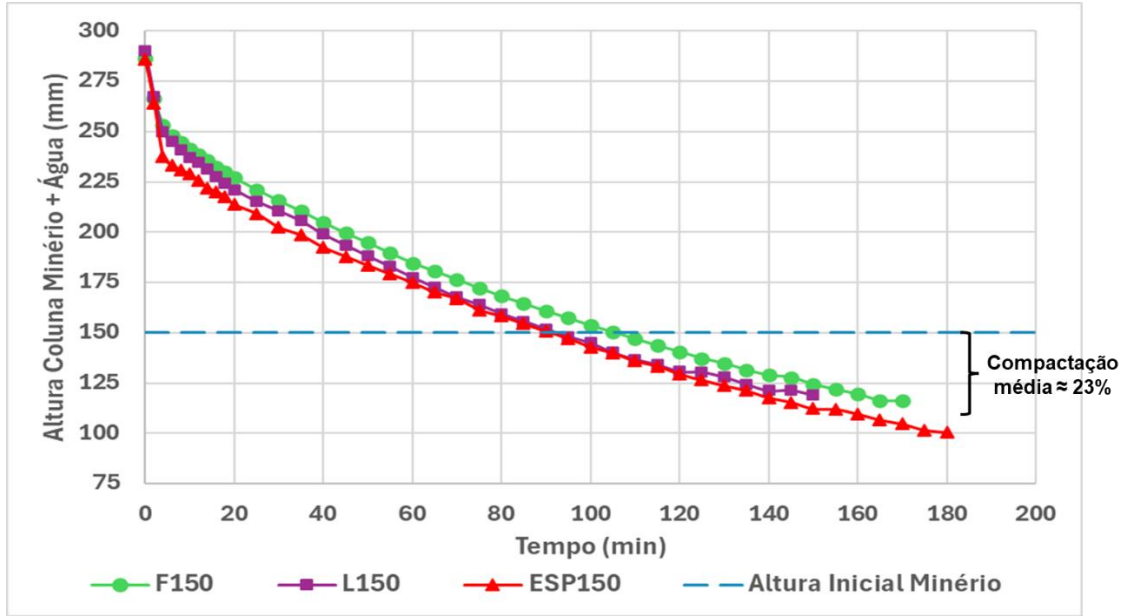


Figura 50 - Drenagem média para altura inicial de 150 mm.

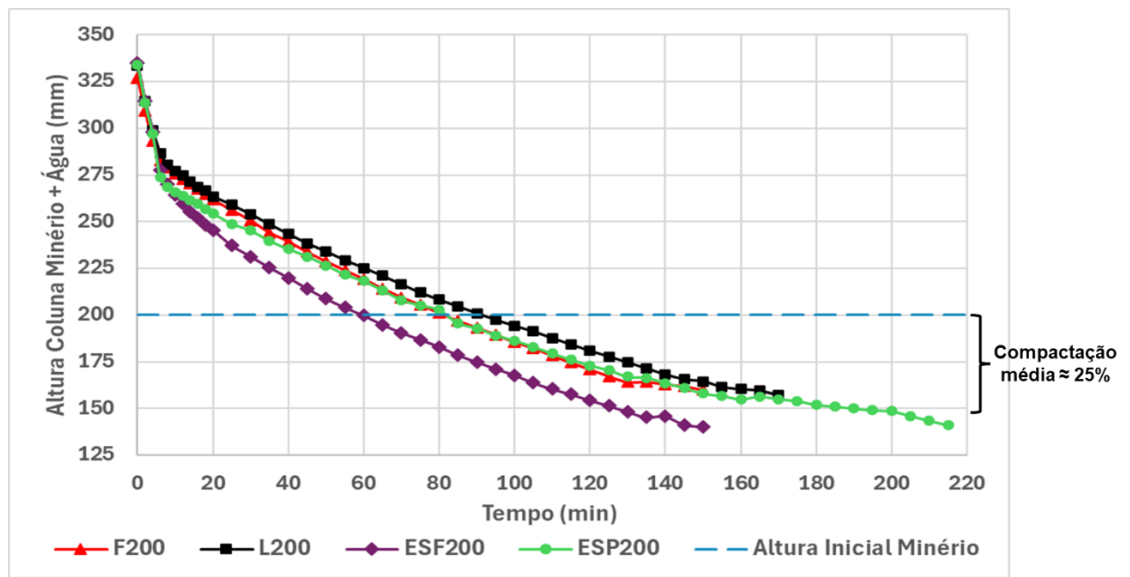


Figura 51 - Drenagem média para altura inicial de 200 mm.

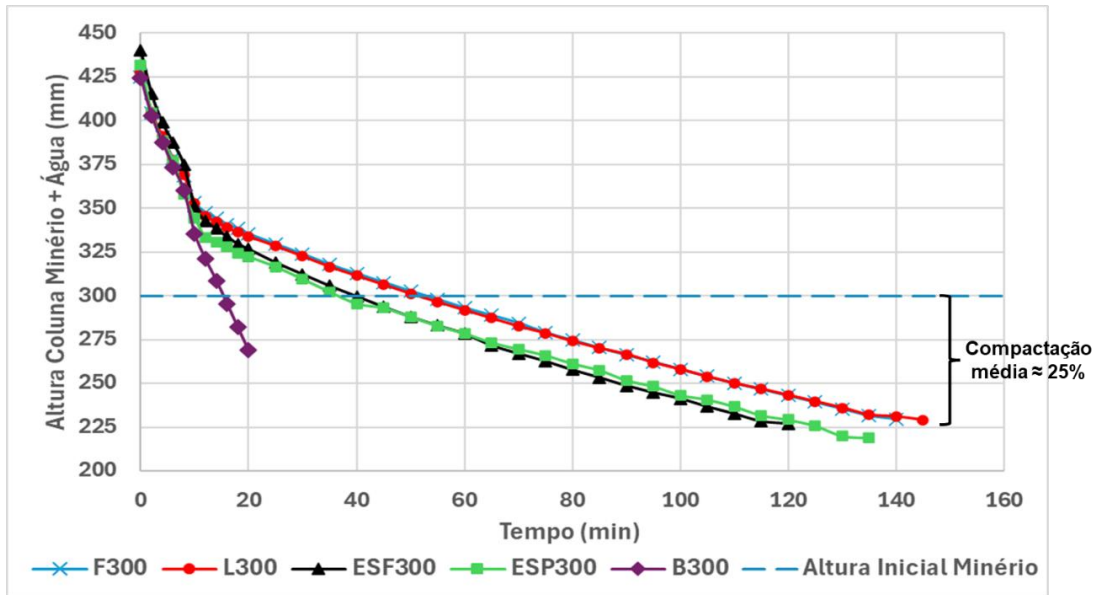


Figura 52 - Drenagem média para altura inicial de 300 mm.

Conforme a Figura 43, a compactação do minério de ferro na bancada experimental foi próxima de 22%. As compactações percebidas em cada altura de minério, apresentadas nas Figura 49 a Figura 52, situam-se aproximadamente em torno desse valor, sendo verificado que nas alturas de 200 e 300 mm ela foi levemente superior, podendo ter sido possivelmente influenciada pela carga mais elevada de minério.

São ilustrados nas Figura 53 a Figura 57 a comparação de drenagem para alturas distintas, empregando o mesmo tipo de dreno.

