

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

MARCELO AUGUSTO VALERIANO BOGSAN

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS DE
PERCOLAÇÃO E DRENAGEM DE ÁGUA EM MINÉRIOS**

SANTOS/SP

2022

MARCELO AUGUSTO VALERIANO BOGSAN

**DESENVOLVIMENTO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ESTUDOS DE
PERCOLAÇÃO E DRENAGEM DE ÁGUA EM MINÉRIOS**

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. Deovaldo de Moraes Júnior.

SANTOS/SP

2022

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

627.54 Valeriano Bogsan, Marcelo Augusto.

B665 d Desenvolvimento de uma bancada experimental para estudos de percolação e drenagem de água em minérios.

Marcelo Augusto Valeriano Bogsan. - 2022
96 p.

Orientador: Prof. Dr. Felipe Bertelli

Coorientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP,
20xx.

1. Minério de ferro. 2. Drenagem. 3. Vagão Gôndola.

I. Bertelli, Felipe. II. Moraes Junior, Deovaldo de. III.
Desenvolvimento de uma bancada experimental para estudos de
percolação e drenagem de água em minérios.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e meus avós, por todo o apoio e instrução durante minha trajetória, me permitindo estar preparado para esta importante fase da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Marcelo Bogsan e Carla Valeriano Bogsan, assim como a meus amigos, que sempre me apoiaram e instruíram, não deixando desistir nos momentos mais difíceis.

Aos engenheiros André de Oliveira Festa, André Fernandes Franzon, Augusto César Andrini, Ingrid de Castro Durans, Ingrid Martins da Silva Oliveira, Murilo Antunes Alves Lucindo, Nicole de Lima Bleckwedel, Noura Ayala Fernandes Cruz, Pedro Henrique Silva de Moraes e Vitor Palmarin Oliveira Santos, por todo o apoio durante a operação dos equipamentos, auxiliando na montagem, desmontagem, coleta de dados e registro fotográfico dos ensaios realizados.

Ao meu orientador Prof. Dr. Felipe Bertelli e ao meu coorientador Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior e ao Profº Dr. Vitor da Silva Rosa, por todo o auxílio e orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Engº Álvaro Luiz Moreira Conrado, Engº Ricardo Steger Giangiulio e aos técnicos Irineu da Penha Ressureição e Volnei de Lemos pelo empenho no desenvolvimento e manutenção das estruturas e equipamentos utilizados neste trabalho.

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 *strictu senso* por sua contribuição na minha formação.

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

RESUMO

No transporte ferroviário, vagões abertos do tipo gôndola carregam diferentes tipos de minério de ferro, como o Sínter Feed, Pellet Feed, tendo estas características físico-químicas singulares como densidade aparente, saturação e composição granulométrica. Em regiões com alto índice pluviométrico, uma grande massa de água que se mistura com a carga e se acumula na superfície (conhecida como água livre) precisa ser drenada para fora do vagão por diversos motivos, como evitar o transporte de peso excedente entre a mina e o porto, formação de grandes blocos aglomerados que se desprendem de uma só vez no descarregamento e aderência da carga às paredes do vagão. Atualmente, mesmo com o emprego de drenos instalados nas cabeceiras, o acúmulo de água sempre ocorre, tanto pela compactação dos finos de minério que formam uma polpa muito densa quanto pelo entupimento dos drenos. Como não existe uma norma específica ou ensaio padronizado que permita avaliar o melhor tipo de dreno para cada carga transportada, este projeto de mestrado teve como objetivo desenvolver um aparato experimental para estudos da eficiência dos sistemas de drenagem dos vagões tipo gôndola utilizados para carregamento de minério pela VALE S.A.. Foram desenvolvidos dois protótipos, sendo um de bancada reduzida e outro em escala ampliada para avaliação dos minérios de ferro Sínter Feed, Pellet Feed, CFFZ e FCAL. Foi proposto um método experimental para avaliação da eficiência dos drenos em laboratório, analisando de maneira direta a variação de altura de água em amostras de minério utilizando diferentes tipos de drenos, alternando entre abertura e formato de seus canais, concentração inicial de umidade nas amostras de minério de ferro e presença de vibração nos ensaios. Foi possível determinar que a manipulação dos fatores estudados influem de maneira direta na capacidade de drenagem da água livre, no qual o minério Sínter Feed pode ter ensaios com mais de 24 horas de percolação e drenagem, enquanto as tendências de drenagem mais longas para minério Pellet Feed são de 1 hora e 10 minutos.

Palavras-Chave: Minério de ferro; Drenagem; Vagão gôndola.

ABSTRACT

In rail transport, open gondola-type wagons carry different types of iron ore, Such as Sinter Feed, Pellet Feed and others, each having unique physical-chemical properties such as apparent density, saturation and granulometric composition. In regions with high rainfall, a large body of water that mixes with the load and accumulates on the surface (known as free water) needs to be drained out of the railcar for a variety of reasons, such as avoiding transporting excess weight between the mine and the port, formation of large agglomerated blocks that come off at once when the cargo is unloaded and adhered to the walls of the wagon. Currently, even with the use of drains installed at the headboards, the accumulation of water always occurs, both by the compaction of the ore fines that form a very dense pulp and by the clogging of the drains. As there is no specific normative or standardized test that allows evaluating the best type of drain for each transported load, this master's project aimed to develop an experimental apparatus for studying the efficiency of drainage systems of gondola-type wagons used for ore loading. by VALE S.A. Two prototypes were developed, one on a bench and the other on a larger scale for the evaluation of Sinter Feed, Pellet Feed, CFFZ and FCAL iron ores. An experimental method was proposed to evaluate the efficiency of drains in the laboratory, analyzing on a direct manner the water height variation on iron ore samples utilizing different drains, alternating the opening and geometry on its channels, the initial humidity concentration in the samples and the vibration presence on the tests. It was possible to determinate that the manipulation of these study factors has a direct influence on the free water drainage capability, in which the Sinter Feed ore has tests that could surpass 24 hours for percolation and drainage, while the highest tendencies achieved for the Pellet Feed ore are about 1 hour and 10 minutes.

Keywords: Iron ore; Drainage, Gondola car.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Percurso da Estrada de Ferro Carajás.....	13
Figura 2 - Vagões gôndola realizando transporte de minério de ferro.....	14
Figura 3 - Modelo de drenagem por tubos.	17
Figura 4 - Diferentes modelos de vagão tipo gôndola e aplicação de drenos de poliuretano.....	17
Figura 5 - Conjunto de drenos substituídos por entupimento (A, B e C) e falha mecânica (A e D).....	18
Figura 6 - Redução de água livre no vagão pela redução de altura de instalação do dreno superior da cabeceira.....	19
Figura 7 - Vagão tipo gôndola com alterações na disposição de dreno.	20
Figura 8 - Modelo côncavo para maior área de contato.	21
Figura 9 - Dreno côncavo com abertura de malha 1,2mm.	21
Figura 10 - Forças de Van der Waals em diferentes sistemas.	23
Figura 11 – Menisco formado entre partículas.	26
Figura 12 - Estados de saturação	27
Figura 13 - Classificação granulométrica para materiais particulados.	29
Figura 14 – Detalhamento de fixação dos drenos ao dispositivo.	34
Figura 15 - Dispositivo de ensaio com amortecedor de água.....	34
Figura 16 - Configuração de dreno utilizada para bancada reduzida.	35
Figura 17 – Dreno: a) seção reta e b) seção trapezoidal.	35
Figura 18 - Impressora 3D para confecção de drenos.	37
Figura 19 – Base da estrutura com espaço para béquero de coleta.	37
Figura 20 - Mecanismo elaborado para vibração automatizada.....	38
Figura 21 - Encapsulamento e automação da bancada reduzida.	39
Figura 22 - Idealização de bancada experimental para avaliação rápida de entupimento de drenos.	40
Figura 23 - Bancada piloto para ensaios de dreno: a) Vista frontal e b) Vista posterior.	40
Figura 24 - Módulo de drenagem para bancada piloto.....	41
Figura 25 - Mecanismo de vibração para bancada piloto.....	42
Figura 26 - (a) Tanque de ensaio com impermeabilizante e (b) instalação de dreno e flange de vedação.	43
Figura 27 - Mecanismo de vibração para bancada piloto.....	44
Figura 28 – Módulo de componentes hidráulicos.....	45
Figura 29 - Tanque de coleta com subdivisão de coleta.	46
Figura 30 - Dispositivo de levantamento do tanque de ensaio.....	47
Figura 31 - Agitador de bandejas.....	48
Figura 32 - Ensaio de densidade aparente.....	49
Figura 33 - Ensaio de controle de saturação: a) fase inicial e b) fase final	50
Figura 34 - Preparação de mistura inicial de Sinter Feed	51
Figura 35 - Formação de canal preferencial em particulados grosseiros	52
Figura 36 - Amostra de particulado retido em Mesh 5 para Sinter Feed.....	52
Figura 37 - Etapas de ensaio: (a) Acomodação do minério; (b) Adição de água com dispositivo amortecedor; (c) Ensaio em execução.....	54
Figura 38 - Distribuição granulométrica para os minérios de ferro em estudo.	57
Figura 39 - Concentrações mássica de água no Sinter Feed: a)2,78%; b)5,41%; c)7,89%; d)10,26%; e)12,50%.....	60

Figura 40 - Concentrações mássicas de água no Pellet Feed: a)2,60%; b)5,06%; c)7,40%; d)9,64%; e)11,76%.....	60
Figura 41 - Respostas de triplicata para drenos trapezoidais.	61
Figura 42 - Compactação apresentada após introdução de água para ensaio.	62
Figura 43 - Respostas de triplicata para drenos retos.....	63
Figura 44 - Condição de drenos reto e trapezoidal após ensaio com 40% de saturação inicial	64
Figura 45 - Comparativo entre massas: a) após um ensaio e b) sequenciamento....	64
Figura 46 - Separação entre camada de deposição e corpo da amostra.	65
Figura 47 - Curva de percolação para drenos retos de 1,0 a 2,5mm de abertura.	66
Figura 48 – Torta formada por efeito de vibração.	67
Figura 49 - Água livre expelida pela compactação do minério.	68
Figura 50 - Minério com frestas obstruídas após ensaio com vibração.....	68
Figura 51 - Dreno reto com fresta de 2,5mm em ensaio com vibração.....	69
Figura 52 - Curvas obtidas para dreno reto 0,6mm de largura de fresta.	70
Figura 53 - Curvas obtidas para drenos trapezoidais 0,6mm de largura de fresta. ...	71
Figura 54 - Condições de dreno após ensaio com C_w 7,41 em dreno reto.....	72
Figura 55 – Formação de canal de escoamento em dreno com 1,5mm de fresta....	72
Figura 56 - Curvas obtidas com drenos retos para o minério de ferro CFFZ.	73
Figura 57 - Curvas obtidas com drenos trapezoidais para o minério de ferro CFFZ.	74
Figura 58 - Condição de dreno após ensaio com minério de ferro CFFZ.....	75
Figura 59 - Curvas para minério de ferro FCAL para drenos retos.	76
Figura 60 - Curvas obtidas para minério de ferro FCAL para drenos trapezoidais....	76
Figura 61 - Dreno de frestas retas utilizado em ensaios com minério de ferro FCAL.	77
Figura 62 – Curvas de percolação para dreno instalado no fundo.	79
Figura 63 - Dreno após ensaio de fundo: a) face frontal em contato com a carga e b) face posterior.....	79
Figura 64 - Deposição de minério em dreno montado na posição horizontal.....	80
Figura 65 – Curvas de altura de água para dreno instalado na lateral do tanque de ensaio.....	81
Figura 66 - Frestas de dreno lateral vertical após ensaio.....	82
Figura 67 - Perfil de percolação para Pellet Feed com dreno de fundo.	83
Figura 68 - Região de turbilhão em ensaio com Pellet Feed.....	84
Figura 69 - Aspecto do dreno de fundo após ensaio.....	85
Figura 70 - Padrão de percolação para dreno em posição horizontal.	85
Figura 71 - Face externa de dreno após ensaio com Pellet Feed.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escalas utilizadas para classificação granulométrica.....	28
Tabela 2 – Espessuras padrão para drenos impressos.	36
Tabela 3 - Massas de minério e água para mistura com saturação 40%.	51
Tabela 4 - Massa de percolação de água para realização dos ensaios.	53
Tabela 5 – Granulometria de amostras Sínter Feed.	55
Tabela 6 - Granulometria de amostras Pellet Feed.	55
Tabela 7 - Granulometria de amostras CFFZ.....	56
Tabela 8 - Granulometria de amostras FCAL.....	56
Tabela 9 - Diâmetro de Sauter para os minérios.	57
Tabela 10 - Densidade aparente para os minérios estudados.	58
Tabela 11 - Proporção de massa de minério e massa de água para saturação.	58
Tabela 12 - Concentração mássica de água para amostras em bancada reduzida.	59
Tabela 13 - Tempo de percolação para minério de ferro Sínter Feed em bancada reduzida.....	63
Tabela 14 - Comparativo para tempos de percolação obtidos com Pellet feed.	71
Tabela 15 - Comparativo para o tempo de percolação e drenagem para minério de ferro CFFZ.....	74
Tabela 16 - Tempo de percolação para minério de ferro FCAL para drenos retos e trapezoidais.	77
Tabela 17 - Arranjo granulométrico para o Sínter Feed.	93
Tabela 18 - Arranjo granulométrico para o Pellet Feed.	94
Tabela 19 - Arranjo granulométrico para o CFFZ.....	95
Tabela 20 - Arranjo granulométrico para o FCAL.....	96

LISTA DE SÍMBOLOS

γ	–	Tensão superficial do líquido condensado
ε	–	Porosidade
θ	–	O ângulo de contato entre os corpos em contato com o líquido
ρ_p	–	Densidade aparente
φ_a	–	Porcentagem passante total
C_w	–	Concentração mássica de água
C_s	–	Concentração mássica de sólidos
D	–	Distância de separação entre as superfícies
D_{sa}	–	Diâmetro de Sauter
D_p	–	Diâmetro da partícula
D_{pi}	–	Diâmetro médio entre peneiras
F_{ad}	–	Força de adesão
F_c	–	Força capilar
F_e	–	Força eletrostática
F_{vdw}	–	Força de Van der Waals
K_e	–	Constante de proporcionalidade
H	–	Constante de Hamaker
m_a	–	Massa de água
m_s	–	Massa de sólido
R	–	Raio da partícula
r	–	Raio da partícula aderida
q	–	Carga eletrostática da partícula
V_p	–	Volume de preenchimento
V_T	–	Volume total
V_v	–	Volume de vazios
x_i	–	Fração mássica do intervalo
x_q	–	Distância de separação entre cargas contrárias
W	–	Trabalho de adesão
w	–	Umidade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
2	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância

Fundada em 1985, a Estrada de Ferro Carajás (EFC) conta com 892km de extensão e é responsável por interligar a Serra dos Carajás no sudeste do estado do Pará (PA), ao Porto de Ponta da Madeira localizado em São Luís no Maranhão (MA) (VALE, 2014). A ferrovia conta também com a interligação a outras duas ferrovias que cortam grande porção da região norte e nordeste do país, sendo mostrado na Figura 1 uma representação do trajeto desta linha férrea na região Norte do Brasil.



Figura 1 - Percurso da Estrada de Ferro Carajás.

Fonte: Vale, 2016.

Esta linha férrea é reconhecida como a mais eficiente no Brasil e realiza atualmente o transporte de passageiros, granéis sólidos, líquidos e possui como produto principal o minério de ferro. O transporte deste é feito através de composições que podem atingir aproximadamente 330 vagões, tendo uma média de transporte anual de 120 milhões de toneladas (Egis, 2020). A Figura 2 retrata uma das composições ferroviárias durante transporte de minério da mina de Carajás para o Porto.



Figura 2 - Vagões gôndola realizando transporte de minério de ferro.

Fonte: SINDIMINÉRIO (2014).

Na região sudeste do país, por sua vez, encontra-se a Estrada Ferroviária Vitória a Minas (EFVM). Fundada em 1905, interliga as capitais de Belo Horizonte em Minas Gerais (MG) e Vitória no Espírito Santo (ES), ao longo de 905km de extensão. Além de passageiros, grãos e carvão, esta linha é responsável por transportar 40% da carga ferroviária do país e aproximadamente 119 milhões de toneladas de minério de ferro por ano (Vale, 2015).

No transporte ferroviário, cada tipo de insumo possui propriedades e características distintas, variando em formato, peso, tamanho ou até mesmo estado físico. Tendo isto em mente, para melhor atender a particularidade destes materiais, as empresas que atuam na fabricação de vagões possuem diferentes modelos de veículos ferroviários. Para transporte de maquinários, contêineres e grandes bobinas, os vagões do tipo prancha são amplamente empregados. Enquanto isso, grãos agrícolas, seu formato e baixa aderência permitem um bom escoamento através de tremonhas, são utilizados os vagões do tipo Hopper. Quando são transportados produtos líquidos, existem vagões do tipo tanque que fazem seu armazenamento enquanto promovem estanqueidade. Já para materiais como carvão e minério de ferro, são os vagões do tipo gôndola, que possuem sua parte superior aberta, o que facilita seu manuseio durante as etapas de carga e descarga.

Embora este modelo para transporte de materiais granulados tenha boa fluidez e autonomia para trabalho em tempo seco, durante o período de chuvas pode ser encontrado um outro cenário. Os vagões do tipo gôndola por se tratarem de modelos

com a parte superior aberta, podem captar a água das chuvas, de modo que a umidade do material transportado impõe um aumento de peso e consequente acréscimo no consumo de combustível para o transporte, o que é totalmente indesejável. Além disso, impõe por vezes uma aderência do material transportado nas paredes do vagão, que não se desprendem no descarregamento dentro do virador de vagões, havendo então a necessidade de paradas inoportunas para desprendimento manual, que diminuem o fluxo e eficiência do transporte.

Nos materiais granulados, cada produto tende a possuir uma faixa de granulometria específica própria. Nestes, é possível se obter uma parcela de umidade natural, conhecida como coeficiente higroscópico, que fica contida no meio mesmo após dias de secagem ao ar livre. A água que compõe esta parcela de umidade, se intercala com moléculas de ar e preenchem os poros destes particulados aglomerados.

Esta condição de alta aderência e baixa permeabilidade afeta mais ativamente materiais coloidais do que nos solos mais arenosos. As composições coloidais podem ser definidas como compostos heterogêneos que olhados macroscopicamente se apresentam de forma homogênea. No caso de produtos extraídos do solo, os materiais coloidais se apresentam na presença de substância como a argila e húmus (USP, 2020).

Nos vagões que transportam minério de ferro, uma vez que ocorra a presença de água da chuva, esta passa a infiltrar no material, aumentando a carga que deve ser transportada nos vagões. Diversos são os fatores que determinam o modo no qual a água se movimenta através do particulado como: porosidade, rugosidade, umidade inicial, composição de matéria orgânica presente, o grau de agregação entre outros (PANACHUKI, 2003). Dentro desta perspectiva, podem ocorrer os cenários de saturação natural, para um caso específico de resíduo sólido: o aglomerado pode estar completamente preenchido com líquido ou a retenção superficial de umidade ocorre quando a capacidade de adsorção do particulado é menor que a velocidade de precipitação de água (USP, 2020).

Na ocorrência de algum destes cenários, caso não haja um sistema de captação e escoamento eficiente para este excesso de umidade, surge a formação de um acúmulo de água acima da carga, originando o que é conhecido como água livre. Sua presença não é desejável, pois além de aumentar o peso dos vagões e gerar impacto direto no consumo de diesel que alimenta as locomotivas, esta umidade

adicional acaba se misturando ao produto, trazendo assim uma série de barreiras operacionais. Estes efeitos serão posteriormente abordados nos modelos de força adesiva.

Além do aumento de custo no transporte, presença de água livre nos vagões dificulta também manuseio do material quando este chega ao seu destino. Primeiramente a camada excedente precisa passar por um processo de drenagem antes que possa ser feita a descarga do produto. Porém, com a umidade interna maior que a natural, o produto tende a se aglomerar em forma de blocos, causando grandes impactos nos equipamentos que os recebem durante a etapa de descarregamento e, também, a aderência de parte do material às paredes do vagão.

Quando isto ocorre, se faz necessária uma operação de desaglomeração do volume remanescente, para que o vagão possa ser reinserido numa segunda descarga. Não apenas o aumento de custo operacional, o retrabalho de material requer uma maior mão de obra envolvida e conseqüentemente um maior tempo de parada para uma mesma tara de carregamento em período seco, as chamadas horas perdidas na descarga.

Dependendo fundamentalmente das condições climáticas, a região de Carajás conta com um período de menor intensidade de chuvas, entre os meses de abril e setembro, e outro de maior intensidade, entre outubro e março. Contudo, apesar de apresentar uma distribuição de 6 meses para cada ciclo, o tempo em horas perdidas na descarga durante os períodos de maior chuva chega a ultrapassar em 10 vezes se comparada aos períodos de pouca incidência gerando assim um alto impacto de produção.