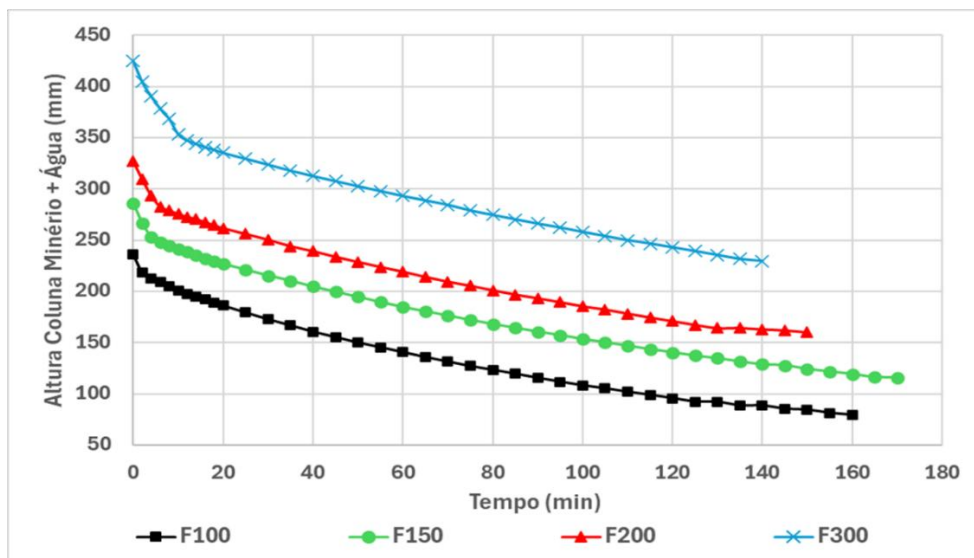


Figura 53 - Drenagem média para o dreno de fundo.

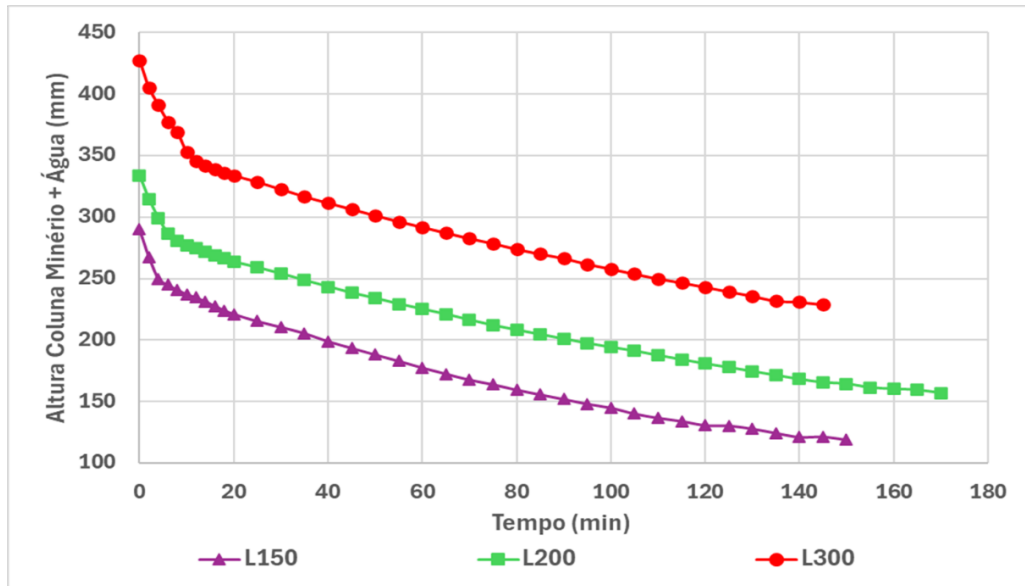


Figura 54 - Drenagem média para o dreno lateral.

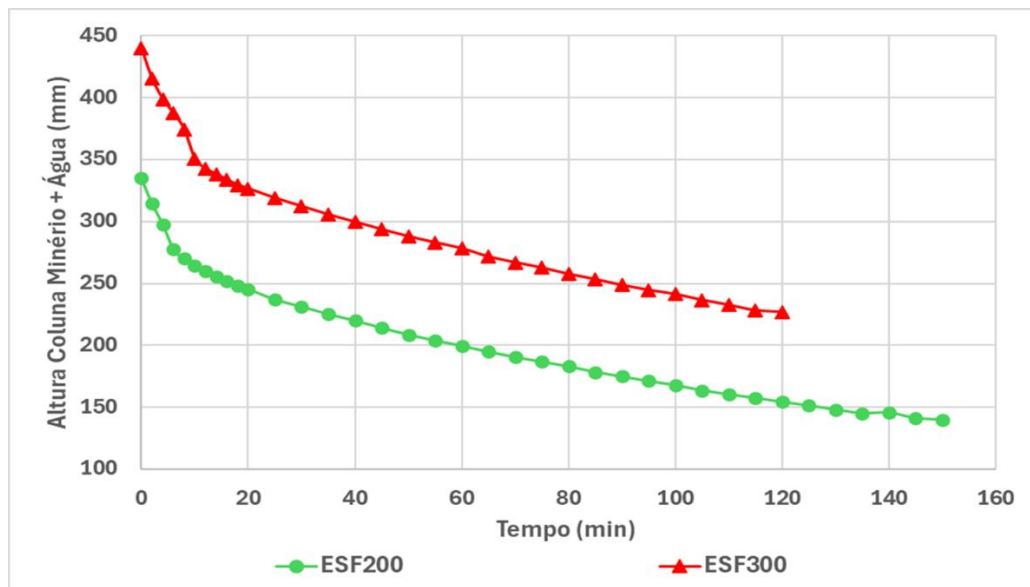


Figura 55 - Drenagem média para o preenchimento lateral de esferas.

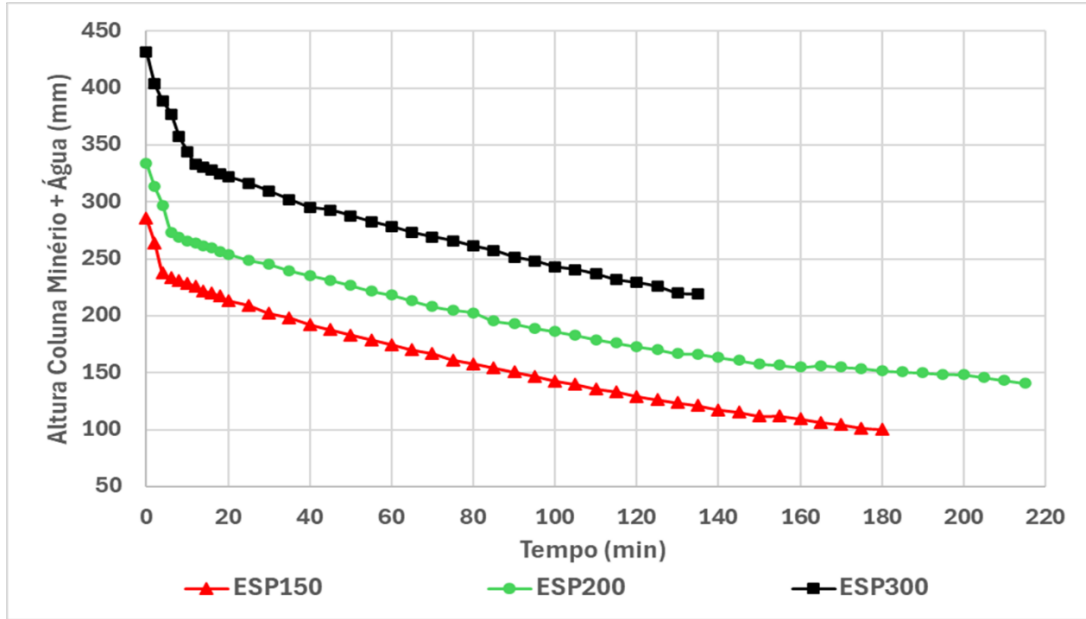


Figura 56 - Drenagem média para o preenchimento lateral de espuma.