1.2 Problemática

O sistema viário da Vale para transporte de minério de ferro e carvão conta com diferentes modelos de vagão do tipo gôndola. Desde o início de transporte destes insumos, têm-se estudado maneiras de diminuir a umidade adicional dos produtos ocasionado pelo carregamento úmido ou período chuvoso.

Inicialmente, eram instalados na parte inferior dos vagões um tubo de aço como ilustrados na Figura 3 que cumpriam tal função, porém, contando com entupimentos constantes e um processo muito trabalhoso de manutenção do mesmo.

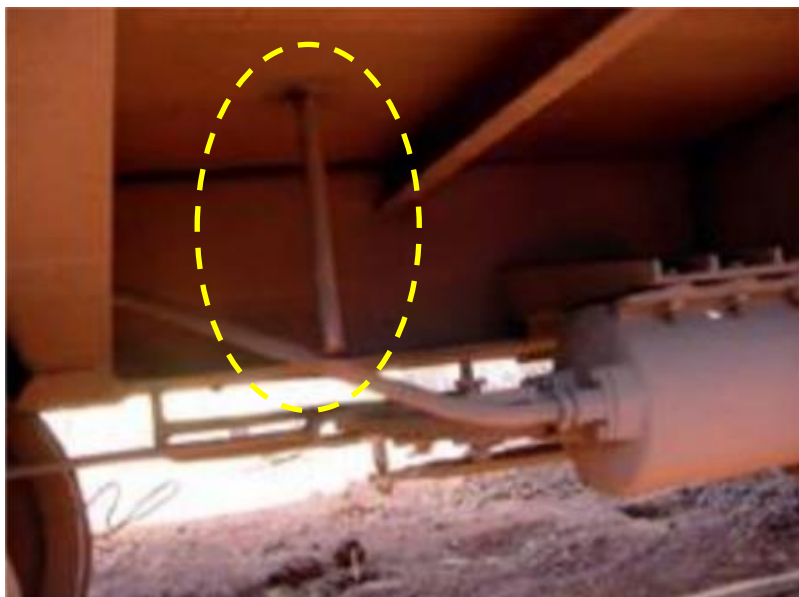


Figura 3 - Modelo de drenagem por tubos.
Fonte: Quites 2011 (Adaptado).

Posteriormente, estes tubos passaram a ser substituídos por modelos de dreno fabricados em poliuretano. Estes foram aplicados ao fundo dos vagões, porém, devido a facilidade de produção e baixo custo passaram a ser empregados também nas cabeceiras. Devido a diversidade de vagões tipo gôndola, com variação de tamanho, capacidade de carga e quantidade de reforços estruturais, estes apresentam variações na quantidade de drenos instalados, bem como a disposição de sua instalação devido a fatores de resistência estrutural, como apresentado na Figura 4.



Figura 4 - Diferentes modelos de vagão tipo gôndola e aplicação de drenos de poliuretano.
Fonte: Arquivo pessoal.

Após a instalação dos drenos na cabeceira, a eficiência de drenagem da

umidade e água livre presente nos vagões aumentou. Diferentes modelos e configurações geométricas foram sendo aplicadas e substituídas para estes drenos com o passar do tempo, visando adaptar sua funcionalidade, se adequando aos tipos de materiais transportados nos vagões. Contudo, estes novos modelos de dreno continuaram a apresentando entupimentos, necessitando de operações de limpeza ou eventuais trocas por falha mecânica.

Os drenos mostrados na Figura 5 apresentam um breve histórico de falhas em drenos utilizados em vagões gôndola GDU, cujos principais motivos de substituição se devem ao entupimento e falhas mecânicas. Os modelos apresentados possuem malha com variação de 0,4mm a 0,6mm de abertura de fresta.

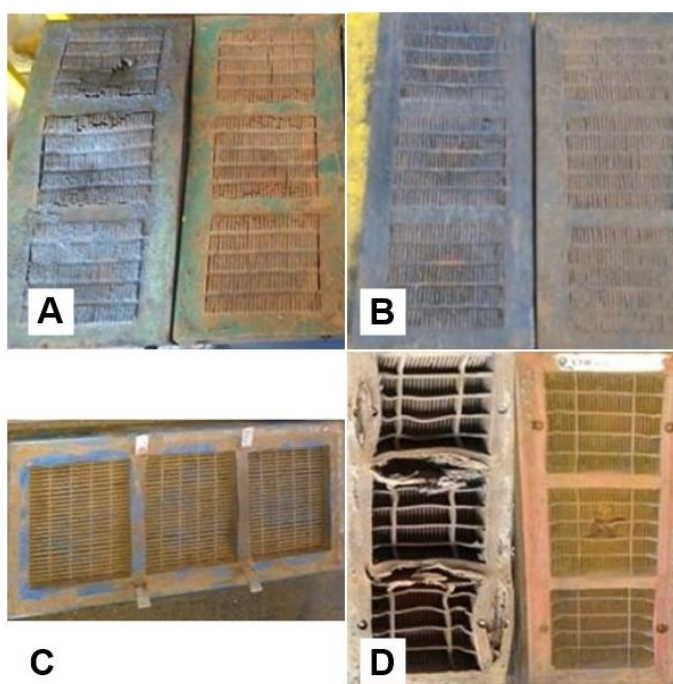


Figura 5 - Conjunto de drenos substituídos por entupimento (A, B e C) e falha mecânica (A e D).
Fonte: Vale, 2020.

Atualmente, existem novas propostas para ampliar a melhoria de efetividade no processo de drenagem dos vagões, com avaliações sobre a diferença de altura em relação à coluna de minério comumente carregada no vagão e a localização do dreno superior demonstrou que o mesmo mantinha uma coluna de água livre relativamente alta sobre o produto. Como ilustrado na Figura 6, reduzindo a altura de instalação do dreno superior da cabeceira em 110mm da posição de montagem atual, torna-se possível reduzir consideravelmente o volume de água livre suspensa sobre o carregamento de minério de ferro do vagão.

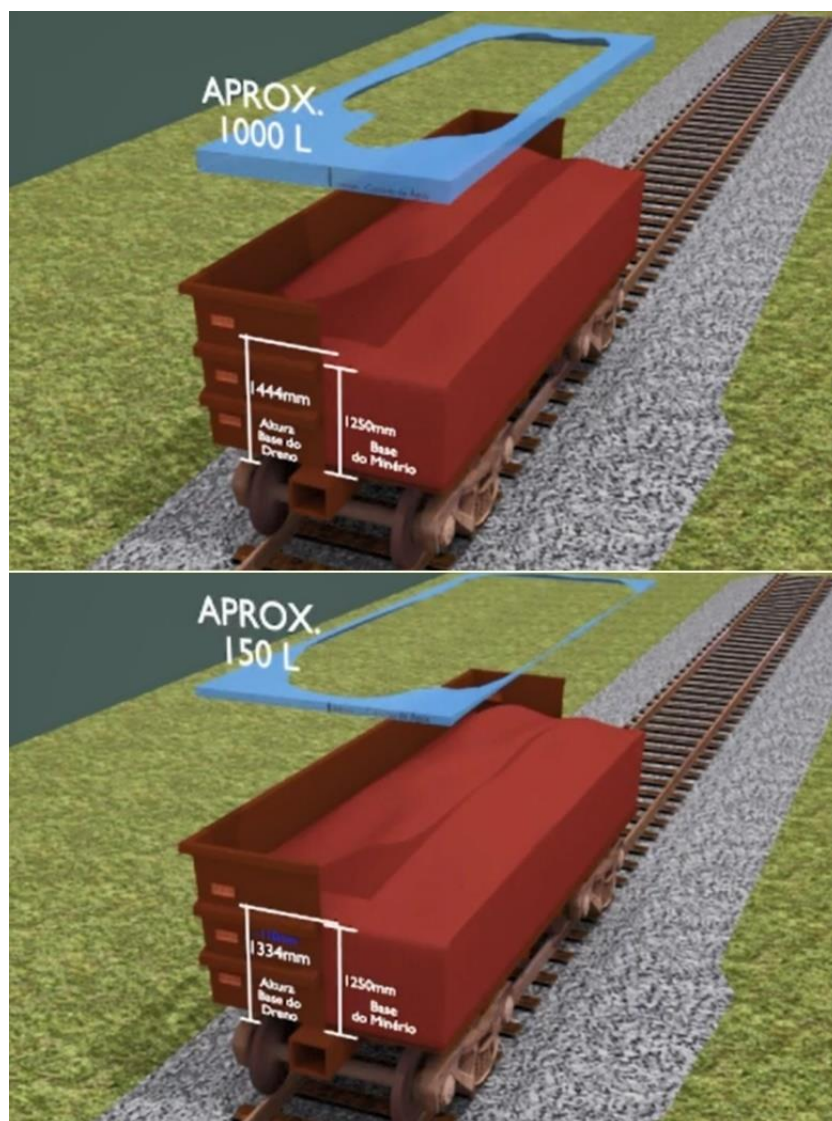


Figura 6 - Redução de água livre no vagão pela redução de altura de instalação do dreno superior da cabeceira.

Fonte: Vale 2020.

Como os efeitos propostos por essa premissa apresentaram redução significativa de água livre transportada nos vagões, existem modelos que já operam na Vale com as respectivas alterações de na montagem dos drenos. A Figura 7 ilustra um dos vagões modificados dentro de um pátio estacionário da Vale. Estes drenos são limitados pela altura da travessa de reforço da cabeceira e o nível de água depende da quantidade de carregamento. Portanto, é uma medida que pode ser considerada efetiva/paliativa, pois não vale para todo carregamento de minério.



Figura 7 - Vagão tipo gôndola com alterações na disposição de dreno.
Fonte: Vale, 2020.

Outra alteração de configuração utilizada atualmente pela Vale é o uso de drenos de superfície côncava. Essa alteração permite que a área da face em contato com o minério aumente e que se tenha uma maior área de escoamento, ampliando a eficiência de vazão de água nestes modelos em comparação aos drenos de superfície plana anteriores. É mostrada na Figura 8 a concavidade da face de contato de um dos modelos idealizados. Esse modelo recebeu um processo de adaptação de malha ao longo do tempo, sendo que primeiramente possuía abertura de fresta de 0,4mm, depois 0,6 mm 1mm e passando para uma abertura de 1,2 mm como visto na Figura 9. Isso ao longo do tempo foi testado empiricamente, a fim de se obter menos entupimento e maior drenagem.



Figura 8 - Modelo côncavo para maior área de contato.
Fonte: Vale, 2020.



Figura 9 - Dreno côncavo com abertura de malha 1,2mm.
Fonte: Arquivo pessoal.

Apesar de terem sido aplicadas modificações nos drenos e na estrutura dos vagões, a água livre se mantém como uma problemática, dificultando a devida operação do material durante as etapas de abastecimento, transporte e manuseio do minério de ferro nos vagões tipo gôndola. Este fenômeno se mantém recorrente, uma vez que apesar das alterações aplicadas e novos modelos de drenos utilizados, o entupimento destes componentes continua inviabiliza a drenagem adequada do excedente de água que se forma sobre o minério.

1.3 Fundamentação teórica

1.3.1 Critérios de adesão

A força de adesão é compreendida como a atração entre dois sólidos que estejam diretamente em contato. Este efeito é dado através de forças intermoleculares de curta distância, sendo as principais forças de Van der Waals, Eletrostática e Capilar

(Felicetti, 2004). A real influência exercida por estas forças depende fundamentalmente das condições do sistema, como propriedades físico-químicas destes materiais, pelo tamanho das partículas, rugosidade de superfície, formato das partículas, pressão de contato e umidade relativa do ar. Como definido por Stewart (1986), a força de adesão é composta pela somatória destas forças, conforme a (Eq. 1):

$$F_{ad} = F_{vdw} + F_e + F_c \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo,

F_{ad} a força de adesão;

F_{vdw} a força de Van der Waals;

F_e a força eletrostática e,

F_c a Força capilar

Em uma segunda abordagem, a força adesiva pode ser compreendida como uma força necessária para romper a ligação entre duas partículas. A abordagem inicialmente estudada por Bradley (1932), passou-se a compreender uma correlação entre a força e energia. Em seu estudo, criou uma teoria de adesão para partículas esféricas lisas e sólidas somadas as forças de Van der Waals, onde conclui que a força de adesão deve ser proporcional ao diâmetro das partículas e o trabalho de adesão, conforme a (Eq. 2).

$$F_{ad} = \frac{\pi W D}{2} \quad (\text{Eq. 2})$$

Em que,

D é o diâmetro da partícula e,

W é o trabalho de adesão.

Estudos posteriores buscaram melhorar a representatividade da equação encontrada por Bradley, adicionando o efeito de deformação elástica. Esta solução foi

encontrada por Johnson et al. (1971) que demonstra que a adesão em esferas de borracha pode ser mensurada pela deformação elástica no ponto de contato e a força de separação conforme a (Eq. 3):

$$F_{ad} = \frac{3\pi WD}{8} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo,

D o diâmetro da partícula e,

W o trabalho de adesão.

1.3.1.1 Forças de Van der Waals

As forças de Van der Waals se dão pela movimentação aleatória dos elétrons que cria cargas concentradas conhecidas por dipolos. A influência destes dipolos passa a se perder após alguns diâmetros moleculares (Ferreira, 2019). As forças de Van der Waals entre esferas de diferentes raios (Eq. 4), uma esfera e superfície (Eq. 5) e duas superfícies (Eq. 6) são descritas na Figura 10.

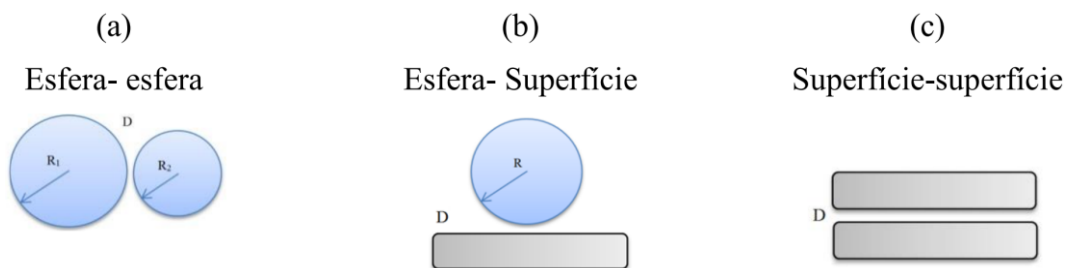


Figura 10 - Forças de Van der Waals em diferentes sistemas.
Fonte: PETEAN, 2014.

$$F_{(vdW)} = \frac{H}{6D^2} \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

$$F_{(vdW)} = \frac{HR}{6D^2} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$F_{(vdW)} = \frac{H}{12\mu D^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo,

H a constante de Hamaker, que depende de propriedades superficiais cujo valor é da ordem de $6 \cdot 10^{-20}$ e $150 \cdot 10^{-20}$ Nm;

D a distância de separação entre as superfícies;

R o raio da partícula.

1.3.1.2 Força eletrostática

Durante processos industriais, as partículas utilizadas nesses processos podem conter cargas elétricas, sejam estas provocadas por exposição a um campo elétrico ou pelo choque com outras partículas. As cargas presentes nessas partículas atraem cargas contrárias, formando a força eletrostática, que é descrita através da equação da Lei de Coulomb, conforme apresentado na (Eq. 7).

$$F_e = \frac{K_e |q_1 q_2|}{r^2} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo,

K_e a constante de proporcionalidade que depende do sistema de unidades utilizado

q_1 e q_2 a carga eletrostática das partículas

r a distância de separação entre cargas contrárias

A força eletrostática possui perdas de potencial de menor intensidade com aumento da distância entre as partículas em interação, quando comparada as forças de Van der Waals e as pontes líquidas. No entanto, segundo Rumpf (1977), a força eletrostática pode ter intensidade até dez vezes menor que a força de Van der Waals. Desta maneira, a força eletrostática atua auxiliando o contato e aglomeração das partículas, para que então forças como a de Van der Waals e capilar sejam melhor envolvidas.

1.3.1.3 Força capilar

A força capilar surge entre corpos hidrofílicos porosos que entram em contato. Essa porosidade pode influenciar na construção de pontes líquidas entre as superfícies e consequentemente formar uma massa líquida condensada para umidades superiores acima de 50% (Felicetti, 2004). A partir de umidades entre 65-75% as pontes líquidas passam a dominar as forças de adesão, onde a extensão desta depende dos parâmetros geométricos entre as partículas em contato (Rennie, 2018).

O'Brien e Hermann (1973) descrevem na (Eq. 8) um método para cálculo das forças capilares:

$$F_c = 2\pi r\gamma(\cos\theta_1 + \cos\theta_2) \quad (\text{Eq. 8})$$

Em que

r é o raio da partícula aderida

γ é a tensão superficial do líquido condensado

θ_1 e θ_2 são os ângulos de contato entre os dois corpos em contato e o líquido.

Posteriormente, apresentando considerações sobre a energia livre na interface sólido-líquido, Fischer e Israelchvili (1981) propuseram a (Eq. 9) para determinar a força de capilaridade:

$$F_c = 4\pi r\gamma\cos\theta + 4\pi r\gamma_{s1} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo

r o raio da partícula aderida

γ a tensão superficial do líquido condensado

γ_{s1} a energia livre interfacial sólido-líquido

θ_1 e θ_2 são os ângulos de contato entre os dois corpos em contato e o líquido.

1.3.2 Formação de pontes líquidas

A formação da ponte líquida em particulados não saturados tende a gerar uma

adesão de um filme d'água nos pontos de contato entre partículas devido às forças de tensão superficial do líquido (John, 1998). Esta região de contato forma uma película convexa de água, denominada menisco, que provoca uma força de compressão entre as partículas. A Figura 11 demonstra o efeito descrito no contato entre duas partículas esféricas sob este efeito (Rocky, 2020)

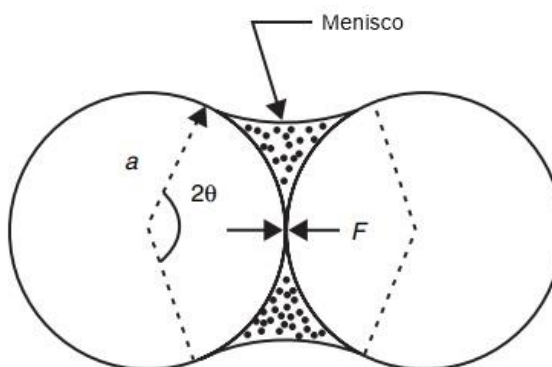


Figura 11 – Menisco formado entre partículas.
Fonte: Burland 2012

A quantidade de líquido adsorvido aos sólidos é medida pela saturação deste meio, que caracteriza o quão seco ou úmido se encontra o meio. À medida que a quantidade de líquido passa a aumentar, este começa a se dispersar por entre as partículas e atingir uma maior amplitude de contatos, dependendo fundamentalmente da molhabilidade do meio, ou seja, da capacidade que o material possui de adsorver o líquido (Kai, 2017). Com o aumento da saturação, as propriedades do meio começam a se modificar e ocorre a classificação deste meio como identificado na Figura 12. O aumento da presença de água entre os poros pode formar contatos de formato pendular, funicular, capilar e polpa.

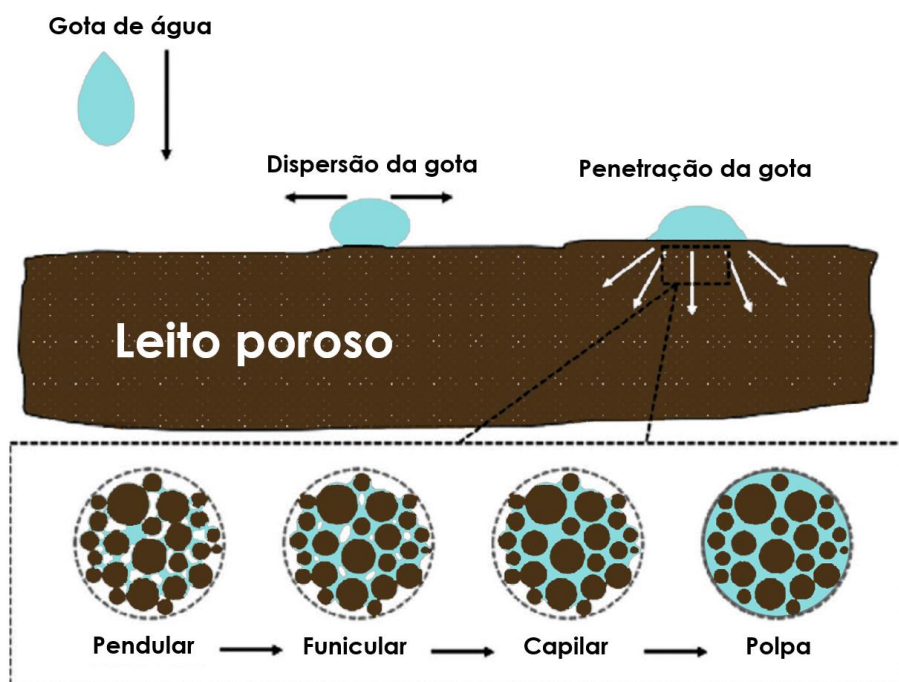


Figura 12 - Estados de saturação
Fonte: Kai, 2017. (Adaptado)

A força de atração causada pela ligação líquida pode ser até 50 vezes maior que as forças de Van der Waals em superfícies lisas, contudo a aspereza pode diminuir estes efeitos (Petean, 2014).

1.3.3 Granulometria

O processo de peneiramento por escalas granulométricas é um método de classificação de materiais particulados que leva em consideração o tamanho geométrico das mesmas. Este método é aplicado para materiais cujas partículas apresentam diâmetros entre 70mm e 0,040mm. No entanto, para partículas inferiores a 0,080mm o peneiramento se torna menos eficiente, sendo conveniente utilizar métodos de classificação. Estes processos consistem em métodos indiretos, que correlacionam a velocidade na qual estas partículas decantam em um fluido (GOMIDE, 1983).

A análise granulométrica consiste numa sequência de peneiras com aberturas cada vez menores em uma relação constante, tendo como principais escalas Tyler, Richards e ISO. As peneiras utilizadas nesta separação de sólidos são compostas por malhas que se cruzam ortogonalmente em seu interior, e o número que representa sua escala, indica a quantidade de aberturas que são obtidas dentro de uma polegada linear. Portanto, no peneiramento, à medida que a numeração das peneiras se eleva,

menores são as aberturas pelas quais as partículas podem atravessar. A principal variação nas escalas utilizadas para o peneiramento está na razão na qual estas aberturas variam entre si. O método de análise aplicado para peneiras vibratórias de tela se faz na utilização de impulsos rápidos de pequena amplitude – 1,5mm a 25mm – e alta frequência até 3600rpm. É demonstrado na Tabela 1 estas escalas e sua equivalência em diâmetro de abertura (Luz, 2010).

Tabela 1 - Escalas utilizadas para classificação granulométrica.

Escala Tyler r = $\sqrt{2}$ = 1,414 a _o = 0,074mm		Escala Richards r = $\sqrt[4]{2}$ = 1,19 = 1,0mm = 18 malhas			Escala ISO
Malhas	mm	Malhas	mm	polegadas	Malhas
3	6,680	3	6,35	0,250	3 ½
4	4,699	3 ½	5,66	0,223	
		4	4,77	0,187	
		5	4,00	0,157	5
6	3,327	6	3,36	0,132	7
8	2,362	7	2,83	0,111	
		8	2,38	0,0937	10
		10	2,00	0,0787	
10	1,651	12	1,68	0,0661	
14	1,168	14	1,41	0,0555	
		16	1,19	0,0469	
		18	1,00	0,0394	18 (Base)
20	0,833	20	0,841	0,0331	25
28	0,589	25	0,707	0,0278	
		30	0,585	0,0234	
		35	0,500	0,0197	
35	0,417	40	0,342	0,0165	45
48	0,295	45	0,354	0,0139	
		50	0,297	0,0117	
		60	0,250	0,0098	
65	0,208	70	0,210	0,0083	80
100	0,147	80	0,177	0,0070	
		100	0,149	0,0059	
		120	0,125	0,0049	
150	0,104	140	0,105	0,0041	170
200 (Base 0,074)		170	0,088	0,0035	
		200	0,074	0,0029	
		230	0,063	0,0025	
270	0,053	270	0,053	0,0021	325
400	0,038	325	0,044	0,0017	
		400	0,037	0,0015	

Um comparativo entre as escalas utilizadas na classificação destes sólidos é

apresentada na Figura 13. Cada faixa granulométrica possui características individuais, podendo o mesmo material fazer parte de uma ou mais classificações desta escala (Caputo, 1996).

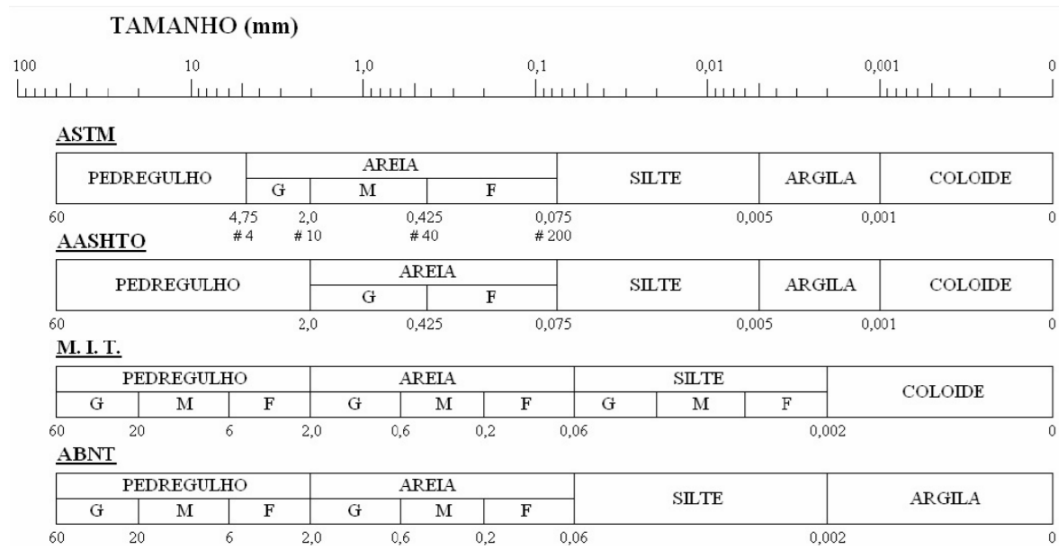


Figura 13 - Classificação granulométrica para materiais particulados.

O arranjo granulométrico dos materiais granulados, no entanto, não pode ser distribuído utilizando apenas uma média ponderada das dimensões de partículas encontradas no peneiramento. Se faz necessário, conhecer a frequência de distribuição dos sólidos dentro de cada intervalo granulométrico, para que então sejam consideradas as faixas de maior concentração. O diâmetro de Sauter é um dos métodos mais utilizados para cálculo desta distribuição, correlacionando o volume das partículas com a sua área superficial. Este cálculo resulta em um valor mais representativo do diâmetro médio para diferentes faixas granulométricas e pode ser calculado pela (Eq. 10).

$$D_{sa} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} \quad (\text{Eq. 10})$$

Em que

D_{sa} é o Diâmetro de Sauter [μm]

x_i é a fração mássica do intervalo

d_{pi} é o diâmetro médio entre peneiras

1.3.4 Propriedades físicas

O sistema particulado é composto de 3 fases: partículas sólidas, líquida e gasosa. Essa caracterização é bastante estudada na análise de solos e é empregada para avaliar as propriedades dos mesmos, uma vez que essas fases são variáveis e podem ser manipuláveis (Gonçalves, 2014).

1.3.4.1 Umidade

A umidade representa uma relação entre a massa líquida e massa sólida que compõe um sistema particulado. É expressa comumente em valores de porcentagem e pode ser definida na (Eq. 11).

$$w = \frac{M_a}{M_s} 100 \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo

W a umidade

m_a a massa de água [kg]

m_s a massa de sólido [kg]

1.3.4.2 Porosidade

A porosidade é uma medida que correlaciona o volume de vazios nos interstícios do sólido em relação ao volume total. Sua mensuração pode ser definida utilizando um fluido para preencher este volume. Esta pode ser definida pela (Eq. 12)

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_T} 100 \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que

ε é a porosidade

V_v é o volume de vazios [m³]

V_T é o volume total [m³]

1.3.4.3 Densidade aparente

A densidade aparente determina a massa específica de um material e o seu volume ocupado, considerando a porosidade das partículas e do meio. Esta pode ser descrita através da (Eq. 13).

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_p} \quad (\text{Eq. 13})$$

Sendo

ρ_p a densidade aparente [kg/m³]

V_p o volume de preenchimento [m³]

1.3.4.4 Concentração mássica

Esta relação apresenta o balanço mássico entre as frações de água e sólidos em relação à massa total do meio. Pode ser dada em relação à concentração mássica de água (Eq. 14) ou concentração mássica de sólidos (Eq. 15)

$$C_w = \frac{m_a}{m_s + m_a} 100 \quad (\text{Eq. 14})$$

$$C_s = \frac{m_s}{m_s + m_a} 100 \quad (\text{Eq. 15})$$

Em que

C_w é a concentração mássica de água

C_s é a concentração mássica de sólidos

1.4 Justificativa

A relevância deste tema reside na importância do minério de ferro como um dos principais insumos transportados através da malha ferroviária no Brasil. A falta de informações referentes à área de drenagem nos vagões acaba por acarretar problemas e custos secundários, tendo efeitos diretos na contaminação das malhas ferroviárias, maiores despesas com combustível, perda de eficiência no transporte e

manuseio do material e na necessidade de maior mão de obra para as operações de descarga do minério. Além destes cenários, há uma literatura carente na abordagem de condição de drenagem dos vagões, dificultando a exploração de novas alternativas para elaborar soluções nesta área.

1.5 Objetivo

1.5.3 Objetivo geral

O presente trabalho teve por objetivo desenvolver um método de estudo para os sistemas de drenagem de minério de ferro, através do desenvolvimento de uma bancada experimental que seja capaz de simular mutuamente a capacidade de percolação de água em minério e a drenagem por drenos com diferentes geometrias.

1.5.4 Objetivos secundários

De modo a atingir o objetivo deste trabalho, tiveram-se como objetivos específicos:

- a) A construção de uma bancada em escala reduzida para análises rápidas preliminares do comportamento da percolação e drenagem em diferentes tipos de minério e drenos;
- b) A produção de diferentes geometrias de drenos feitos em impressora 3D para avaliação da drenagem para os minérios de ferro em estudo.
- c) Caracterização física e avaliação da percolação de água e drenagem a partir dos minérios Sinter Feed, Pellet Feed, CFFZ e FCAL em escala reduzida.
- d) Construção de uma bancada piloto em escala ampliada capaz de realizar ensaios com drenos propriamente empregados em vagões de transporte de minério.
- e) Avaliação da percolação e drenagem de água nos minérios Sinter Feed, Pellet Feed, a partir da bancada piloto em escala ampliada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Algumas considerações precisam ser feitas inicialmente a este capítulo quanto à sequência do desenvolvimento desta dissertação.

- A avaliação da percolação e drenagem sempre foi feita com água e, quando da omissão no decorrer da dissertação do termo “água”, subentende-se que se trata de água.
- Para uma avaliação preliminar sobre a influência do tipo de minério usado, bem como da configuração de drenos sobre a percolação e drenagem, uma bancada em escala reduzida foi desenvolvida.
- Posteriormente, os ensaios passam a ser feitos em uma bancada piloto, que é maior e que foi construída em aço semelhante ao empregado na construção de vagões de transporte destes tipos de minérios.
- Os minérios disponíveis em grande quantidade para emprego na bancada de testes piloto foram o Sínter Feed e Pellet Feed. Para a bancada reduzida, além destes dois, os minérios CFFZ e FCAL também estavam disponíveis.

2.1 Bancada reduzida

Para realização de testes preliminares, uma bancada foi construída em acrílico, possibilitando a visualização do perfil de escoamento da água durante o processo de percolação e drenagem.

A bancada contava com um reservatório para a massa de minério e possui seção interna quadrada de 80mm de lado e 500mm de altura. Possuía um flange parafusado na sua extremidade inferior para acoplamento de drenos intercambiáveis, contendo uma borracha para vedação conforme detalhado na Figura 14.

Após a inserção de minério dentro deste reservatório, uma massa padronizada de 1000g de água é adicionada para o estudo da percolação e drenagem por um dispositivo amortecedor, conforme apresentado na Figura 15. Este processo de amortecimento da queda pela ação da força gravitacional é necessário para evitar jatos de água, eliminando uma agitação excessiva na superfície das amostras e reduzindo a formação de canais preferenciais nas paredes do reservatório. Este dispositivo amortecedor se desloca verticalmente para cima, dentro do reservatório de minério, até a total inserção de massa de água, mantendo distância de 40mm da

superfície da coluna de minério. Logo após, é removido.

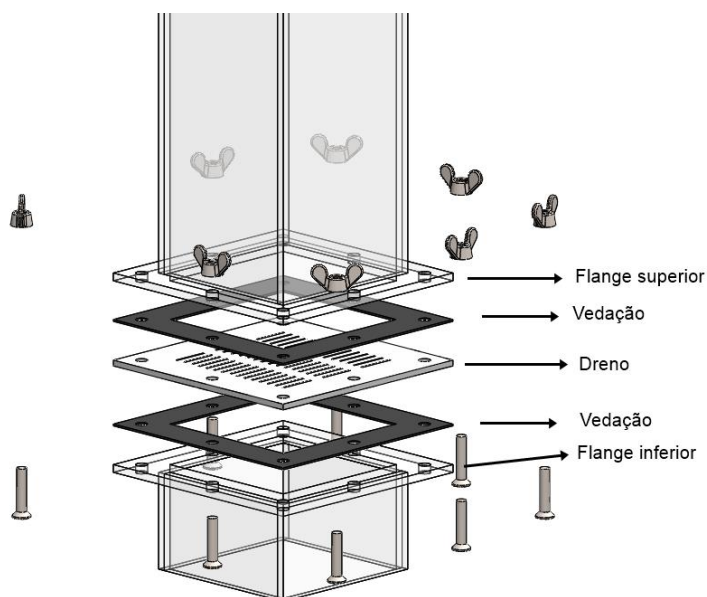


Figura 14 – Detalhamento de fixação dos drenos ao dispositivo.

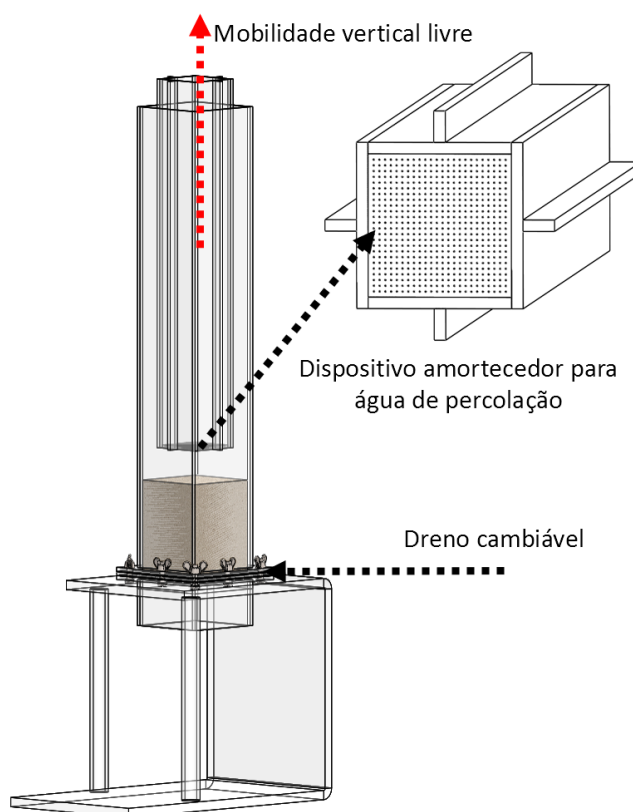


Figura 15 - Dispositivo de ensaio com amortecedor de água.

Os drenos para este dispositivo foram modelados em software 3D, padronizando-se uma geometria constituída de 45 frestas com 20mm de largura cada,

como mostrado nas Figura 16 e Figura 17, possuindo variações de espessura de acordo com o modelo estudo evidenciados na Tabela 2. Estas geometrias foram elaboradas a partir de dimensões observadas para os drenos empregados nos vagões. Os drenos utilizados neste equipamento receberam duas variações principais: drenos com frestas de seção constante – denominados de drenos retos – e drenos cuja espessura de fresta aumenta no sentido da profundidade do dreno – denominados de drenos trapezoidais – como identificados na Figura 17.

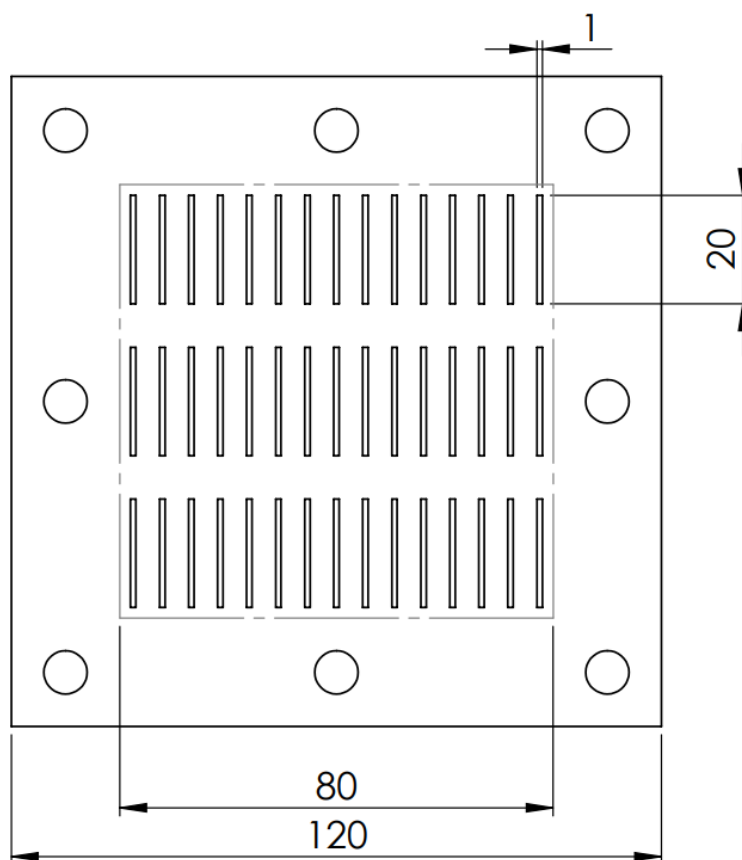


Figura 16 - Configuração de dreno utilizada para bancada reduzida.

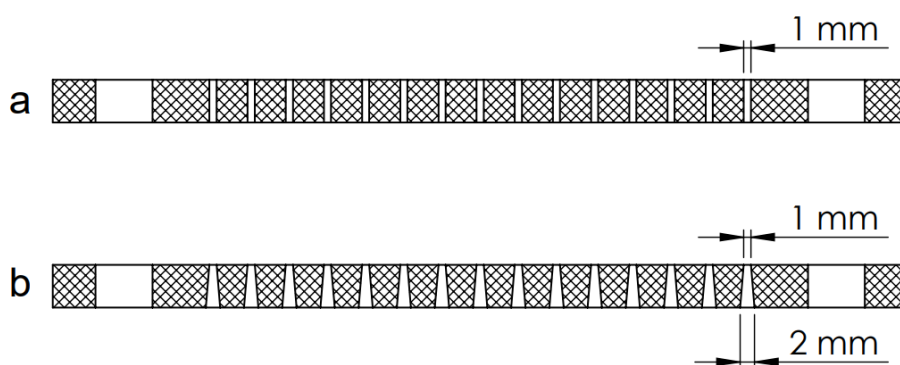


Figura 17 – Dreno: a) seção reta e b) seção trapezoidal.

Tabela 2 – Espessuras padrão para drenos impressos.

Drenos retos	Drenos trapezoidais	
Abertura	Abertura superior	Abertura inferior
0,6 mm	0,6 mm	2,0 mm
1,0 mm	1,0 mm	2,0 mm
1,5 mm		
2,0 mm		
2,5 mm		

Estes modelos são produzidos através de uma impressora 3D GTmax H5 utilizando ABS como matéria prima, evidenciada na Figura 18. O dispositivo de ensaio possui também uma base de acrílico que permite o posicionamento de um béquer para coleta de resíduos – água e finos de minério – que atravessem os drenos durante a execução do ensaio, ilustrado na Figura 19



Figura 18 - Impressora 3D para confecção de drenos.