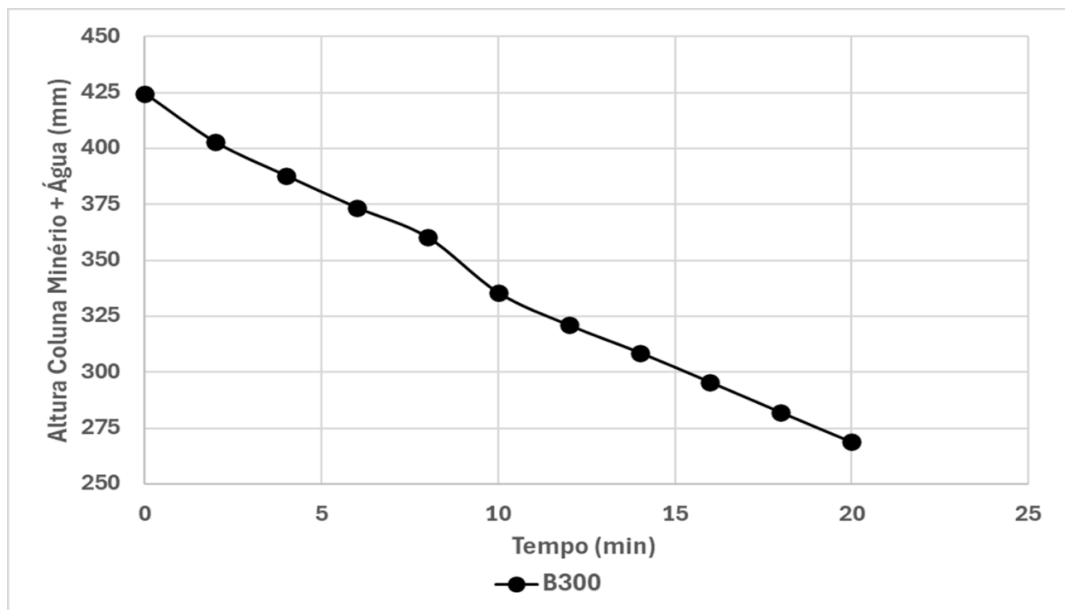


Figura 57 - Drenagem média para o preenchimento lateral de brita.

O dreno de fundo apresentou o comportamento mais uniforme nas drenagens realizadas com diferentes alturas, mantendo compactações entre 20% e 23%, valores próximos aos obtidos nos ensaios de compactação na bancada. Observou-se que, mesmo com uma maior coluna de minério sobre o dreno, a água percolou e drenou na mesma velocidade em todas as alturas testadas.

Por outro lado, os demais dispositivos exibiram maior variação nos tempos de drenagem e compactações mais elevadas. As compactações médias variaram de 24% no dreno reto lateral a 27% nas esferas e 30% na espuma. No caso da brita, a

formação de canais preferenciais em todos os ensaios impossibilitou a medição da compactação devido ao arrasto significativo de grandes quantidades de minério.

Por fim, a perda mássica de cada dispositivo é vista nas Figura 58 e Figura 59, por altura em cada dispositivo e por dispositivo em cada altura, respectivamente, a fim de facilitar as comparações com diferentes pontos de vista.

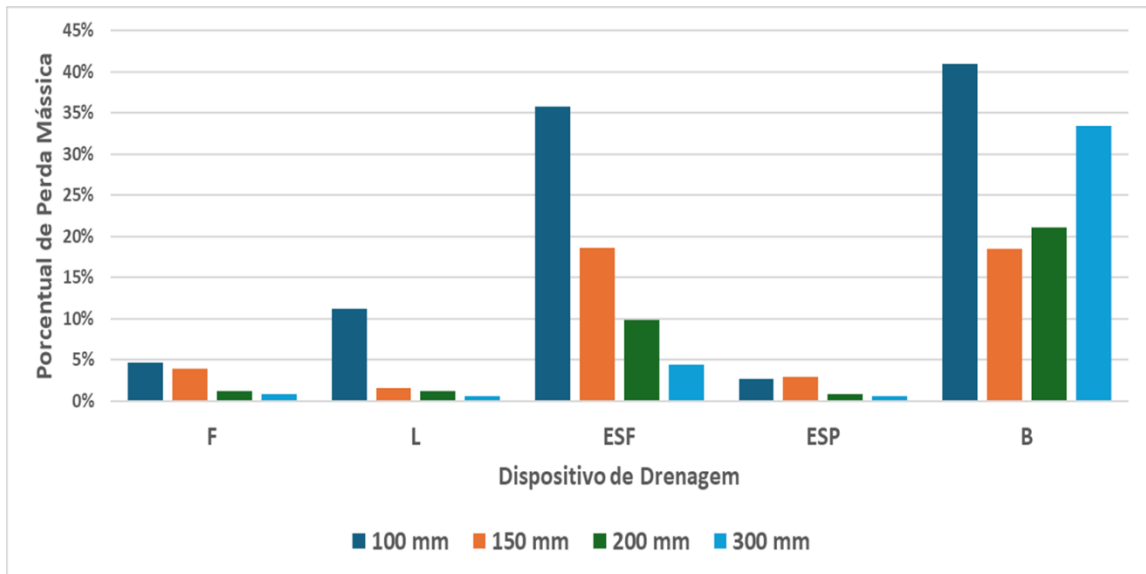


Figura 58 – Perda mássica por dispositivo.

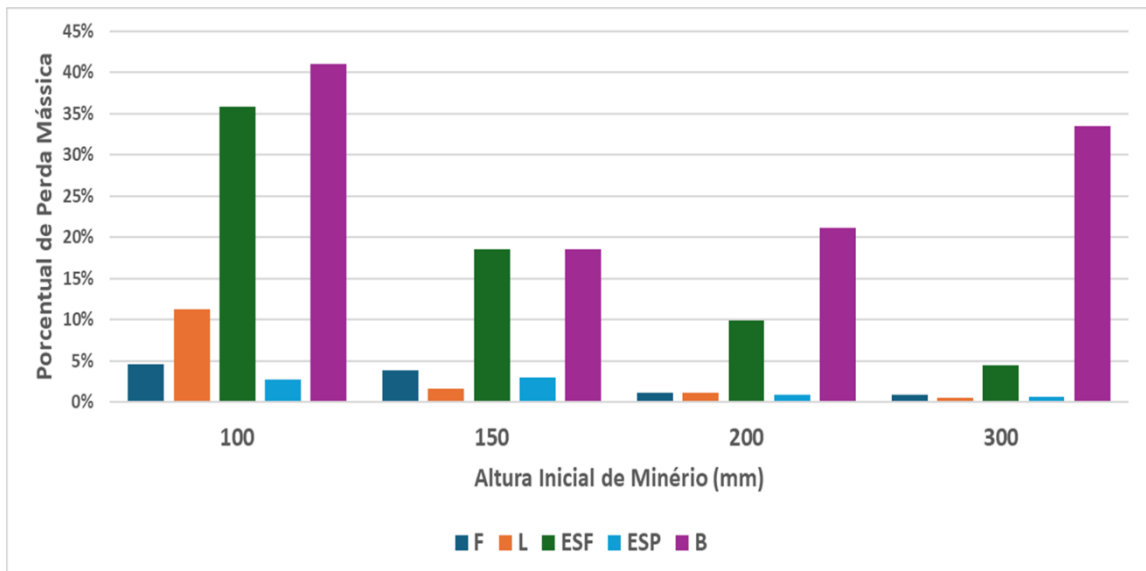


Figura 59 – Perda mássica por altura.