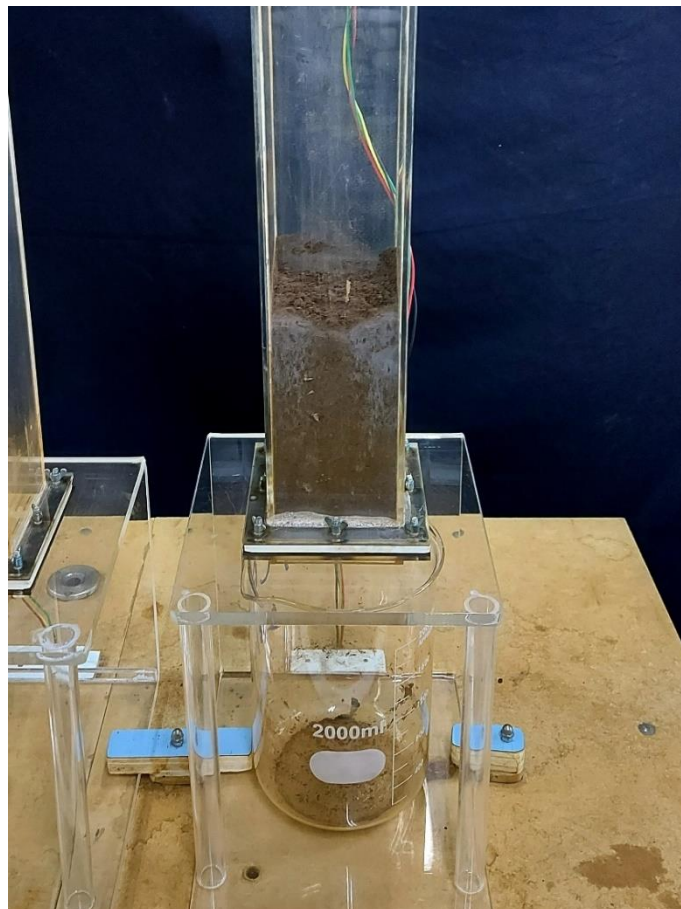


Figura 19 – Base da estrutura com espaço para béquer de coleta.

Buscando simular a vibração a qual os vagões de minérios são submetidos durante o transporte ferroviário entre a mina de extração e o porto, foi elaborado um componente excêntrico acoplado a um motor de 12V em corrente contínua. Este mecanismo, quando acionado, erguia uma massa de 930 gramas a uma altura de 30mm – regulável entre 1mm e 45mm –, produzindo impactos contra a mesa. A bancada que sustenta este dispositivo de ensaio possuía estrutura metálica com tampo de madeira, fazendo com que a vibração produzida pelo impacto desta massa seja transmitida ao dispositivo de ensaio. O posicionamento de atuação do excêntrico idealizado continha uma folga em relação ao eixo do motor, prevenindo danos ao mesmo como é verificado na Figura 20.

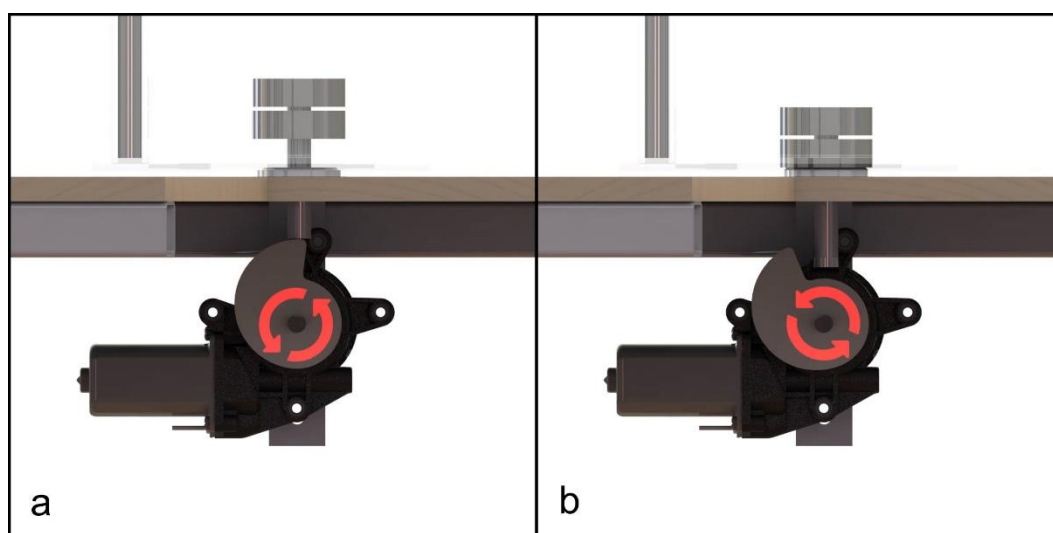


Figura 20 - Mecanismo elaborado para vibração automatizada.

Um sistema com sensores ultrassônicos acoplados a um controlador eletrônico permitiu a coleta dinâmica da altura da coluna de água sobre a coluna de minério durante a execução dos ensaios. Os dados obtidos pelos sensores eram armazenados em uma planilha e exportados diretamente em um cartão SD, permitindo a transferência direta para um computador para refino das leituras obtidas. A configuração dos sensores pode ser vista na Figura 21.

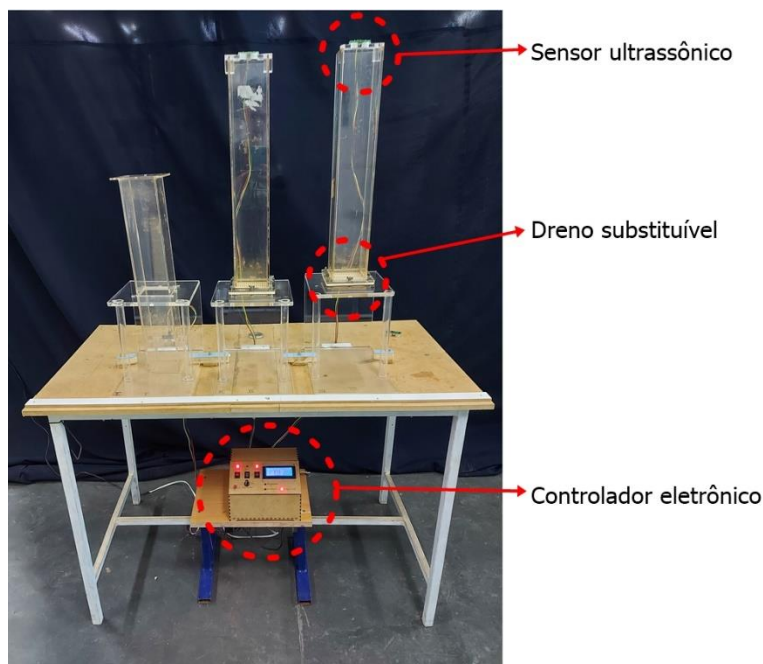


Figura 21 - Encapsulamento e automação da bancada reduzida.

2.2 Bancada piloto

A bancada piloto, foi originada para reproduzir uma escala ampliada dos ensaios realizados na bancada reduzida. Esta nova bancada visa proporcionar maior semelhança e proximidade com as dimensões e escala real que ocorre na via férrea durante o transporte de minério. Esta bancada permitiu o emprego de drenos usados na cabeceira e assoalho de vagões abertos do tipo gôndola e sua configuração possuía os elementos indicados na Figura 22. Sua estrutura foi dividida em dois módulos acopláveis e era preparada para atender a ensaios contínuos ou intermitentes, tendo uma configuração de fácil manuseio dos materiais e amostras como é visto na Figura 23. Sua configuração parte de uma adaptação direta da bancada reduzida, tendo como principais adaptações:

- a) O tanque de ensaio agora é construído em aço inox, em geometria retangular para uso dos de cabeceiras e fundo de vagão;
- b) O conjunto de alimentação e amortização de água é representado pelos tanques pulmão e de alimentação, juntos ao distribuidor;
- c) O conjunto de coleta na bancada piloto conta com um tanque de coleta, cujas válvulas permitem realizar a coleta externa do material passante pelos drenos ou deposição direta para o tanque pulmão.

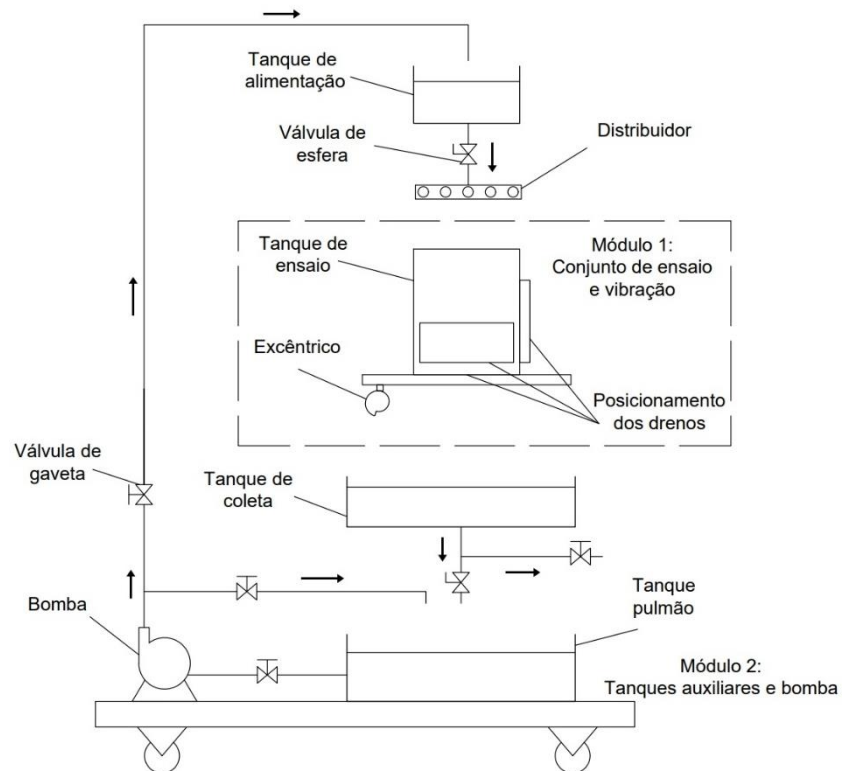


Figura 22 - Idealização de bancada experimental para avaliação rápida de etupimento de drenos.



Figura 23 - Bancada piloto para ensaios de dreno: a) Vista frontal e b) Vista posterior.

2.2.1 Conjunto de ensaio e vibração

O primeiro módulo da bancada era composto por uma bancada confeccionada em aço SAE 1020 sobre rodízios. Sob esta, utilizou-se uma chapa de 3/8" para sustentar o tanque de ensaio como mostra a Figura 24 e fixar o motor e mecanismo excêntrico de vibração como visto na Figura 25.



Figura 24 - Módulo de drenagem para bancada piloto.



Figura 25 - Mecanismo de vibração para bancada piloto.

2.2.2 Tanque de ensaio

O tanque de ensaio possui dimensões de 300mm x 255mm x 500mm e era composto por chapas de aço AISI 304 com 2,5mm de espessura. O tanque foi mantido apoiado na bancada dentro de uma esquadria feita para limitação de sua movimentação durante os ensaios. Nele, foram recortadas 3 cavidades com as dimensões de 275mm x 125mm correspondente aos drenos.

Quadros com 30mm de altura foram confeccionados e soldados aos recortes para encaixe dos drenos de modo que estes estejam faceados às paredes internas do tanque. Como medida protetiva e melhora da estanqueidade da região soldada, fez-se a aplicação de impermeabilizante Vedacit Vedapren no interior dos quadros, ajustando uma maior aderência dos elementos de vedação junto às paredes internas do quadro como é registrado na Figura 26(a).

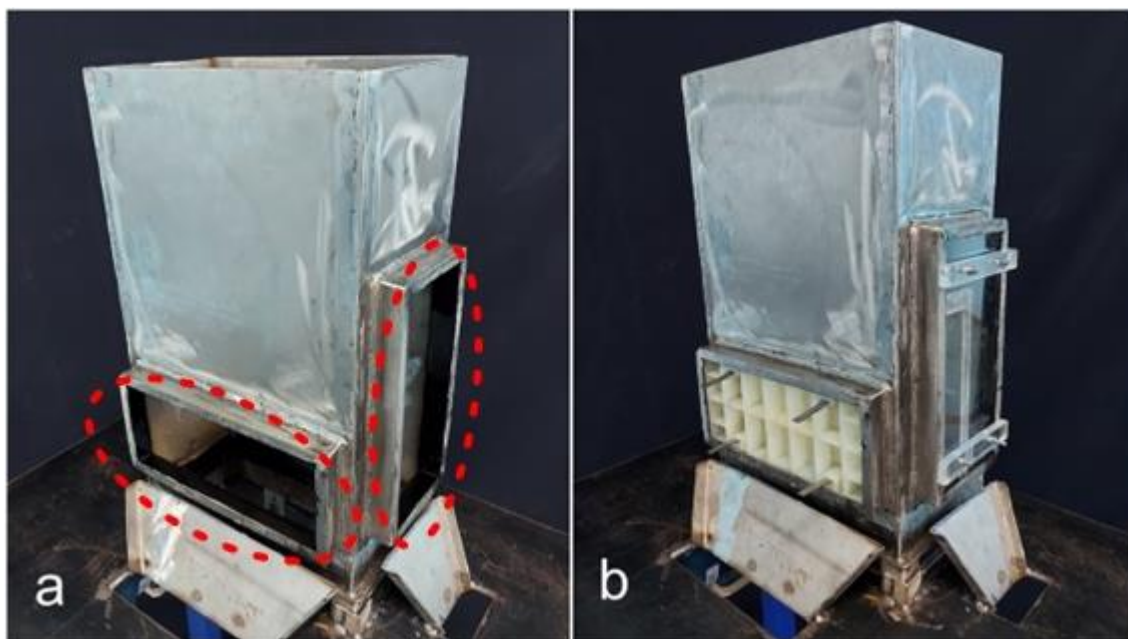


Figura 26 - (a) Tanque de ensaio com impermeabilizante e (b) instalação de dreno e flange de vedação.

Visando a realização dos ensaios de maneira individual, foram confeccionados flanges em acrílico para selar os quadros que não estarão em estudo no momento. Sua fixação foi feita através uma trava parafusada pelo lado externo do tanque como visto na Figura 26(b).

2.2.3 Mecanismo de vibração

O mecanismo de vibração adotado para a bancada piloto era levemente diferente do escolhido para a bancada em menor escala. Um sistema de alavancas sustentava uma massa de 2,32kg que era erguida em 35mm por um disco excêntrico acoplado a um motor de 1cv. Na extremidade oposta, um pino batedor foi posicionado em repouso na face de fundo do tanque de ensaio, de modo que a cada movimentação do peso, o punção realizava um impacto direto ao tanque.

O disco excêntrico confeccionado possuía diferentes calibragens de altura podendo também alternar a massa utilizada. Uma representação deste mecanismo pode ser vista na Figura 27.

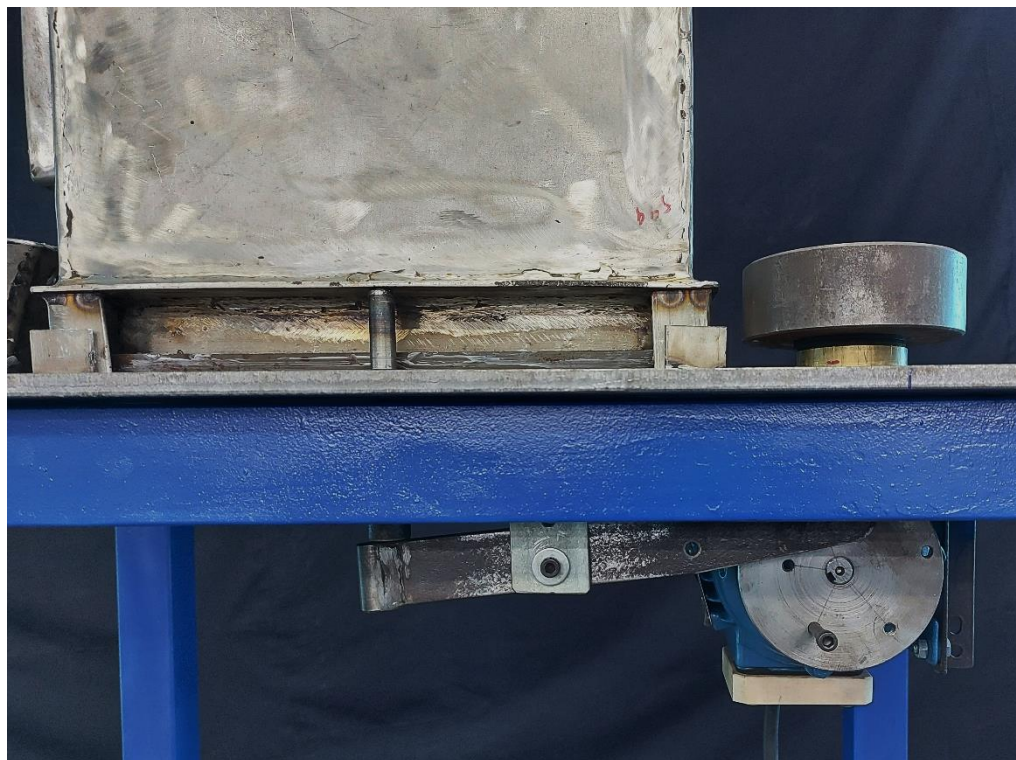


Figura 27 - Mecanismo de vibração para bancada piloto.

2.2.4 Conjunto de tanques auxiliares e bomba

O segundo módulo da bancada piloto era composto por uma estrutura em aço SAE 1020 responsável por agrupar o conjunto de tanques, bomba, tubulação e painel elétrico da unidade como apresentado na Figura 28. Esta configuração permitiu que o deslocamento deste módulo não exigisse a desconexão das tubulações ou isolamento da bomba, minimizando danos e garantindo a preservação dos componentes.



Figura 28 – Módulo de componentes hidráulicos.

O tanque pulmão localizado na base do equipamento operou como reservatório de abastecimento da bomba, que enviava a água ao tanque de alimentação situado no topo da estrutura. O distribuidor confeccionado em tubos de $\frac{3}{4}$ ", alimentava a água de percolação como um simulador de chuvas, diminuindo o impacto contra o particulado e minimizando a formação de canais preferenciais de escoamento.

O tanque de coleta situado na parte inferior da estrutura, acima do tanque pulmão, possuía seu fundo abaulado de modo a facilitar a deposição das partículas para coleta externa. Duas válvulas de esfera faziam o controle de recirculação de água – saída inferior – ou coleta de amostra para ensaio intermitente – saída lateral – como é observado na Figura 29.



Figura 29 - Tanque de coleta com subdivisão de coleta.

2.2.5 Dispositivo de tombamento do tanque de ensaio

Visando facilitar a remoção do minério após ensaio, foi desenvolvido um dispositivo para auxiliar no tombamento do tanque de ensaio, como ilustrado na Figura 30. Devido à carga total de ensaio, de aproximadamente 80kg para o minério de maior massa específica 100% saturado e com a máxima coluna de água possível neste tanque de prova, este foi confeccionado em aço SAE 1020 e pode ser acoplado e removido do equipamento de maneira independente. A altura máxima de levantamento era de 120mm, para rotação e travamento do equipamento.



Figura 30 - Dispositivo de levantamento do tanque de ensaio.

2.3 Métodos

Para padronização do modelo de ensaio, foi constituído um roteiro de ensaio para inserir a reprodutibilidade e equivalência dos experimentos em ambas as bancadas. Os ensaios referentes à granulometria, densidade aparente e controle de saturação foram empregados para levantamento de informações quantitativas dos minérios, não sendo repetidos antes de cada ensaio de drenagem.

2.3.1 Secagem

A secagem é uma etapa importante do processo de avaliação e ensaios, uma vez que permite manipular de forma coerente o controle de umidade e operação. Os minérios foram levados para uma estufa com temperatura de 110°C por um período de 24 horas para redução de sua umidade residual e levadas para um novo período de 4 horas de secagem para nova pesagem. O material é avaliado tendo baixa umidade após não apresentar variação de massa entre as etapas de secagem. Após

este período, as amostras são utilizadas para a realização dos estudos de granulometria, densidade aparente e ponto de saturação. Após estas qualificações, os minérios secos em estufa são armazenados em tambores até o momento do ensaio de utilização nos ensaios de percolação e drenagem.

2.3.2 Granulometria

Uma amostra de 3 kg é coletada aleatoriamente dentre o material de estudo e separada em 10 amostras de 300g. Cada grupo de amostras deve passar por um sequenciamento de peneiras permanecendo em vibração por 15 minutos no agitador de peneiras a 1000rpm. Os valores de massa retidos por cada peneira são coletados, permitindo conhecer a distribuição granulométrica dos minérios e o diâmetro de Sauter, determinando o diâmetro médio para estes materiais segundo a Equação 7 no capítulo anterior. O sistema de agitador de bandejas utilizado pode ser visto na Figura 31.



Figura 31 - Agitador de bandejas.

2.3.3 Densidade Aparente

Utilizando de um tubo cilíndrico com diâmetro interno de 43,43mm, é inserida

uma amostra de minério de massa conhecida. Após deposição do material, o tubo é submetido a um ciclo de vibração, onde foi adotado como padronização do ensaio uma série de 40 impactos com queda de 50mm para acomodação e compactação da amostra dentro dele. Na sequência, utilizando uma escala para determinar a altura final do minério compactado como identificado na Figura 32, correlaciona-se a massa de material com o volume do recipiente para determinação da densidade aparente do minério.

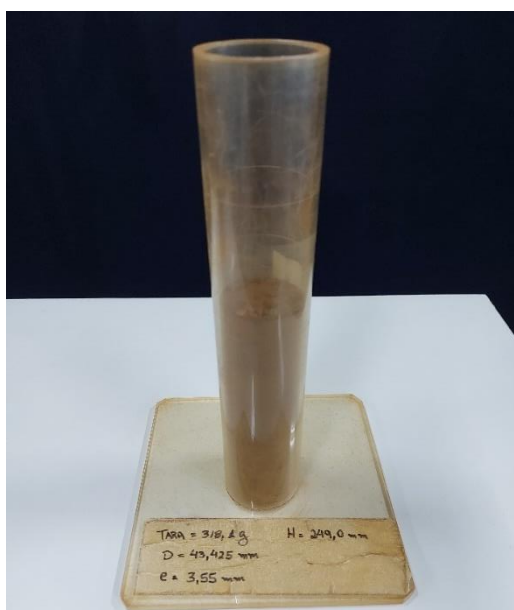


Figura 32 - Ensaio de densidade aparente.

Apesar da amostra não se tornar inteiramente sólida e ainda possuir pequenos poros entre as partículas, esta propriedade permite calcular a massa de minério referente a cada ensaio.

2.3.4 Controle de saturação

Uma massa padrão de água, insere-se no tubo cilíndrico de diâmetro interno de aproximadamente 43mm (Figura 33a). Em seguida, insere-se uma amostra de minério até que sua altura coincida com a altura de água, eliminando o filme d'água que se mantém acima do minério. O conjunto é então agitado em uma sequência de 40 impactos com queda vertical de 40mm e deixado em repouso por 5 minutos para decantação da mistura. O dispositivo é levado a uma balança para determinar a massa de minério acrescida e o processo é repetido. Este ensaio se conclui quando, após

passados os 5 minutos de decantação, não haja nova formação de filme d'água sobre o minério (Figura 33b).

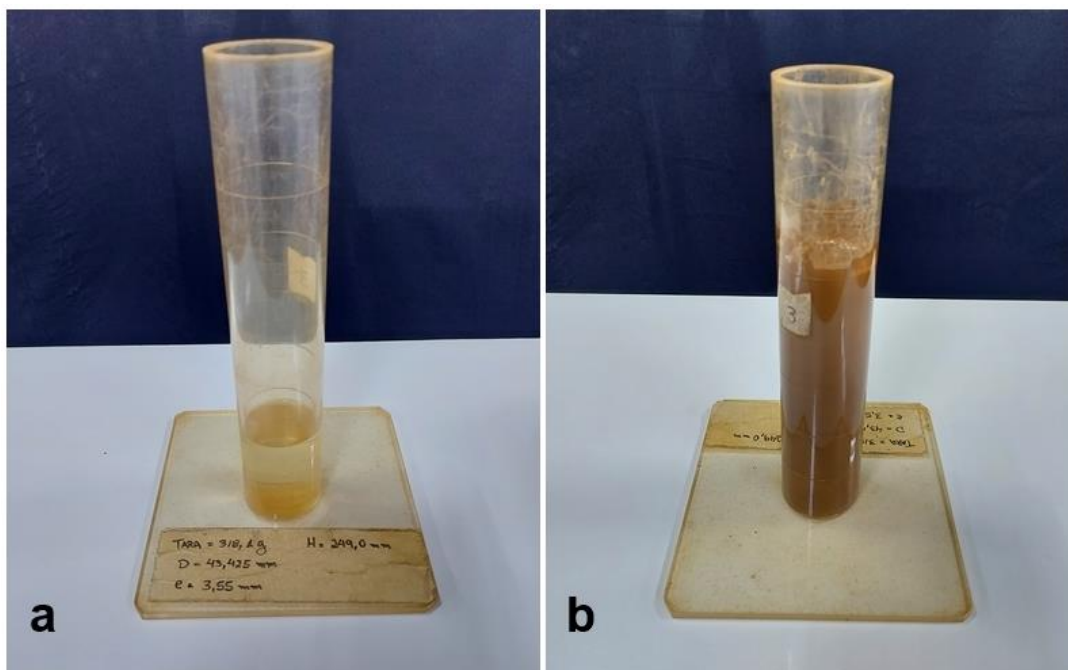


Figura 33 - Ensaio de controle de saturação: a) fase inicial e b) fase final

2.3.5 Preparação do ensaio

O minério seco que está armazenado nos tambores passa por uma mistura inicial com água para realizar um controle em sua saturação. Foi adotada como padrão para os ensaios uma mistura com 40% de saturação para os minérios de ferro, uma vez que essa faixa de umidade apresenta menores tempos de percolação assim como melhor maneabilidade da amostra. A mistura é feita de maneira manual com pequenas massas até que seja englobada toda a amostra, visando homogeneizar a distribuição de umidade pela amostra como visto na Figura 34. As massas de minério e água utilizadas por cada bancada de ensaio são referenciadas na Tabela 3.

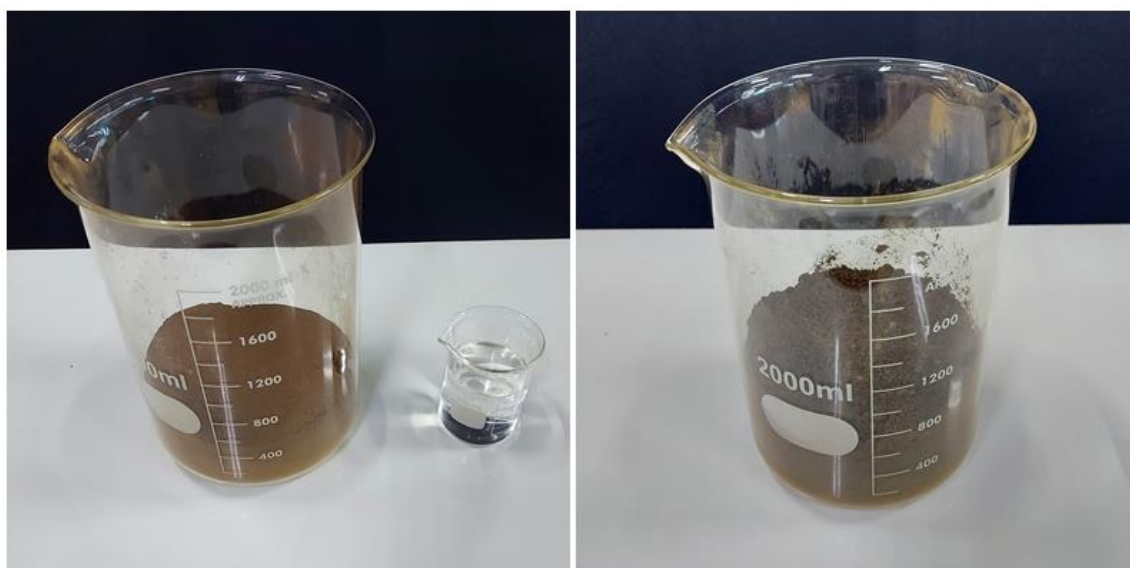


Figura 34 - Preparação de mistura inicial de Sinter Feed

Tabela 3 - Massas de minério e água para mistura com saturação 40%.

Controle de saturação inicial das amostras de minério de ferro				
	Bancada reduzida		Bancada piloto	
Minério	Massa de minério [kg]	Massa de água [kg]	Massa de minério [kg]	Massa de água [kg]
Sinter Feed	1,300	0,0743	30,0	1,714
Pellet Feed	1,500	0,080	36,0	1,920
CFFZ	1,300	0,0636	—	—
FCAL	1,500	0,0517	—	—

Devido à presença de particulados mais grosseiros presentes no Sinter Feed, CFFZ e FCAL, as amostras utilizando estes minérios na bancada reduzida apresentaram canais preferenciais durante a realização dos ensaios como mostrado na Figura 35. Segundo McCabe (2005), para que não ocorram canais preferenciais nas paredes de torres de resfriamento (de modo análogo ao observado nesta pesquisa), deve-se obedecer a uma relação expressa em que o diâmetro do maior recheio seja, no mínimo, 8 vezes inferior ao diâmetro efetivo do canal de passagem.

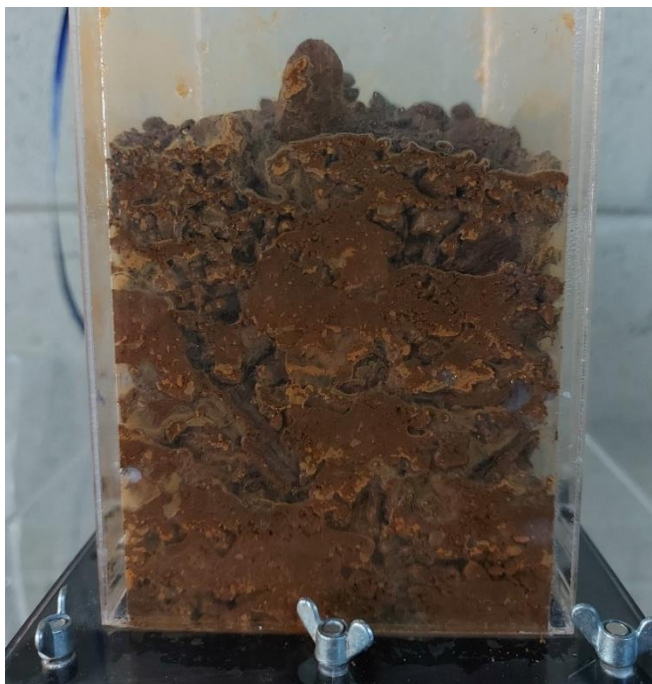


Figura 35 - Formação de canal preferencial em particulados grosseiros

Utilizando desta referência, executa-se um peneiramento Tyler Mesh 5 com abertura de 4mm como indicado na Figura 36, obedecendo assim esta relação para os ensaios realizados com estes minérios na bancada reduzida. Já para o Pellet Feed, uma vez que suas maiores partículas atendem a relação descrita por McCabe, não houve necessidade deste peneiramento prévio.



Figura 36 - Amostra de particulado retido em Mesh 5 para Sínter Feed.

Após realizadas as etapas de preparação da amostra, o tanque de ensaio é montado utilizando o dreno e posição de estudo desejadas, fazendo o uso de quadros de borracha como elementos de vedação do sistema. Com isto, a amostra em estudo com 40% de saturação é inserida no tanque de ensaio por altura de queda constante, mantendo-se a 500 mm da pilha de minério (Figura 37a). Nesta etapa é coletada a altura inicial a qual o particulado ocupa no tanque

Com a montagem do dispositivo contendo o dreno e a amostra de minério com saturação controlada, o conjunto está preparado para o início do ensaio. Esta etapa é feita com a introdução de uma segunda amostra de água, que é responsável por efetivamente originar a camada de água livre sobre o meio, percolar a amostra de minério e posteriormente passar pelo processo de drenagem e ser transferida para o reservatório de coleta (Figura 37b e Figura 37c). As massas de água que são utilizadas para o início do ensaio para realizar a etapa de percolação, são destacadas na Tabela 4. Caso o ensaio seja realizado com vibração, a mesma deve ser acionada simultaneamente à inserção de água e mantida ao longo de todo o experimento.

Tabela 4 - Massa de percolação de água para realização dos ensaios.

Bancada	Massa de água de percolação [kg]
Reduzida	1
Piloto	12

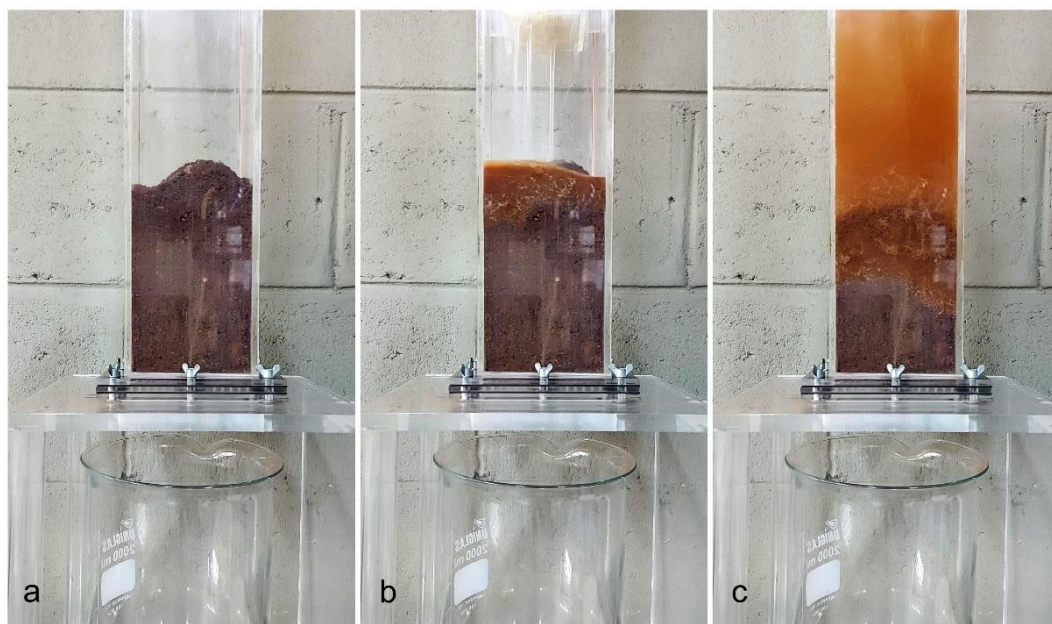


Figura 37 - Etapas de ensaio: (a) Acomodação do minério; (b) Adição de água com dispositivo amortecedor; (c) Ensaio em execução.

Durante a execução do ensaio, são observados aspectos como a altura de água sobre o minério ao longo de seu escoamento, a condição de entupimento dos drenos e a quantidade de material passante pelas frestas.

2.3.6 Finalização dos ensaios

Após a execução do ensaio, são avaliadas a altura final da pilha de minério, que ajudará a avaliar a redução da coluna de minério em relação à condição inicial de ensaio, o estado de limpeza dos drenos e se ocorre a formação de uma torta na amostra de minério – condição em que a pressão de coluna de água sobre o minério gera do meio gera compactação do particulado, reduzindo a porosidade e modificando o padrão de escoamento da água –. Após as devidas análises e coleta de dados, os materiais são encaminhados novamente à estufa para um novo ciclo de secagem e utilização.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Granulometria

Os ensaios elaborados utilizaram séries de peneira Tyler com 200mm de diâmetro interno em uma mesa vibratória por motor excêntrico com rotação de 1000rpm durante 15 minutos. As Tabela 5 a Tabela 7 descrevem a distribuição granulométrica para os minérios estudados: Sínter Feed, Pellet Feed, CFFZ e FCAL.

Tabela 5 – Granulometria de amostras Sínter Feed.

Mesh	Abertura da Peneira [mm]	Dm [mm]	Massa Minério [g]	Fração Mássica	ϕ_a
7	2,83	3,145	145,700	0,049	0,049
9	2	2,415	264,300	0,088	0,137
12	1,41	1,705	233,430	0,078	0,215
16	1	1,205	175,480	0,059	0,273
32	0,5	0,750	361,280	0,121	0,394
42	0,354	0,427	112,020	0,037	0,431
50	0,297	0,326	40,050	0,013	0,445
60	0,25	0,274	152,490	0,051	0,496
70	0,21	0,230	52,340	0,017	0,513
100	0,149	0,180	224,240	0,075	0,588
140	0,105	0,127	288,530	0,096	0,684
200	0,074	0,090	323,560	0,108	0,792
325	0,044	0,059	459,230	0,153	0,946
450	0,032	0,038	74,840	0,025	0,971
Bandeja	—	—	87,780	0,029	1,000
Total	—	—	2995,27	1	—

Tabela 6 - Granulometria de amostras Pellet Feed.

Mesh	Abertura da Peneira [mm]	D [mm]	Massa Minério [g]	Fração Mássica	ϕ_a
50	0,297	—	33,02	0,011	0,011
60	0,25	0,274	26,64	0,009	0,020
70	0,21	0,23	22,71	0,008	0,027
100	0,149	0,1795	183,27	0,061	0,088
140	0,105	0,127	337,66	0,112	0,201
200	0,074	0,0895	613,13	0,204	0,405
325	0,044	0,059	864,51	0,288	0,693
450	0,032	0,038	385,82	0,128	0,821
Bandeja	—	—	537,43	0,179	1,000
Total	—	—	3004,19	1	—

Tabela 7 - Granulometria de amostras CFFZ

Mesh	Abertura da Peneira [mm]	D [mm]	Massa Minério [g]	Fração Mássica	ϕ_a
5	4	4	802,96	0,266	0,266
7	2,83	3,415	152,12	0,050	0,316
9	2	2,415	142,8	0,047	0,364
12	1,41	1,705	152,33	0,050	0,414
16	1	1,205	124	0,041	0,455
32	0,5	0,75	352,44	0,117	0,572
42	0,354	0,427	179,34	0,059	0,631
50	0,297	0,3255	58,08	0,019	0,651
60	0,25	0,2735	182,83	0,061	0,711
70	0,21	0,23	63,33	0,021	0,732
100	0,149	0,1795	211,58	0,070	0,802
140	0,105	0,127	137,82	0,046	0,848
200	0,074	0,0895	134,9	0,045	0,893
325	0,044	0,059	163,01	0,054	0,947
450	0,032	0,038	90,12	0,030	0,977
Bandeja	—	—	70,55	0,023	1,000
Total	—	—	3018,21	1	—

Tabela 8 - Granulometria de amostras FCAL

Mesh	Abertura da Peneira [mm]	D [mm]	Massa Minério [g]	Fração Mássica	ϕ_a
5	4	4	369,59	0,122	0,122
7	2,83	3,415	101,71	0,034	0,156
9	2	2,415	84,67	0,028	0,184
12	1,41	1,705	88,19	0,029	0,213
16	1	1,205	75,83	0,025	0,238
32	0,5	0,75	231,67	0,077	0,315
42	0,354	0,427	110,57	0,037	0,352
50	0,297	0,3255	42,06	0,014	0,366
60	0,25	0,2735	135,77	0,045	0,411
70	0,21	0,23	68,69	0,023	0,433
100	0,149	0,1795	228,75	0,076	0,509
140	0,105	0,127	212,38	0,070	0,579
200	0,074	0,0895	262,05	0,087	0,666
325	0,044	0,059	495,96	0,164	0,830
450	0,032	0,038	238,73	0,079	0,909
Bandeja	—	—	273,66	0,091	1,000
Total	—	—	3020,28	1	—

Com o diâmetro médio entre peneiras e a porcentagem passante total (Φ_a) em cada peneira, é possível montar o gráfico elucidado na Figura 38, que compõe a curva

granulométrica para os minérios de ferro estudados.

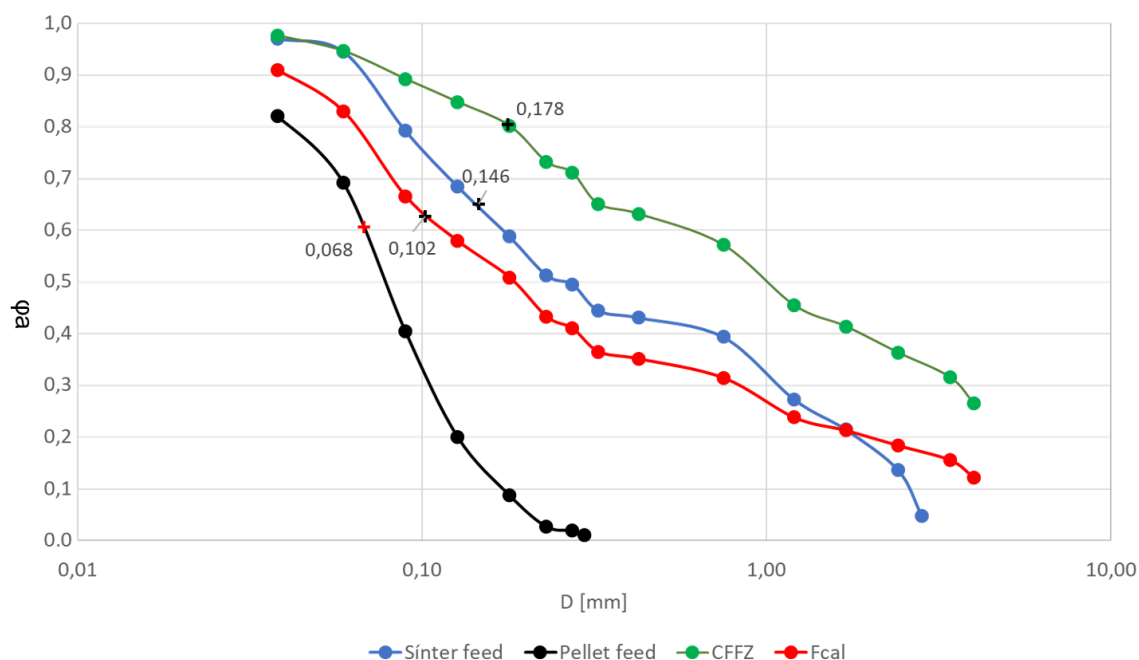


Figura 38 - Distribuição granulométrica para os minérios de ferro em estudo.