Observou-se que as perdas mássicas são mais elevadas quando ocorre a formação de canal preferencial, pois há um arrasto considerável de minério pela água, o que é evidente em todos os ensaios na altura de 100 mm, em razão da coluna de minério ser baixa suficientemente, levando a água a alcançar mais rapidamente o dispositivo. Enquanto a brita proporciona as maiores perdas, a espuma é o dispositivo que consegue minimizar tal ocorrência, tendo um comportamento semelhante ao dreno reto de fundo.

Notou-se uma peculiaridade no caso da brita na altura de 300 mm, onde há uma perda significativamente elevada, devido a formação de canal preferencial somada ao fato de ser uma grande coluna de minério acima do dreno, possibilitando um arrasto de maiores quantidades de minério. O dreno reto lateral se comportou de maneira intermediária entre o dreno reto de fundo e a espuma (que são similares entre si), e as esferas. Já o dreno lateral de esferas apresentou a segunda maior perda, após somente a brita, diminuindo percentualmente conforme a progressão da altura da coluna de minério.

No aspecto qualitativo observado após a drenagem, conforme ilustrado na Figura 60, o dreno de fundo demonstrou que a percolação e a drenagem ocorreram de forma uniforme, sem a formação de canais preferenciais em nenhum dos casos analisados.

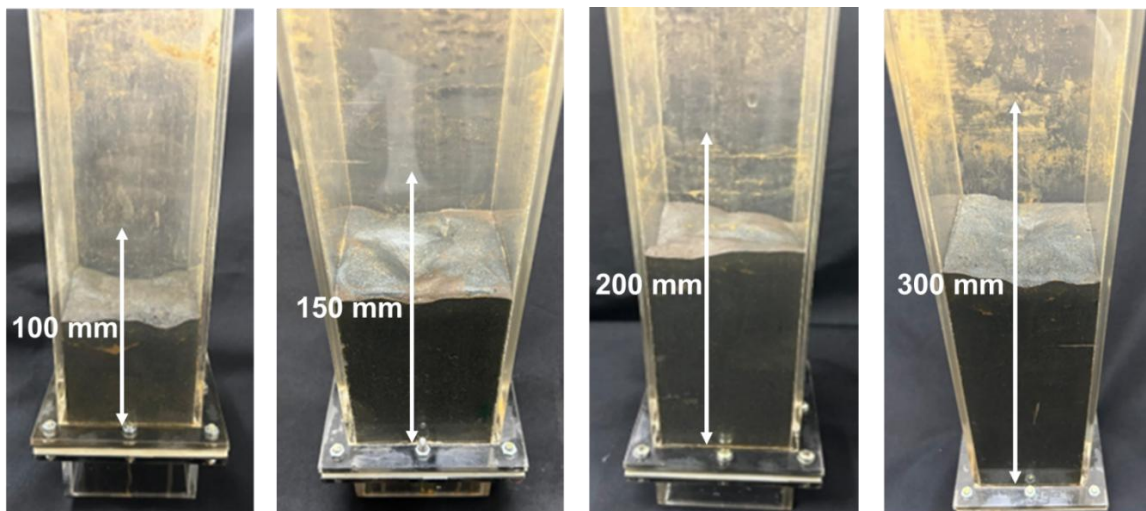


Figura 60 – Minério compactado ao final dos ensaios de 100, 150, 200 e 300 mm de altura, para o dreno reto de fundo, respectivamente.

Com o dreno lateral, nos experimentos com coluna de minério de 100 mm iniciais havia a formação de canal preferencial assim que o ensaio era iniciado, sendo impraticável ser contabilizado o tempo de drenagem. A Figura 61 evidencia a formação de canal preferencial.

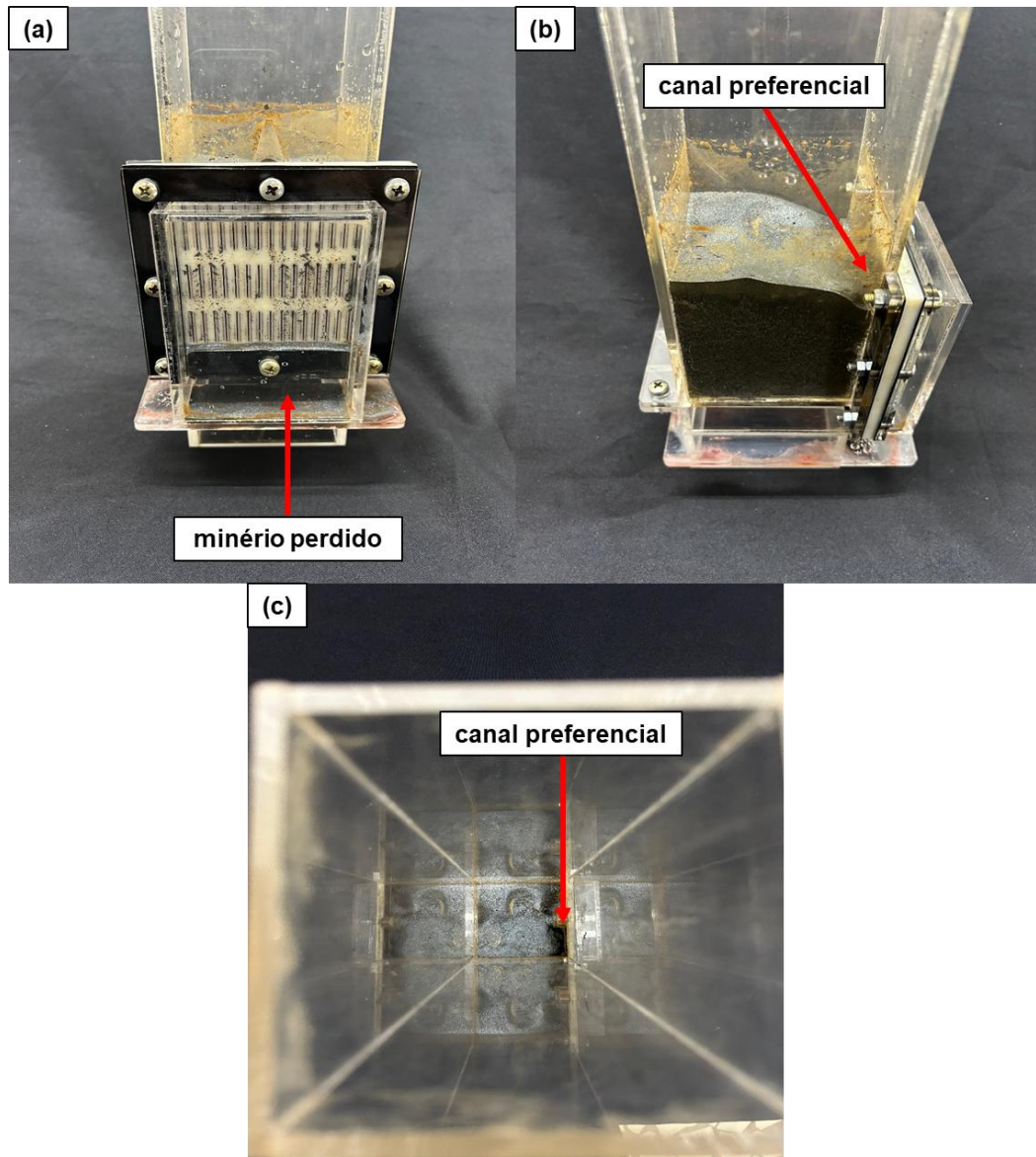


Figura 61 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o dreno reto lateral, para a altura inicial de 100 mm, com formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista de topo.