É possível destacar pelo padrão das curvas obtidas que os minérios FCAL, CFFZ e Sínter Feed apresentam granulometria dispersa, tendo variação entre 4mm e 0,032mm sem demonstrar uma concentração acentuada nas regiões avaliadas. Enquanto isto, o Pellet Feed demonstra um particulado mais homogêneo, apresentando grande concentração de partículas variando entre 0,149mm e 0,059mm. Estes dados permitem determinar o Diâmetro médio de Sauter que pode ser calculado através da (Eq. 10) e é descrito na Tabela 9.

Tabela 9 - Diâmetro de Sauter para os minérios.	
Minério	Diâmetro de Sauter [μm]
Sínter Feed	146
Pellet Feed	68
CFFZ	178
FCAL	102

3.2 Densidade aparente

No cálculo da densidade aparente, foram padronizadas para a realização do ensaio as alturas de 80mm, 120mm e 180mm para deposição de minério, visando minimizar erros no cálculo de volume – pequenas alturas podem alterar de forma significativa o volume da amostra –. Os experimentos foram realizados em triplicata, tendo os valores obtidos de densidade aparente aplicados em uma média ponderada para cálculo do valor ajustado. A densidade aparente em temperatura ambiente para os minérios em estudo pode ser encontrada na Tabela 10.

Tabela 10 - Densidade aparente para os minérios estudados.

Minério	Densidade aparente [kg/m ³]
Sínter Feed	2499
Pellet Feed	3089
FCAL	2740
CFFZ	2340

3.3 Controle de saturação

Os ensaios de controle de saturação foram realizados em 5 repetições, variando entre 40g e 90g iniciais de água com incrementos de 10g. Os valores obtidos, referem-se a uma proporção entre estas massas de água e a massa de minério inserida necessária para saturar sem excesso o meio sólido. Estes valores estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Proporção de massa de minério e massa de água para saturação.

Minério	Massa de minério / Massa de água
Sínter Feed	7
Pellet Feed	7,5
CFFZ	8,6
FCAL	11,6

Estes valores permitiram com que fosse calculada a concentração mássica de água (C_w) para saturar as massas de minério adotadas para os ensaios e suas respectivas frações. Os valores ditos para os minérios estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Concentração mássica de água para amostras em bancada reduzida.

Minério	Massa de minério [g]	massa de água [g]	Saturação do minério [%]	Concentração mássica de água [%]
Sínter Feed	1280	36,57	20	2,778
	1280	73,14	40	5,405
	1280	109,71	60	7,894
	1280	146,29	80	10,257
	1280	182,86	100	12,500
Pellet Feed	1500	40	20	2,597
	1500	80	40	5,063
	1500	120	60	7,407
	1500	160	80	9,639
	1500	200	100	11,765
FCAL	1500	25,86	20	1,695
	1500	51,72	40	3,333
	1500	77,58	60	4,918
	1500	103,45	80	6,452
	1500	129,31	100	7,937
CFFZ	1280	29,77	20	2,273
	1280	59,53	40	4,444
	1280	89,30	60	6,522
	1280	119,07	80	8,511
	1280	148,84	100	10,417

O aumento de umidade no minério tem alta influência no comportamento adesivo do mesmo. A Figura 39 apresenta um comparativo na adesão das partículas para as concentrações mássicas aplicadas ao Sínter Feed, onde seu aumento implica na formação de agregados cada vez maiores, inclusive, em meios supersaturados. O mesmo comportamento de adesão é encontrado para o Pellet Feed como mostrado na Figura 40. A adição de vibração tende a diluir os agregados, ao mesmo tempo que os mantém coalescidos.



Figura 39 - Concentrações mássica de água no Sinter Feed: a)2,78%; b)5,41%; c)7,89%; d)10,26%; e)12,50%

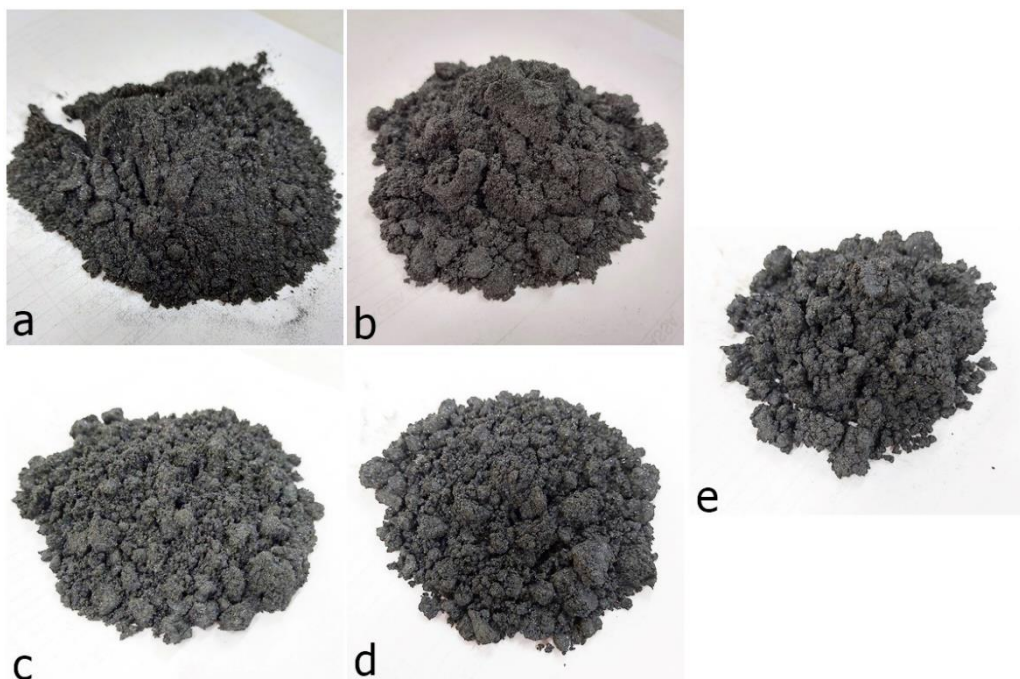


Figura 40 - Concentrações mássicas de água no Pellet Feed: a)2,60%; b)5,06%; c)7,40%; d)9,64%; e)11,76%

3.4 Bancada reduzida

Os ensaios empregando o uso da bancada reduzida foram aplicados aos quatro tipos de minérios de ferro fornecidos, sendo estes o Sínter Feed, Pellet Feed, FCAL e CFFZ.

3.4.1 Sínter Feed

3.4.1.1 Ensaio sem vibração

Como observado experimentalmente, a umidade presente no particulado influencia em como o minério se agrega. Desta forma, foram avaliadas 5 concentrações mássicas iniciais de água em cada minério investigado, desde um mínimo de 20% até a saturação completa, a fim de se correlacionar com a capacidade de percolação e drenagem da massa padrão de coluna de água.

A Figura 41 apresenta a variação da altura da coluna de água adicionada sobre a coluna de minério em função do tempo, até o momento em que não se observava a presença de água livre para drenos trapezoidais.

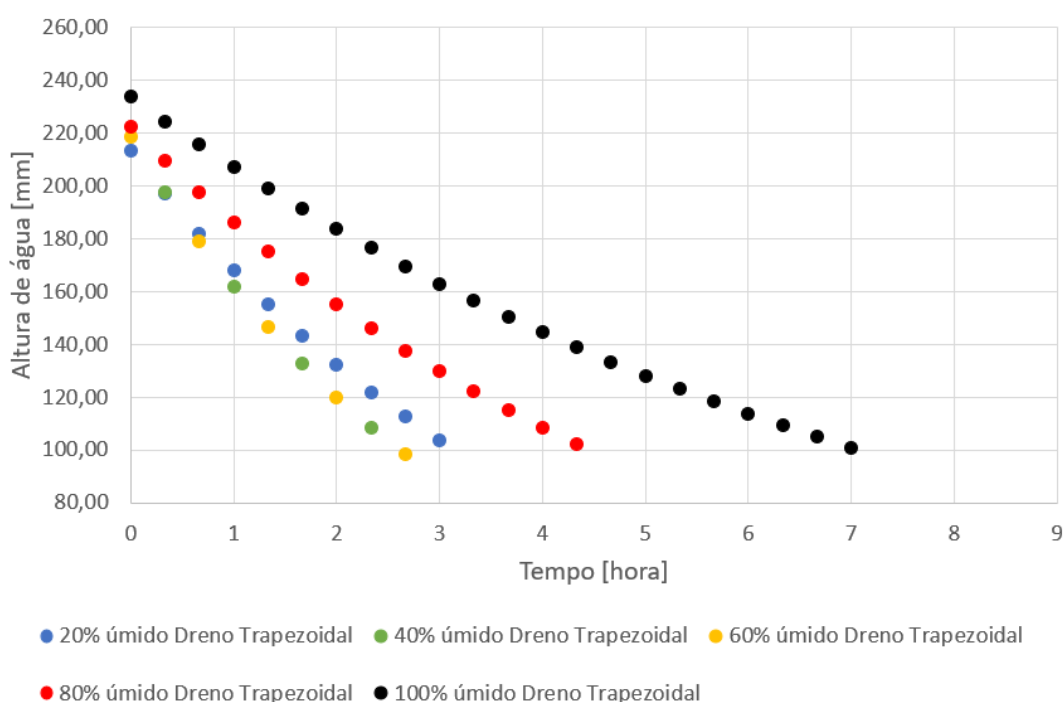


Figura 41 - Respostas de triplicata para drenos trapezoidais.

O padrão indicado nos ensaios demonstra que o aumento da umidade inicial afeta diretamente o desempenho de percolação da água pelo minério e, consequentemente, a drenagem. Para baixas saturações, a água tende a percorrer o minério que não está completamente compactado. Após a adição da coluna de água para execução, a pressão exercida por esta e seu escoamento por entre as partículas de minério preenchem os poros do meio sólido enquanto a compactação ocorre de forma simultânea, conforme ilustrado na Figura 42. Já para ensaios aplicando a massa de amostra com saturação elevada, uma maior compactação do material já se encontra presente nos instantes iniciais, bloqueando os canais de percolação devido à redução de porosidade do meio.

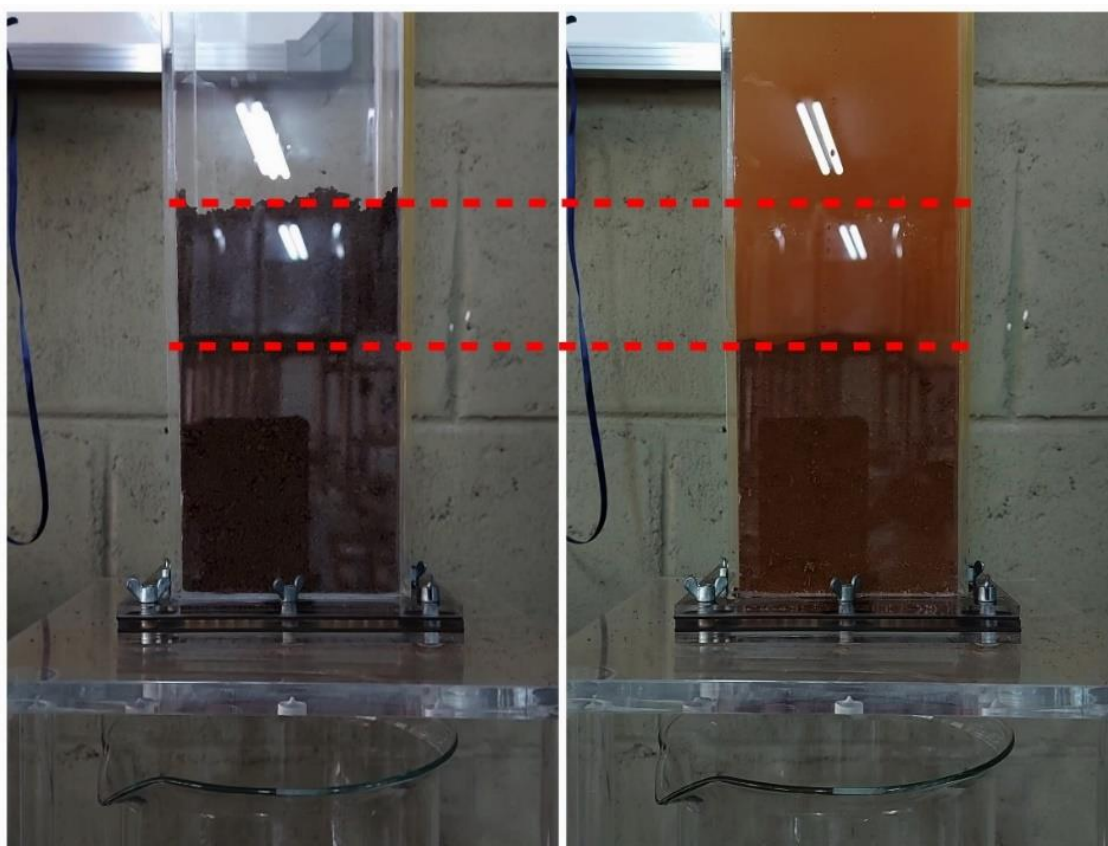


Figura 42 - Compactação apresentada após introdução de água para ensaio.

Na utilização de drenos com passagem de frestas retas com 1,0mm de largura, são indicadas na Figura 43 as curvas de variação da coluna de água. A percolação da água livre observada para os drenos de frestas retas em muito se assimila com os drenos de passagem trapezoidal. Contudo, os tempos para execução dos escoamentos se mostraram levemente menores que os obtidos em drenos

trapezoidais. A diferença de tempo no escoamento das amostras ocorre em todos os percentuais de umidade estudados e foi encontrado como um padrão de comportamento para os minérios estudados. A Tabela 13 a apresenta um comparativo para os valores de tempo obtidos para os ensaios empregados para o Sínter Feed.

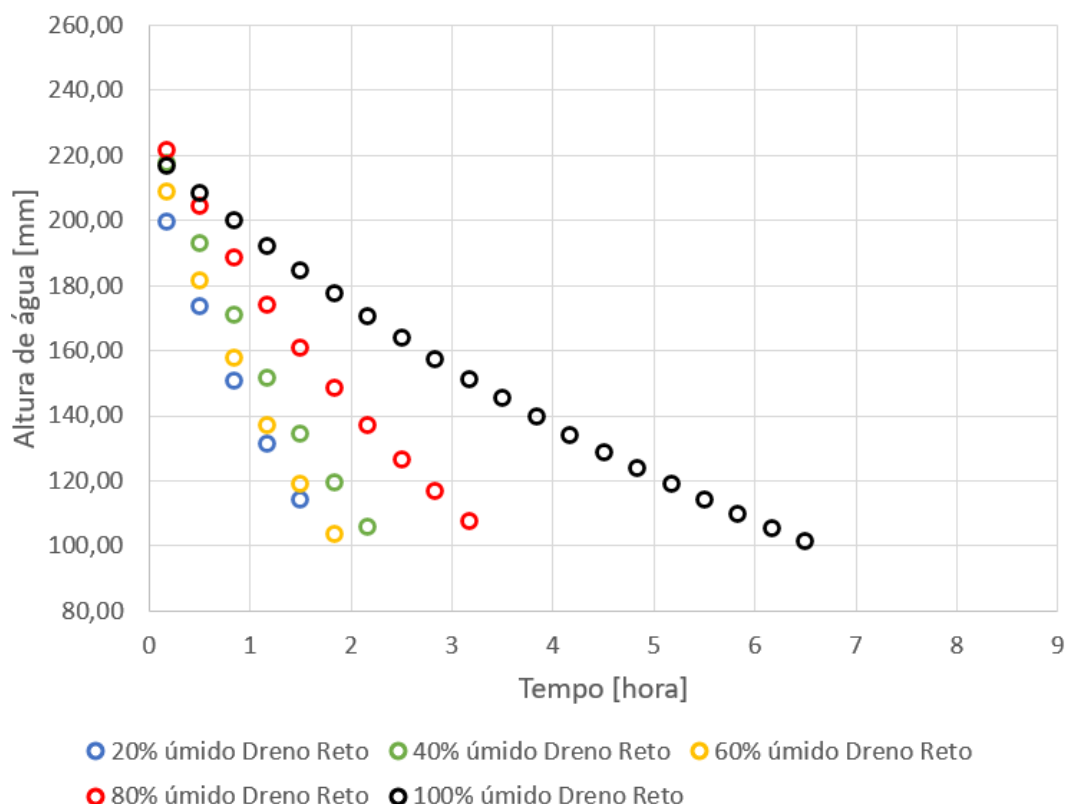


Figura 43 - Respostas de triplicata para drenos retos.

Tabela 13 - Tempo de percolação para minério de ferro Sínter Feed em bancada reduzida.

Saturação inicial	Sínter Feed	
	Dreno reto [hora]	Dreno Trapezoidal [hora]
20%	01:50	03:00
40%	01:20	02:40
60%	01:50	02:40
80%	03:30	04:20
100%	06:30	07:00

Apesar da diferença geométrica, no caso de ensaios estáticos, não foi possível caracterizar a presença de partículas suficientes que seja caracterizado o entupimento pleno das frestas, uma vez que ambos os drenos apresentaram baixa condição de obstrução durante ensaios, como demonstrado nos registros da Figura 44.



Figura 44 - Condição de drenos reto e trapezoidal após ensaio com 40% de saturação inicial

Buscando estudar o efeito de adesão entre as partículas, fez-se um comparativo em dois experimentos com minério de ferro Sinter Feed com drenos retos com frestas de 1mm. A primeira amostra foi desmontada logo após a execução do experimento, onde a umidade presente desfaz a pilha de material formada durante o ensaio. Já para a segunda amostra, a mesma foi deixada em repouso por 36 horas para secagem ao ambiente, fazendo com que a amostra fosse removida sem perder seu formato. É visto na Figura 45 um comparativo entre as amostras.



Figura 45 - Comparativo entre massas: a) após um ensaio e b) sequenciamento.

É possível visualizar também uma fina camada de deposição referente ao

particulado fino na Figura 45, sob uma textura mais fina e brilhosa face superior da amostra. Essa configuração é apresentada de maneira mais detalhada na Figura 46.



Figura 46 - Separação entre camada de deposição e corpo da amostra.

Utilizando drenos impressos com maior tamanho de frestas, foi adotada por padrão o percentual de saturação de 40% devido a melhor maneabilidade das amostras e por apresentar um tempo intermediário para a percolação de água nos ensaios anteriores. É possível observar na Figura 47 que o acréscimo da largura das frestas para os ensaios com sínter Feed, apresentou uma variação de 1 hora e 25 minutos para ensaios utilizando drenos de 2,0mm de abertura e 2 horas e 20 minutos para drenos de 1,0mm de abertura para os ensaios sem uso de vibração.

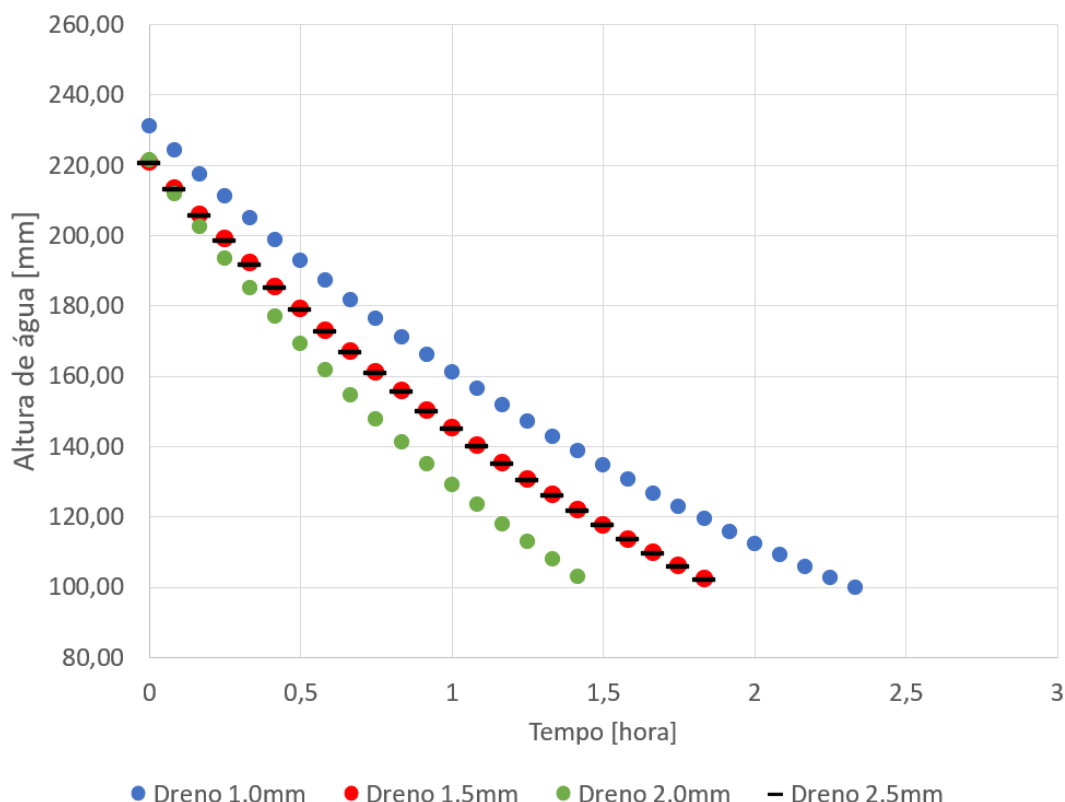


Figura 47 - Curva de percolação para drenos retos de 1,0 a 2,5mm de abertura.