Para os ensaios com alturas de 150, 200 e 300 mm, o aspecto típico ao final do experimento é apresentado na Figura 62. A percolação e a drenagem ocorrem sem a formação de canal preferencial, com minério parcialmente retido no reservatório lateral, além da coluna compactada próxima à altura do dreno.

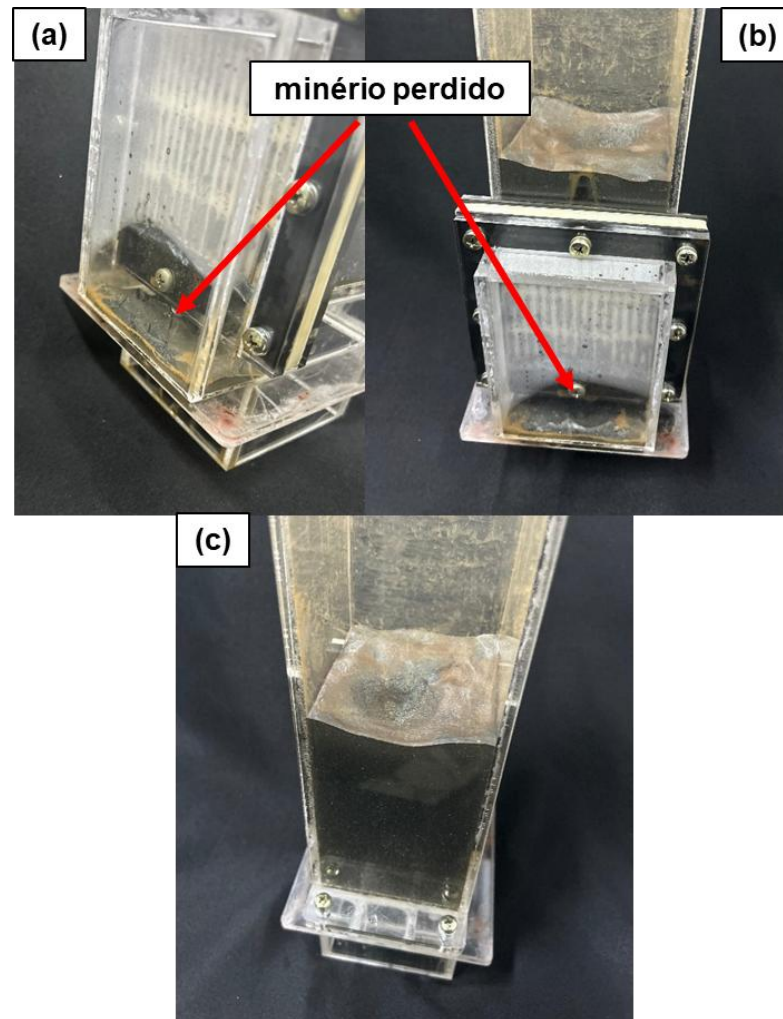


Figura 62 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o dreno reto lateral, para a altura inicial de 150 mm, sem formação de canal preferencial, sendo (a) vista lateral inclinada; (b) vista frontal e (c) vista posterior.

Os tempos médios de drenagem para esse tipo de dreno também ficaram entre 140 e 170 minutos, desconsiderando os ensaios de 100 mm de altura, onde houve formação de canal preferencial imediatamente, logo não sendo viável a contabilização do tempo de drenagem, tendo em vista que a água escoava e é drenada instantaneamente. As perdas mássicas variaram de em torno de 0,5% até aproximadamente 11%, sendo esse último o caso de canal preferencial.

Nos casos de drenos laterais com preenchimento de esferas poliméricas, havia a formação de canal preferencial nos instantes iniciais, em praticamente todas as alturas, de acordo com o indicado na Figura 63, com exceção da maior altura, de 300mm de coluna de minério. Nesse caso, ocorria a perda de minério por entre o preenchimento, com a compactação da coluna de minério de acordo com a Figura 64.

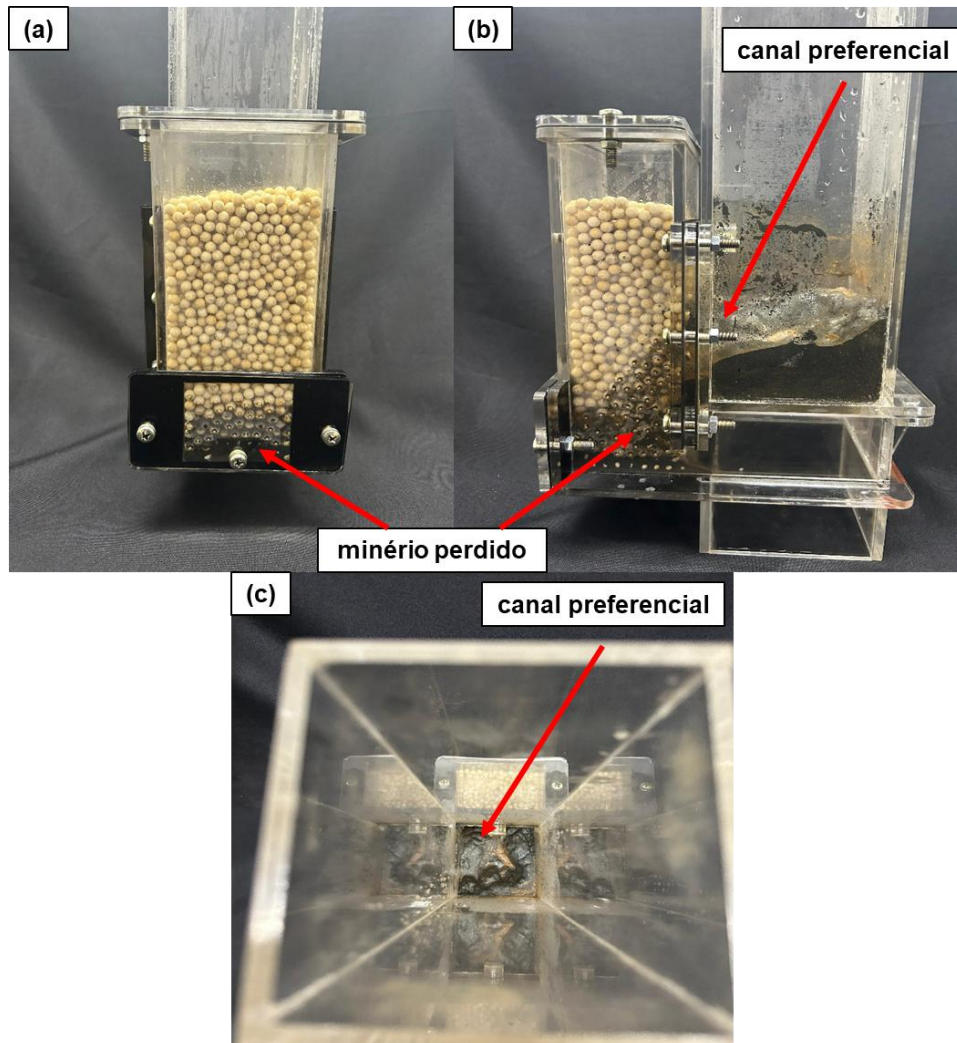


Figura 63 – Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de esferas, para a altura inicial de 100 mm, com formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista de topo.

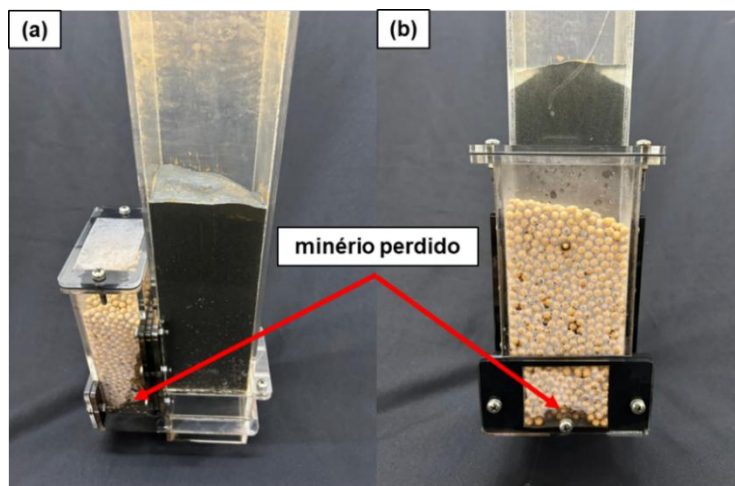


Figura 64 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de esferas, para a altura inicial de 300 mm, sem formação de canal preferencial, sendo (a) vista lateral e (b) vista frontal.

Os tempos médios de drenagem para este tipo de preenchimento variaram entre 120 e 150 minutos, exceto nos ensaios com alturas de 100 mm e 150 mm, onde a formação imediata de canais preferenciais impossibilitou a contabilização, já que a água foi drenada instantaneamente. As perdas mássicas oscilaram entre 4% e 36%, sendo este último valor associado à ocorrência de canais preferenciais.

Para os ensaios com espuma, havia a formação de canal preferencial para menor altura, sendo que as demais apresentam compactação normal do minério, e percolação com drenagem e pouca perda mássica, como exemplificado na Figura 65.

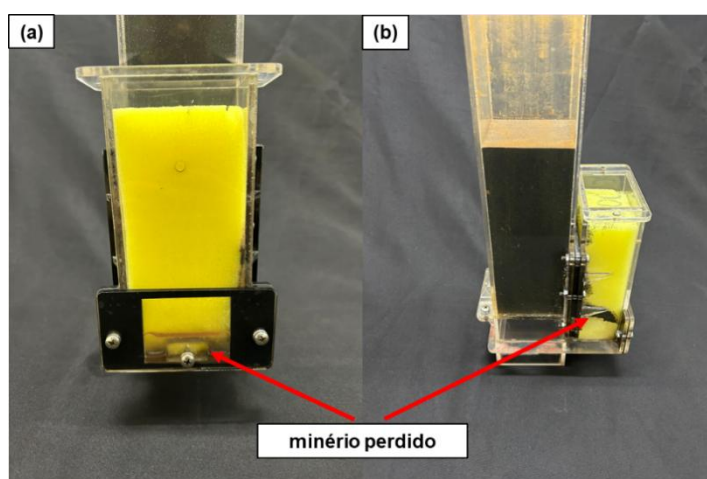


Figura 65 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de espuma, para a altura inicial de 300 mm, sem formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal e (b) vista lateral.

Os tempos médios de drenagem para esse tipo de preenchimento ficaram entre 135 e 215 minutos, desconsiderando os ensaios de 100 mm, onde houve formação de canal preferencial imediatamente, logo não sendo viável a contabilização do tempo de drenagem, tendo em vista que a água escoava e é drenada instantaneamente. As perdas mássicas variaram de em torno de 0,6% até aproximadamente 3%.

Peculiarmente, a perda maior de 3%, constitui a altura de 150 mm e não o canal preferencial de 100 mm, apesar de que ambas as perdas nas duas alturas foram bem próximas, sendo a de 100 mm aproximadamente 2,7%.

Por fim, nos ensaios com pedra brita, houve a formação de canal preferencial logo de imediato assim que o ensaio era iniciado, sendo impraticável ser contabilizado o tempo de drenagem. É ilustrado na Figura 66 a formação de canal preferencial na coluna de minério comprimido supersaturado.

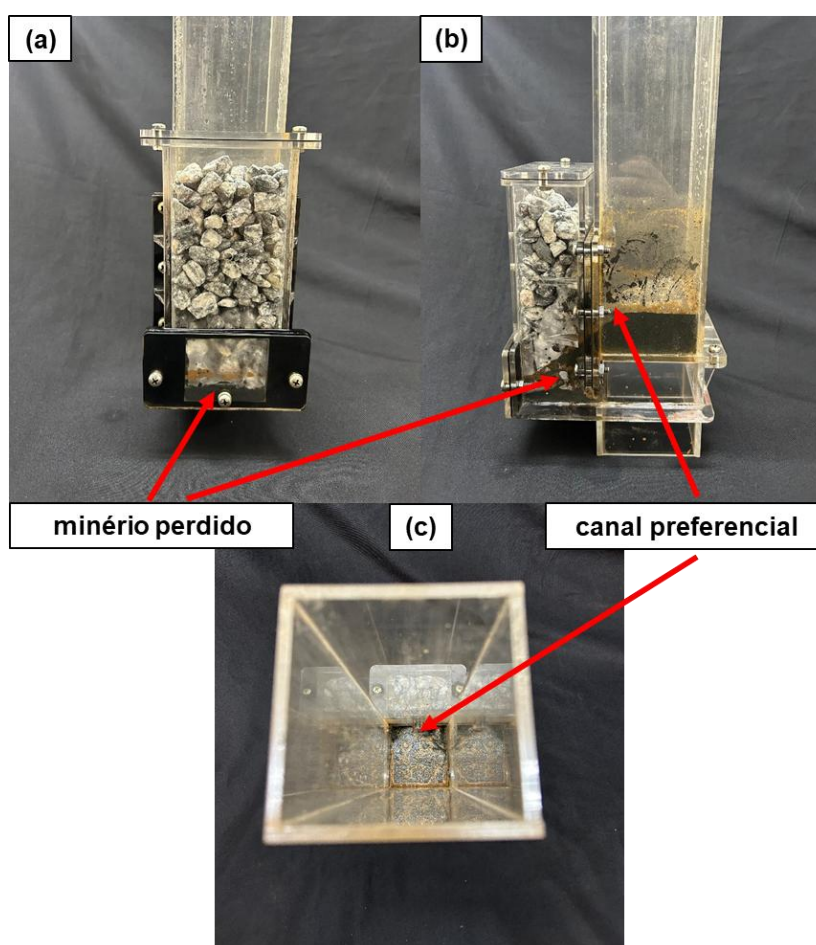


Figura 66 - Exemplo de coluna de minério compactado após o término do ensaio para o preenchimento lateral de brita, para a altura inicial de 100 mm, com formação de canal preferencial, sendo (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista de topo.

Fundamentalmente, a brita causou surgimento de canal preferencial em todas as alturas, mesmo que na mais elevada delas (300 mm) levava um tempo médio de 20 a 25 minutos para formação dele. Por tal fato, as perdas mássicas do dispositivo de brita constituem-se como as mais elevadas, variando aproximadamente de 19% a 41%.

No âmbito geral dos ensaios propostos, os comportamentos foram similares, em virtude da característica de percolação no sentido vertical pela ação da gravidade. Além disso, verificou-se que no início dos ensaios a água percolou mais rapidamente devido ao fato de o minério ainda não estar compactado (a compactação por vibração externa induzida inicia-se ao mesmo tempo que a deposição da água). Logo, ficou evidente que quanto maior a compactação, mais comprometida fica a percolação da água.