Destaca-se também que, mesmo após o aumento de largura das frestas, não houve incremento da passagem de minério por dentre as aberturas, fazendo com que os drenos continuassem não apresentando aspecto de entupimento durante e após os ensaios. Neste momento, identifica-se que a perda de carga provocada pelo meio poroso das partículas de minério, introduz grande influência na retenção da água livre.

Apesar da tendência de redução do tempo de percolação observada para os drenos de 1,5mm e 2,0mm, não foi possível determinar um fator que fosse significativo para o desvio de comportamento encontrado para o dreno de 2,5mm. Seu desempenho quando avaliado na mesma condição dos demais, se assemelhou muito as frestas de 1,5mm. Com isto, o tempo de percolação e drenagem manteve-se em um valor intermediário aos drenos de 1,0mm e 2,0mm.

3.4.1.2 Ensaio com vibração

Utilizando o mecanismo excêntrico para a realização de ensaios com impactos na bancada foi possível identificar que os efeitos de vibração promovem um aumento na passagem de minério nos instantes iniciais do ensaio com Sínter Feed. Isto faz

com que haja uma maior passagem de minério pelos drenos em comparação com o ensaio sem vibração.

Com cerca de 5 minutos do início da vibração o escoamento se torna mais lento e quase inexistente, devido a aceleração do processo compactação do minério dentro do dispositivo. Este comportamento gera um efeito chamado de torta, como visto na Figura 48.



Figura 48 – Torta formada por efeito de vibração.

Durante a ocorrência destes ensaios, foi observado que esse tipo de configuração faz com que a percolação de água pelo minério seja amplamente reduzida. Os ensaios que utilizam a vibração tenderam a apresentar tempos de percolação acima de 24 horas. Outro efeito característico encontrado foi a expulsão da água permeada na amostra para a parte superior dos sólidos, fazendo com que um meio completamente saturado, como mostrado na Figura 49, expila um feixe de água livre sobre o particulado ao invés de fazer com que o mesmo transpassasse o dreno.



Figura 49 - Água livre expelida pela compactação do minério.

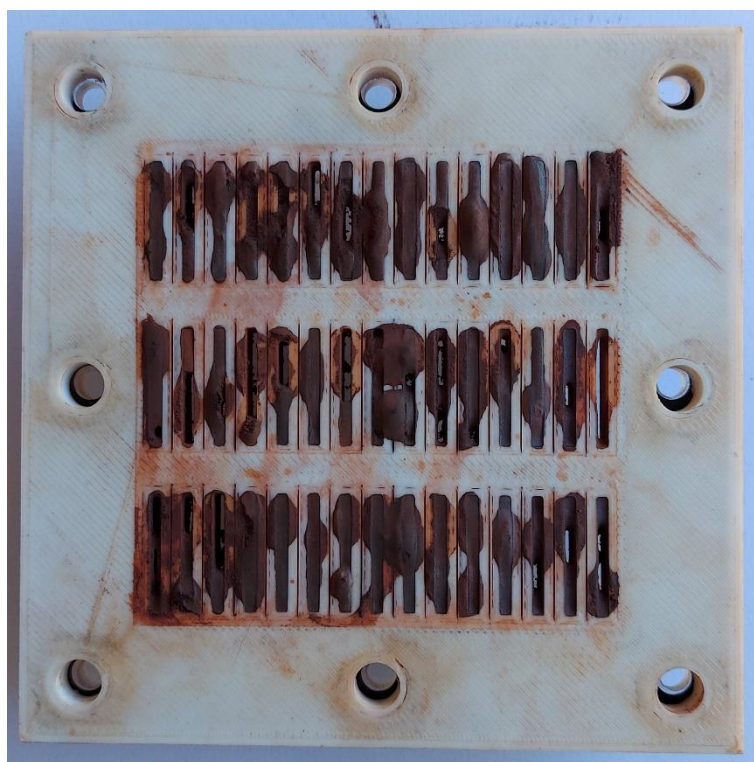


Figura 50 - Minério com frestas obstruídas após ensaio com vibração.

A maior passagem de minério pelas frestas fez com que a condição dos drenos caracterizasse um entupimento parcial após o ensaio, como pode ser visto na Figura 50. A adesão de minério foi iniciada com um acúmulo de material na face inferior do dreno que ocasionou na obstrução de várias frestas simultaneamente.

Para tentar extrapolar a medida máxima de tamanho de fresta empregada em drenos de vagões do tipo gôndola que transportam Sínter Feed, que é de 1,6mm com maior espessura de fresta, um dreno com abertura de fresta de 2,5mm foi testado a fim de avaliar a capacidade de percolação e drenagem da água livre. Na Figura 51, tem-se um ensaio onde, após 2 horas, apenas 8mm – equivalente a 50 gramas – de água foram drenados da amostra. Nestas condições, o Sínter Feed, apresentou-se como um material de baixa permeabilidade, uma vez que a água livre formada sobre o minério possui alta dificuldade de atravessar o meio até chegar aos drenos. Isso demonstra que, além das condições de entupimento dos drenos com particulado de minério retido em suas frestas, as características do material transportado também podem se apresentar como um fator limitante na efetividade de drenagem dos vagões de minério de ferro.

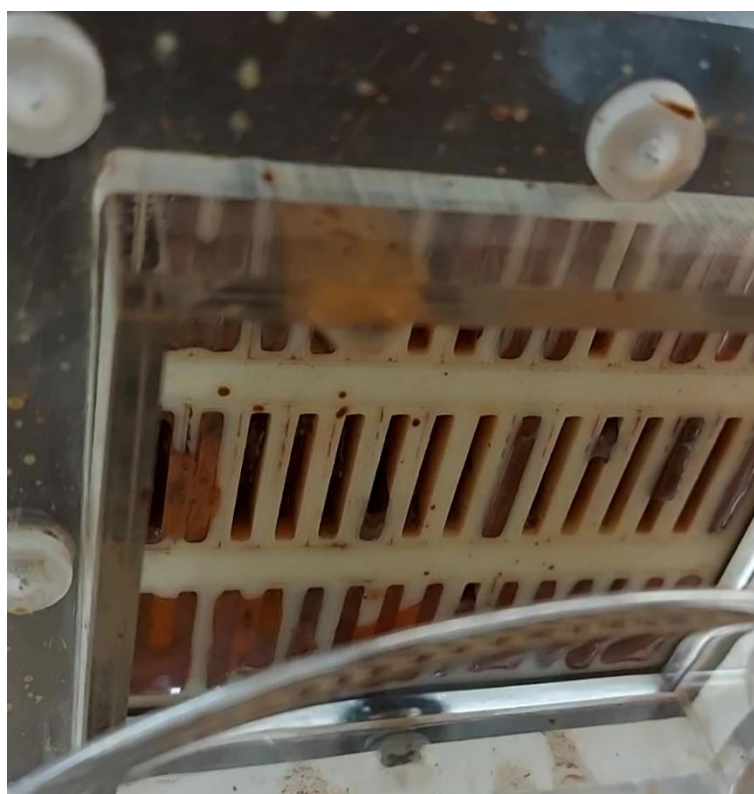


Figura 51 - Dreno reto com fresta de 2,5mm em ensaio com vibração.

3.4.2 Pellet Feed

3.4.2.1 Ensaio sem vibração

As primeiras caracterizações com o Pellet Feed foram apresentadas na Tabela 12. Os mesmos efeitos observados na aglomeração e adesão das partículas para o Sínter Feed se mantiveram para o Pellet Feed. Foi observado que para baixos índices de saturação, o minério apresenta baixa adesão entre suas partículas, aumentando gradualmente até que este atinja saturação total. Desta maneira, as amostras de Pellet Feed passam a apresentar aglomerados cada vez maiores com o aumento da umidade presente. Contudo, os ensaios realizados, apresentaram tempos de escoamento muito inferiores aos obtidos para o Sínter Feed, não apresentando grandes variações em função da umidade – todos sendo realizados em ensaios máximos de 70 minutos – como visto em Figura 52, Figura 53. Para melhor elucidar a semelhança, é demonstrado na Tabela 14 a similaridade dos tempos obtidos para o Pellet Feed.

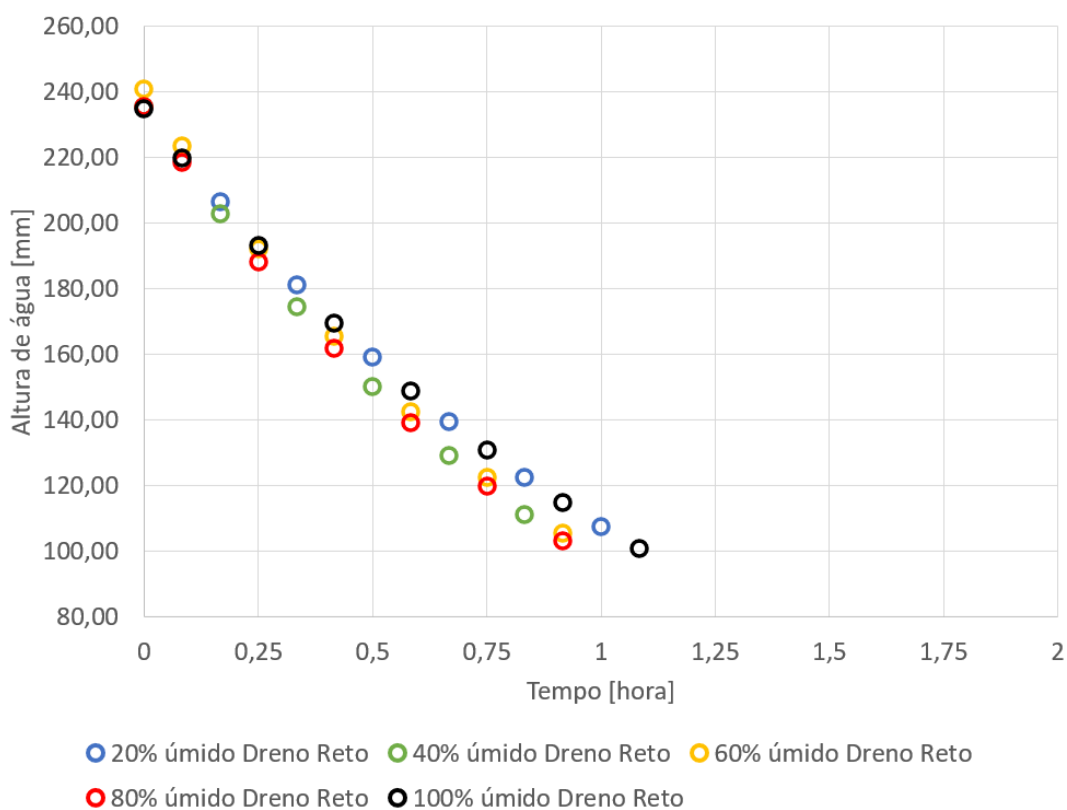


Figura 52 - Curvas obtidas para dreno reto 0,6mm de largura de fresta.

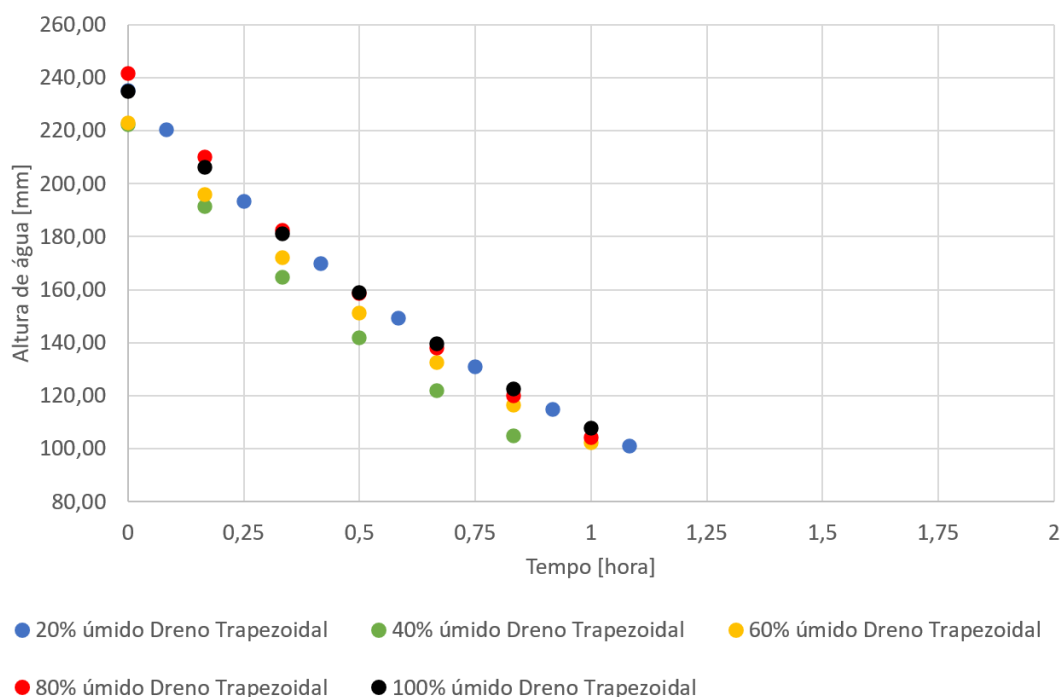


Figura 53 - Curvas obtidas para drenos trapezoidais 0,6mm de largura de fresta.

Tabela 14 - Comparativo para tempos de percolação obtidos com Pellet feed.

Saturação inicial	Pellet Feed	
	Dreno reto [hora]	Dreno Trapezoidal [hora]
20%	01:05	01:05
40%	01:00	00:55
60%	01:00	01:00
80%	01:00	01:00
100%	01:05	01:05

Devido à predominância de pequenas partículas na granulometria do Pellet Feed, este tipo de minério apresenta uma maior quantidade deste minério atravessa os drenos durante o processo de drenagem, causando uma maior obstrução das frestas após os ensaios como pode ser visto na Figura 54.

Nos ensaios utilizando drenos com frestas de largura de acima de 1,5mm, a abertura passa a ser 5 vezes maior que o diâmetro encontrado para as maiores partículas de Pellet Feed obtidas no ensaio de granulometria – de 0,297mm –. Esta diferença entre a abertura da fresta em relação ao tamanho das partículas, faz com que o minério apresente maior perda de massa através do dreno durante o ensaio. Em casos extremos, a dinâmica do material pode acarretar um canal preferencial que conecta diretamente a água livre com o dreno, permitindo que a água livre seja drenada completamente em questão de poucos minutos. É possível verificar uma

exemplificação deste efeito na Figura 55.

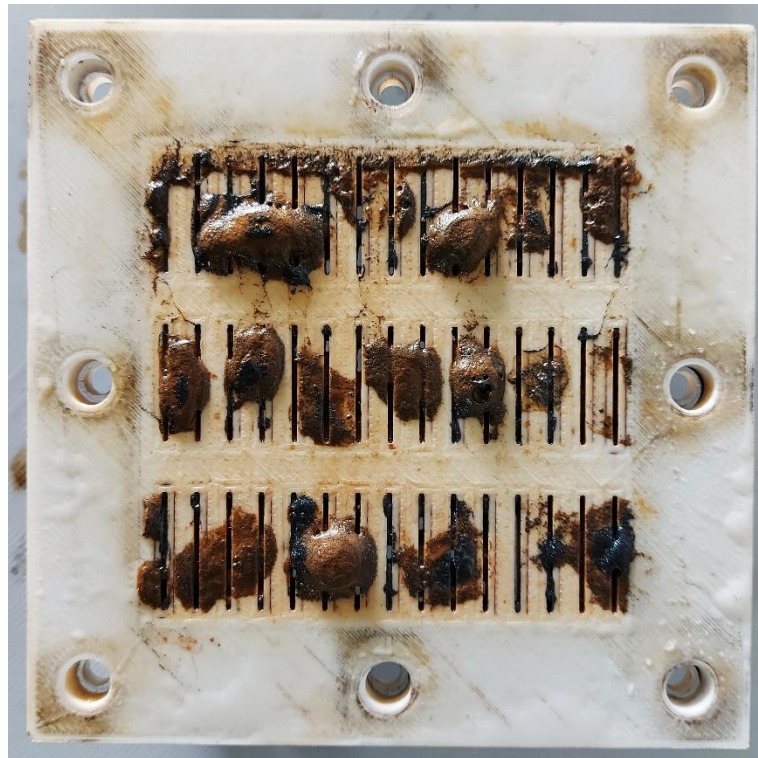


Figura 54 - Condições de dreno após ensaio com C_w 7,41 em dreno reto.



Figura 55 – Formação de canal de escoamento em dreno com 1,5mm de fresta.

3.4.3 CFFZ

3.4.3.1 Ensaios sem vibração

O minério de ferro CFFZ apresenta, assim como o Sinter Feed e FCAL uma distribuição granulométrica contendo uma ampla faixa de particulados, sendo este peneirado para partículas menores que 4mm de diâmetro médio. Este material apresenta um comportamento que se se assemelha ao Sinter Feed, com uma aderência elevada e alta influência da saturação inicial em relação ao tempo de percolação e drenagem. É demonstrado na Figura 56 as curvas obtidas com a utilização de dreno reto e na Figura 57 as curvas obtidas para drenos trapezoidais.

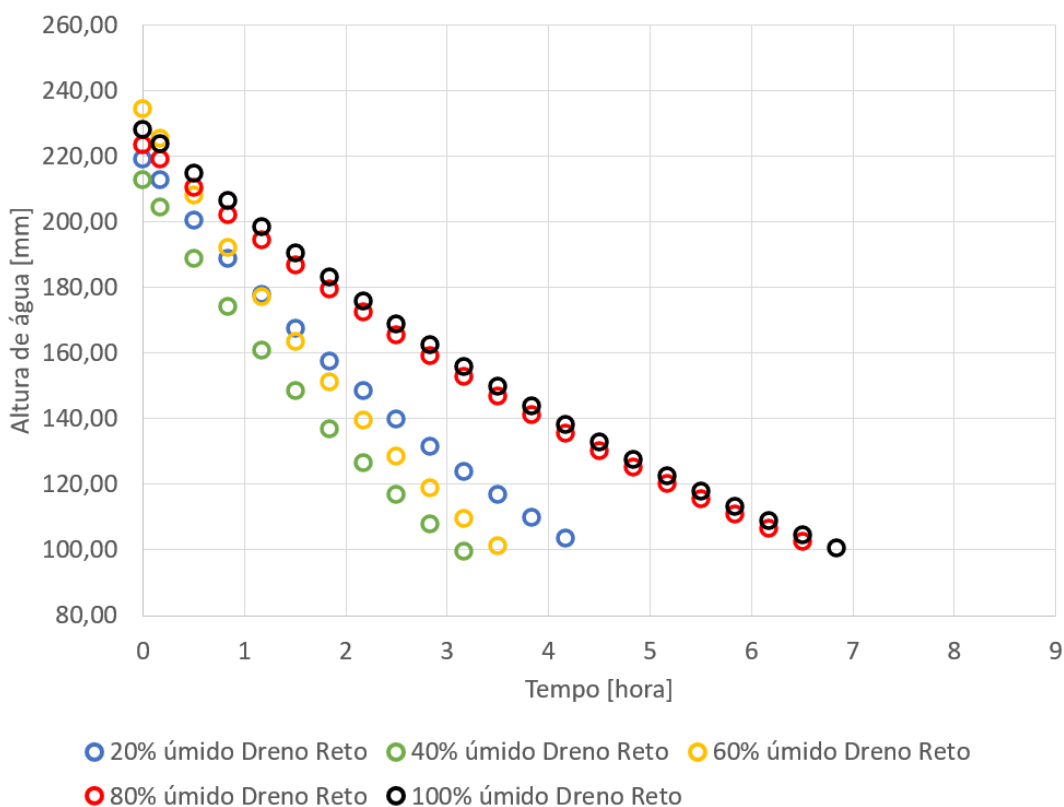


Figura 56 - Curvas obtidas com drenos retos para o minério de ferro CFFZ.