As comparações entre os tempos de drenagem da mesma massa de água dentro das mesmas alturas de coluna inicial de minério demonstram que o que foi determinante foi a quantidade de minério, e não o tipo de dreno em si.

A proximidade dos acoplamentos de fundo e lateral, conforme mostrado na Figura 67, acaba por ser um dos motivos principais de se obter o mesmo tempo experimental de drenagem.

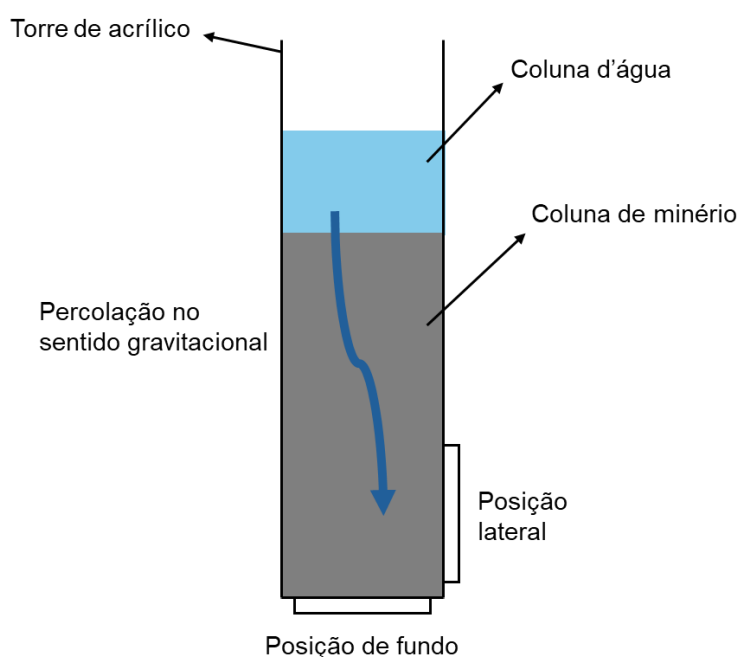


Figura 67 – Sentido da percolação da água na torre de acrílico e proximidade dos acoplamentos de fundo e lateral entre si. (Fonte: autor)

Quando ocorre o canal preferencial, a massa de água sobre a coluna do minério é eliminada repentinamente, sendo interessante do ponto de vista da necessidade de logo evitar água livre nos vagões. Contudo, sua desvantagem é a perda excessiva de minério pela formação de agitação ou turbulência do fluxo, que carrega os particulados de modo intenso.

Foi nítido que quanto mais próxima for a altura da coluna de minério do dispositivo de drenagem, em conjuntura com os efeitos da compactação, a chance de formação de canal preferencial é maior. Todas as alturas de 100 mm propiciaram o surgimento de canal preferencial.

Além disso, notou-se que as esferas poliméricas e a brita ocasionaram canais preferenciais em alturas até mais altas do que 100 mm, o que seria proveitoso, mas ao mesmo tempo é desvantajoso em razão de seus elevados desperdícios de minério. As esferas e a brita tenderam a produzir as maiores perdas devido a mobilidade entre as partículas que as compõe, fazendo com que minério se acomodasse e passasse por elas à medida que o sistema vibrasse com o mecanismo de impacto. No caso da brita, essa acaba sendo ainda mais extrema entre os dois preenchimentos citados, por causa da sua morfologia maior e irregular quando comparada com a das esferas, propiciando maiores vazios entre cada pedra.

A espuma, por apresentar uma capacidade de retenção de particulado de minério nos seus poros, foi o dispositivo que apresentou as menores perdas mássicas enquanto ainda possui considerável capacidade de drenagem. Mesmo no caso de canal preferencial, seu desperdício ainda foi baixo.

Por fim, um último aspecto a se destacar foram as dimensões da seção de testes das torres de acrílico. Por ser formada com uma área quadrada com 80 mm de aresta, sua dimensão em relação aos drenos é muito semelhante, o que pode induzir ao pensamento proporcional de desperdício equivocado. Em um vagão ferroviário, cuja área é próxima de 24 m<sup>2</sup>, a dimensão do dreno em relação à área do vagão é muito menor.

Logo, em uma análise mais real, pode-se avaliar os efeitos de maiores áreas de testes laboratoriais, cujo desperdício durante a percolação será muito menor. Este trabalho tentou apresentar mecanismos que tendem a desobstruir a eliminação de água livre, que ocorre na parte superior dos vagões, por meio de preenchimentos variados que impeçam a perda excessiva de minério e permitam a eliminação máxima de massa de água.

## 4 CONCLUSÕES

O trabalho permitiu concluir que:

- a) Os perfis ao longo do tempo das drenagens nos dispositivos dreno de fundo, dreno lateral e dreno lateral com esferas ou espuma, mantêm-se nos mesmos padrões, verificando-se indiferença em relação aos tempos de drenagem, salvo quando da formação de canal preferencial. Isso mostra que a dinâmica de drenagem é primordialmente controlada pelo minério avaliado.
- b) O dreno lateral recheado com brita foi o único que teve formação de canal preferencial em todas as alturas ensaiadas, de 100 a 300mm de minério. Porém, sua perda mássica também se mostrou alta, sendo uma ressalva importante à sua empregabilidade em vagões sem a devida validação para maiores áreas de testes de colunas de minério.
- c) O canal preferencial é a alternativa mais efetiva para drenar a água acumulada na superfície livre da coluna de minério, de modo rápido, o que pode ser interessante em termos práticos de aplicabilidade nos vagões em campo. Porém, o desperdício mássico que caminha junto com tal opção é um ponto a ser observado em sua viabilidade prática.
- d) Este estudo identifica um potencial equilíbrio entre as vantagens oferecidas pelos canais preferenciais e a mitigação de suas desvantagens. Observa-se que a espuma, embora apresente tempos de drenagem semelhantes aos de outros dispositivos, destaca-se por proporcionar uma drenagem mais eficiente associada a uma menor perda mássica.

### 4.1 Trabalhos futuros

O projeto de pesquisa foi elaborado como um estudo qualitativo e quantitativo de comportamentos de escoamento, percolação e drenagem de água, incitando a discussão sobre alternativas para melhorar e otimizar o cenário atual. Tal projeto pode instigar linhas de pesquisa com outros tipos de materiais de preenchimento. Uma linha de pensamento a ser seguida pode ser também a confecção de um vagão em escala reduzida para poder estudar mais minuciosamente os efeitos de canal preferencial. Por fim, trabalhar com outros tipos de sólidos granulados que possam passar por

situações semelhantes ao minério de ferro estudado, como outros tipos de minério de ferro ou carvão.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR ISO 4701:2020 - Minérios de ferro e aglomerados — Determinação da distribuição granulométrica por peneiramento**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2022.

ALMEIDA, F. P. de; LIMA, V. L. A. de; AZEVEDO, C. A. V. de; et al. **Material envoltório na drenagem subterrânea**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.3, p. 671-676, set./dez. 2005.

ANDRADE, M. L. A. de; CUNHA, L. M. da S.; VIEIRA, J. R. M. **O mercado mundial de minério de ferro e a inserção brasileira**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 2, p. 88-107, nov. 1995.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Informe Mineral: 3º Trimestre de 2023**. Ministério de Minas e Energia, 2023. Disponível em: [https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe\\_03tri2023.pdf](https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/informe-mineral/publicacoes-nacionais/informe_03tri2023.pdf). Acesso em: 7 nov. 2024.

ANTF – Associação Nacional dos Transportadores Ferroviários. **O Setor Ferroviário De Carga Brasileiro**. Informações Gerais, 2024. Disponível em: <https://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

BOGSAN, M. A. V.; MORAES, D. Júnior, ROSA, V. S.; et al. **Desenvolvimento de uma Bancada Experimental para Estudos de Percolação e Drenagem de Água em Minérios**. In: POMBO, J. (Ed.). Proceedings of the Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance. Civil-Comp Press, Edinburgh, Reino Unido, Online volume: CCC 1, Paper 25.4, 2022. DOI: 10.4203/ccc.1.25.4.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos: teoria e aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

CARVALHO, P. S. L. de; SILVA, M. M. da; ROCIO, M. A. R.; et al. **Minério de ferro**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 39, p. 197-233, mar. 2014.

CBFA – Companhia Brasileira de Ferro e Aço. **Conheça as 5 principais ferrovias do Brasil**. 2024. Disponível em: <https://www.cbfa.com.br/conheca-as-5-principais-ferrovias-do-brasil/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

CHILDS, E. C.; COLLIS-GEORGE, N. **The permeability of porous materials.** Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 201, n. 1066, p. 392-405, 1950. DOI: 10.1098/rspa.1950.0063.

FLORENCE, J. B. C.; TABATÁ, G. A.; ALBUQUERQUE, L. H. F. de; et al. **Efeito da Intensidade de Vibração no Perfil de Compactação de Minério do tipo Pellet Feed.** ENPG 2024, Universidade Santa Cecília, 2024.

GARCIA, B. B. **Estudo da Perda Mássica de Minério de Ferro do tipo Pellet Feed em Bancada Experimental com Drenos de 0,6 mm e 1 mm de Abertura de Fresta.** 23º Congresso Nacional de Iniciação Científica – CONIC/SEMESP 2023, Universidade Santa Cecília, 2023.

GONTIJO, C. de F. **Caracterização de minério de ferro para desaguamento.** Anais dos Seminários de Redução, Minério de Ferro e Aglomeração, Editora Blucher, 2017.

HOW TO CIVIL. **Overview of permeability of soil.** Disponível em: <https://www.howtocivil.com/overview-of-permeability-of-soil/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PIA – Produto Interno Bruto: 2021. Minério de ferro permanece o principal produto e indústria alimentícia lidera entre as atividades industriais.** Agência IBGE de Notícias, 19 mar. 2023. Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37247-pia-produto-2021-minerio-de-ferro-permanece-o-principal-produto-e-industria-alimenticia-lidera-entre-as-atividades-industriais#:~:text=O%20min%C3%A9rio%20de%20ferro%20manteve,brutos%20de%20petr%C3%B3leo%20em%202020](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37247-pia-produto-2021-minerio-de-ferro-permanece-o-principal-produto-e-industria-alimenticia-lidera-entre-as-atividades-industriais#:~:text=O%20min%C3%A9rio%20de%20ferro%20manteve,brutos%20de%20petr%C3%B3leo%20em%202020.). Acesso em: 07 nov. 2024.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura e Pecuária. <https://portal.inmet.gov.br>. Acesso em 21 de novembro de 2024.

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Ipea e MME lançam estudo sobre a extensão da cadeia produtiva da mineração no PIB brasileiro.** IPEA Notícias, 22 abr. 2023. Disponível em: [https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/14835-ipea-e-mme-lancam-estudo-sobre-a-extensao-da-cadeia-produtiva-da-mineracao-no-pib-brasileiro#:~:text=Em%20valores%2C%20essa%20varia%C3%A7%C3%A3o%20representou,pela%20for%C3%A7a%20de%20arrasto%20produtivo](https://www.ipea.gov.br/portal/categorias/45-todas-as-noticias/noticias/14835-ipea-e-mme-lancam-estudo-sobre-a-extensao-da-cadeia-produtiva-da-mineracao-no-pib-brasileiro#:~:text=Em%20valores%2C%20essa%20varia%C3%A7%C3%A3o%20representou,pela%20for%C3%A7a%20de%20arrasto%20produtivo.). Acesso em: 07 nov. 2024.

JORNAL DO COMÉRCIO. **Produção de minério de ferro da Vale atinge recorde no terceiro trimestre.** Disponível em: <https://www.jornaldocomercio.com/conteudo/2017/10/economia/591628-producao-de-minerio-de-ferro-da-vale-atinge-recorde-no-terceiro-tirimestre.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais.** Porto Alegre: Bookman, 2011.

KOWALCZUK, P. B.; DRZYMALA, J. **Physical meaning of the Sauter mean diameter of spherical particulate matter**. Particulate Science and Technology, v. 34, n. 6, p. 645–647, 2016. DOI: 10.1080/02726351.2015.1116837.

LIMA, P. H. A.; SOARES, J. A.; ROSA, I. B. C.; et al. **Petrofísica de minério de ferro**. In: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica (EXPOGEF), 13., 2013, Rio de Janeiro. Anais [...] Rio de Janeiro: SBGf, 2013.

LUCCIO, A. R. de A. di; **Estudo dinâmico de uma composição ferroviária de carga e análise de condições de descarrilamento**. Rio de Janeiro: Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2016, Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica).

MASSARSCH, K. R., 2002. **Effects of Vibratory Compaction**. TransVib 2002 - International Conference on Vibratory Pile Driving and Deep Soil Compaction. Louvain-la-Neuve. Keynote Lecture, p. 33-42.

MATOS, G. V. F. **Utilização de geocompostos drenantes para drenagem em campos desportivos**. São Luís: Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), 2019. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil).

MMIA - Maritime Mutual Insurance Association. **Bulk Cargo Dangers – IMSBC Code Update In Force, 1st Jan 2019, MMIA Bulletin No. 002**. Disponível em: <https://maritime-mutual.com/wp-content/uploads/2019/10/MMIA-bulletin-002.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2025.

MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. **Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers**. Marine Structures, Volume 40, January 2015, p. 193-224.

NOTAS GEO. **Minério de ferro: produção em crise**. Disponível em: <https://www.notasgeo.com.br/2019/03/minerio-de-ferro-producao-em-crise.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.

PEREIRA, A. A. A. **Desempenho de Envolvório na Eficiência da Drenagem de um Solo com Drenos Tubulares**. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, Universidade de São Paulo, 1988.

SEABRA, J. **Estudo da eficácia dos drenos verticais: Adaptados para vagões do tipo Gôndola**. VI Encontro ANTF de Ferrovias, 2021.

SHATOKHA, V. **Iron Ore and Iron Oxide Materials**. IntechOpen, 2018.

SP LABOR. **Peneiras granulométricas em aço inox – Diâmetro 5” (127 mm) x Altura 2” (50 mm)**. Disponível em: <https://www.splabor.com.br/produto/peneiras-granulometricas-em-aco-inox-diametro-5-127mm-x-altura-2-50mm/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

TRINDADE, T. P.; LIMA, D. C.; CARVALHO, C. A. B.; et al. **Compactação dos solos**. In: Simpósio Brasileiro Sobre Colheita e Transporte Florestal, 6., 2003, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: SIF/UFV, 2003. p. 297-325.

WASAKI Engenharia. **Principais malhas ferroviárias brasileiras**. 2024. Disponível em: <https://wasaki.com.br/principais-malhas-ferroviarias-brasileiras/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

WOODCOCK, C. R.; MASON, J. S. **Bulk Solids Handling - An Introduction to the Practice and Technology**. Glasgow: Leonard Hill, 1987.