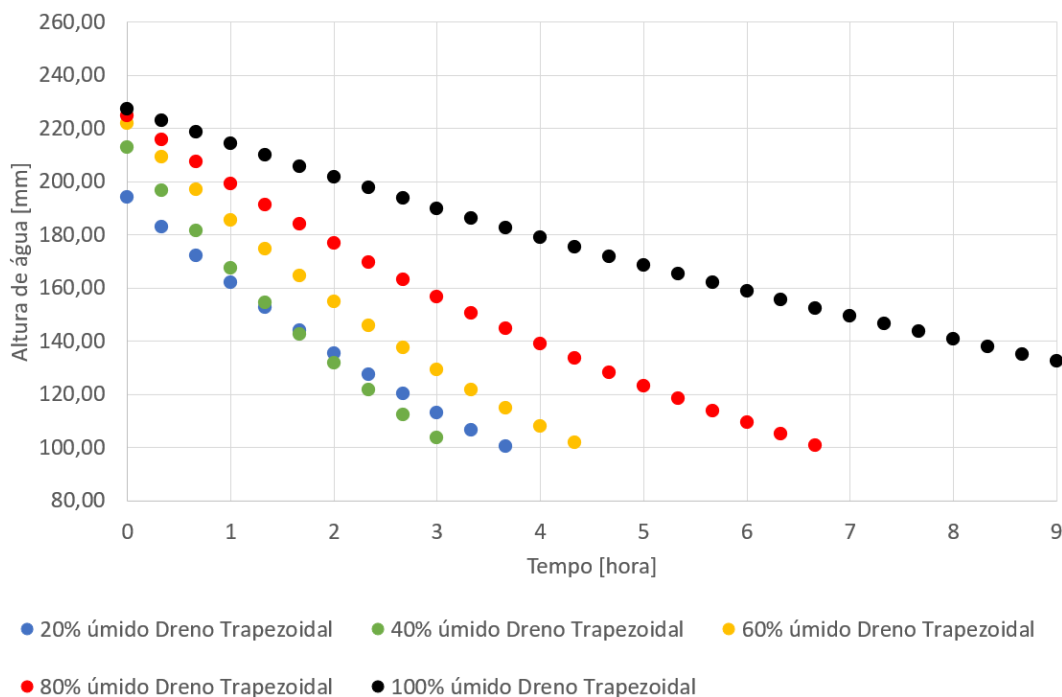


Figura 57 - Curvas obtidas com drenos trapezoidais para o minério de ferro CFFZ.

Nas curvas obtidas para o CFFZ, saturações iniciais de 20%, 40% e 60% apresentam variação de até 1 hora e 30 minutos para percolação total da água livre. No entanto, para saturação inicial de 100% este minério acarreta um maior tempo para drenagem da água, atingindo a marca de 13 horas quando utilizados os drenos trapezoidais, como é visto na Tabela 15. Apesar de para os outros minérios estudados os drenos trapezoidais apresentarem um tempo ligeiramente superior para percolação e drenagem da água quando comparado ao dreno reto, no caso do CFFZ, o valor de tempo é praticamente dobrado. Não foi possível determinar um fator determinístico que indique a raiz desta condição, mas em todos os ensaios realizados utilizando saturação inicial de 100% ocorreu este comportamento.

Tabela 15 - Comparativo para o tempo de percolação e drenagem para minério de ferro CFFZ.

Saturação inicial	CFFZ	
	Dreno reto [hora]	Dreno Trapezoidal [hora]
20%	04:20	03:40
40%	03:10	03:00
60%	03:30	04:20
80%	06:40	06:40
100%	06:50	13:20

Novamente, para os drenos ensaiados com o minério de ferro CFFZ, a presença de particulados presentes nas frestas dos drenos não caracterize o entupimento total de suas aberturas. É apresentado na Figura 58 um dreno reto com abertura de 1,0mm após ensaio.



Figura 58 - Condição de dreno após ensaio com minério de ferro CFFZ.

3.4.4 FCAL

3.4.4.1 Ensaios sem vibração

O minério de ferro FCAL, assim como o CFFZ e Sínter Feed também necessitou passar por peneiramento prévio, visando remover particulados com diâmetro médio acima de 4mm. As curvas apresentadas na Figura 59 e Figura 60 demonstram o comportamento deste minério para o incremento de saturação inicial das amostras para a execução dos ensaios para drenos retos e trapezoidais, respectivamente.

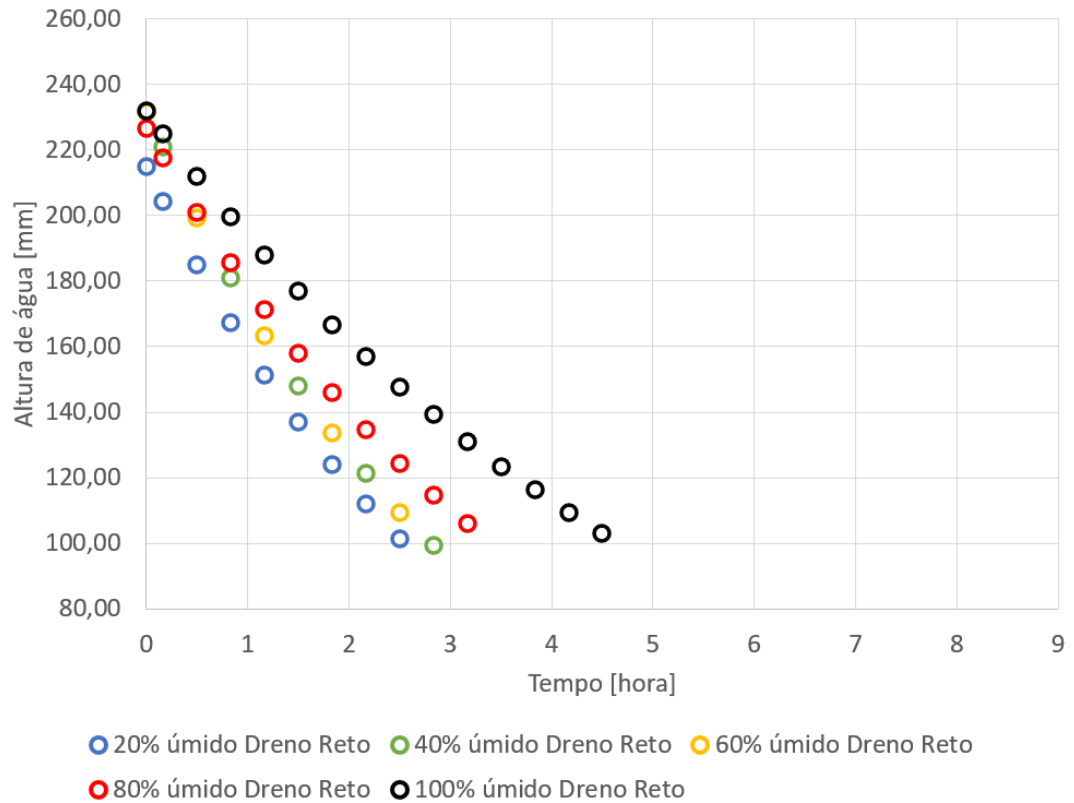


Figura 59 - Curvas para minério de ferro FCAL para drenos retos.

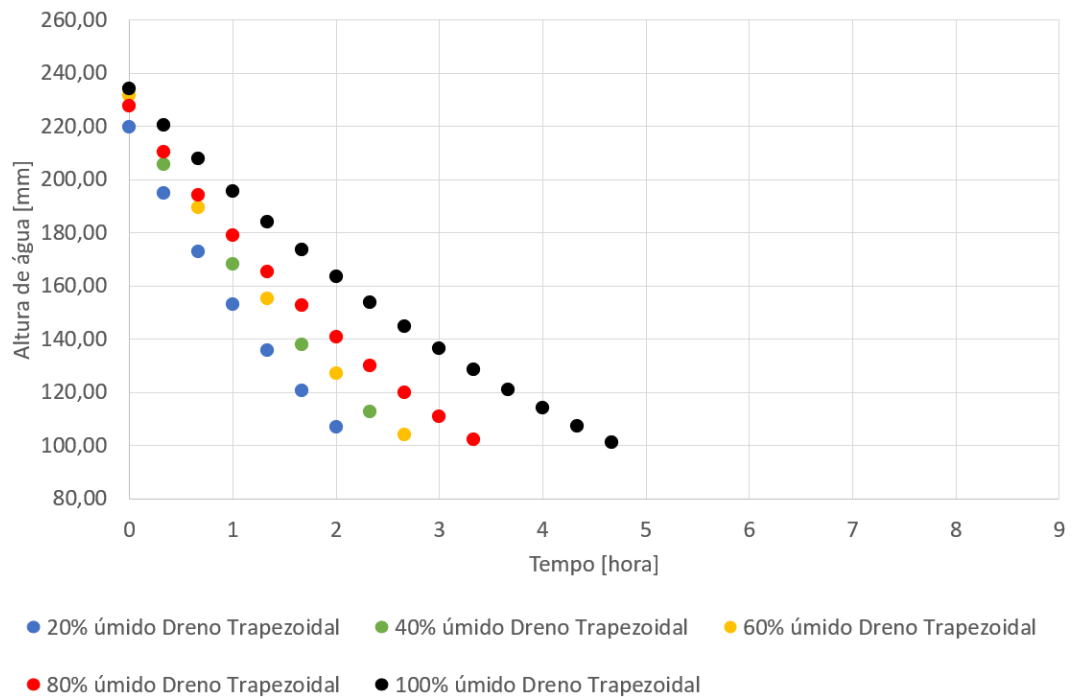


Figura 60 - Curvas obtidas para minério de ferro FCAL para drenos trapezoidais.

Nota-se que o minério de ferro FCAL, assim como CFFZ e Sínter Feed, também apresenta influência para o desenvolvimento da percolação à medida que a umidade

no meio particulado é aumentada. Ademais, os drenos de frestas retas apresentam valores inferiores quando comparados aos drenos trapezoidais. Para uma melhor visualização deste efeito, a Tabela 16 apresenta os valores de tempo obtidos para a percolação da água para o minério de ferro FCAL.

Tabela 16 - Tempo de percolação para minério de ferro FCAL para drenos retos e trapezoidais.

Saturação inicial	FCAL	
	Dreno reto [hora]	Dreno Trapezoidal [hora]
20%	02:30	02:10
40%	02:50	02:40
60%	02:50	02:40
80%	03:20	03:20
100%	04:00	04:40

Em relação aos drenos ensaiados para o minério de ferro FCAL, os particulados retidos no dreno não preenchem por completo suas frestas após os ensaios, não caracterizando entupimento pleno das frestas. Na Figura x é visto um dreno de frestas retas de 1,0mm após ensaio com minério de ferro FCAL.

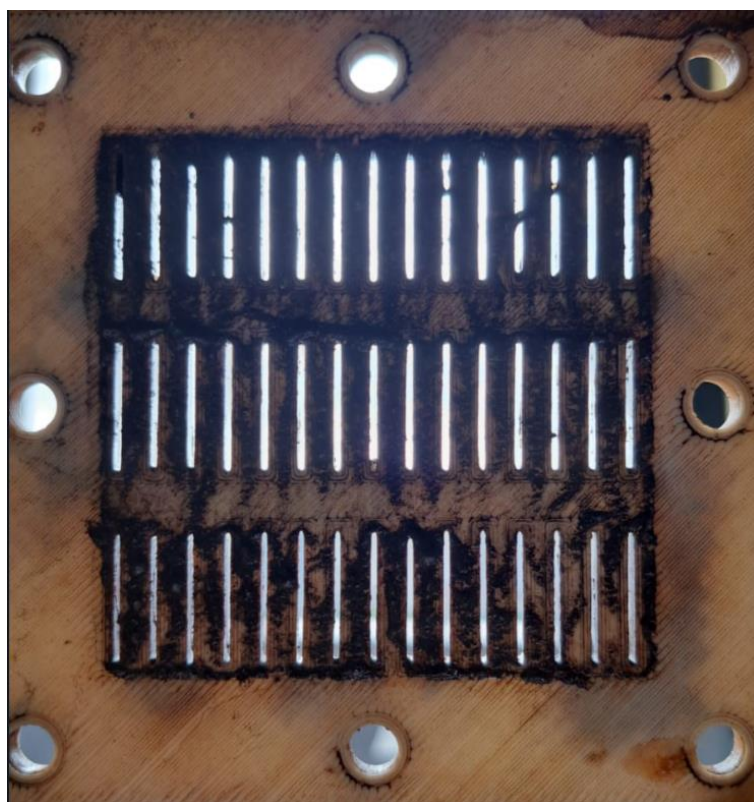


Figura 61 - Dreno de frestas retas utilizado em ensaios com minério de ferro FCAL.

3.5 Bancada Piloto

Como abordado anteriormente, a bancada piloto conta com 3 posicionamentos de drenos para ensaio. As análises foram feitas na parte inferior, representado o assoalho dos vagões onde são empregados os drenos, bem como na posição lateral horizontal, representando a utilização de drenos na cabeceira do vagão. A posição lateral vertical foi construída no tanque de ensaio para testes de ângulo diferente do empregado nos vagões, a fim de se investigar os efeitos do entupimento em uma posição alternativa às empregadas nos vagões, tendo para esta bancada avaliados os minérios de ferro Sinter Feed e o Pellet Feed. Os drenos empregados apresentam configuração de fresta com abertura de 30 mm x 0,6 mm, com face de contato com o minério plana, possuindo 162 frestas em uma área de 34.375mm².

3.5.1 Sinter Feed

O sinter Feed utilizado para os ensaios na bancada piloto manteve o padrão de peneiramento utilizado na bancada reduzida, para efeito comparativo, mesmo que a relação de diâmetro máximo das partículas não fosse necessária neste dispositivo com paredes internas maiores.

3.5.1.1 Ensaio com dreno de fundo

Assim como os resultados obtidos na bancada reduzida, o Sinter Feed continua apresentando para a bancada piloto, os maiores tempos de escoamento para a água livre, tendendo a ultrapassar 24 horas de ensaio. Contudo, estudos realizados com o material sem peneiramento demonstraram que a porosidade do meio aumenta com a presença de particulados maiores, reduzindo o tempo de percolação e drenagem para este material como visto na Figura 62.

Os drenos ensaiados nessa posição apresentam obstrução na parte frontal, não tendo um acúmulo de minério ao longo da profundidade de suas frestas, como visto na Figura 63. Logo, a compactação do minério em função da vibração associada ao bloqueio das frestas tem grande fator de limitação para a drenagem de água livre para esta disposição de ensaio.

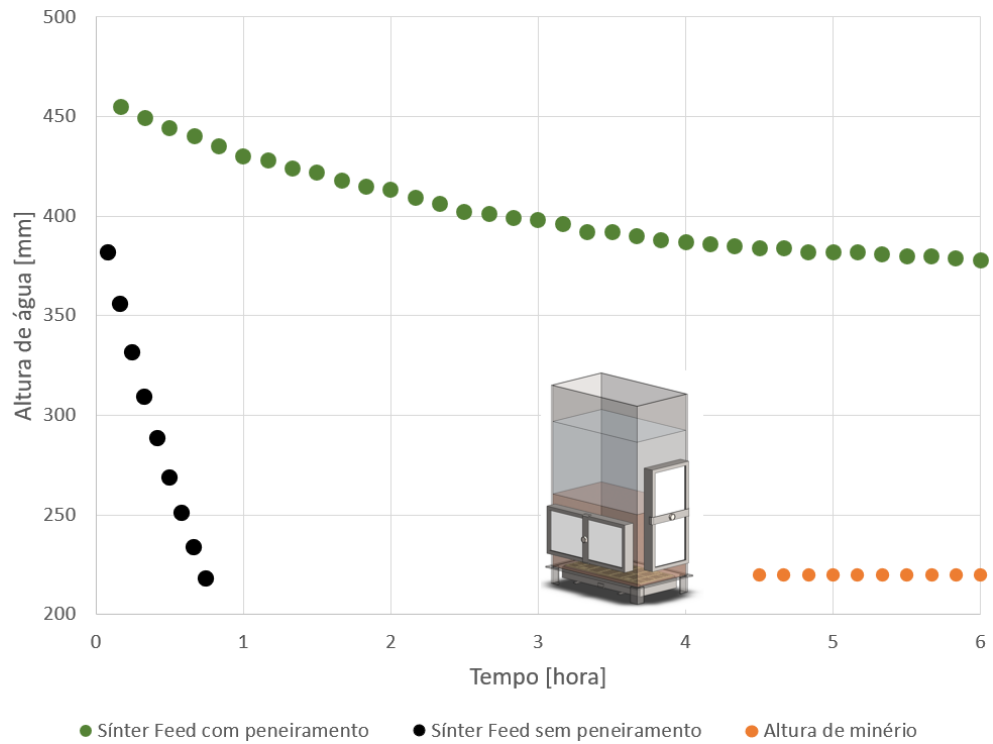


Figura 62 – Curvas de percolação para dreno instalado no fundo.

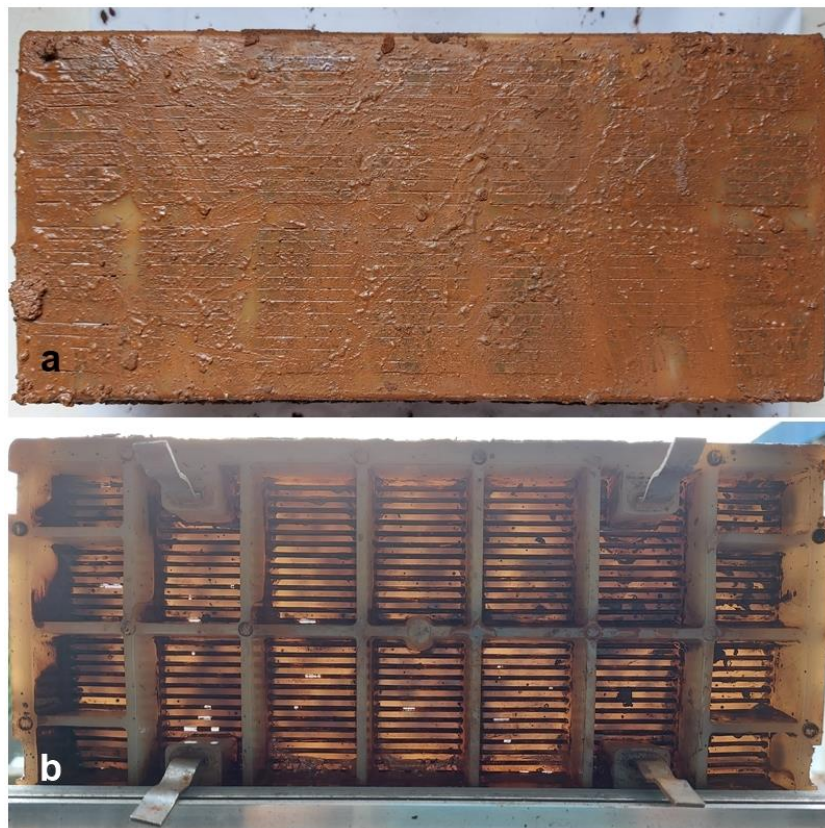


Figura 63 - Dreno após ensaio de fundo: a) face frontal em contato com a carga e b) face posterior.

A configuração de dreno montado na parte inferior do tanque de ensaio, durante

a etapa de desmontagem do equipamento, o minério apresenta uma condição de saturação total durante toda a verticalidade da amostra. Devido a compactação obtida, o particulado constituiu aspecto bastante consolidado, o que acarretou dificuldades para a remoção da amostra.

3.5.1.2 Ensaio com dreno lateral horizontal

Nesta configuração de ensaio, a etapa de compactação tende a deslizar o minério passante pela face do dreno, fazendo com que a fração de particulado que atravessa as frestas seja maior que para quando o dreno está instalado no fundo. Posteriormente, a drenagem de água e minério faz com que os sólidos se depositem na frente das frestas, bloqueando estes canais e desacelerando o processo de drenagem conforme visto na Figura 64



Figura 64 - Deposição de minério em dreno montado na posição horizontal.

Os ensaios utilizando o dreno montado na posição lateral horizontal, também apresentam tendência de duração acima de 24 horas como visto na Figura 65. Esta configuração, contudo, demonstra uma velocidade de percolação levemente superior quando comparada ao dreno instalado no fundo do tanque, devido à menor altura de minério até que haja contato da água com o dreno.

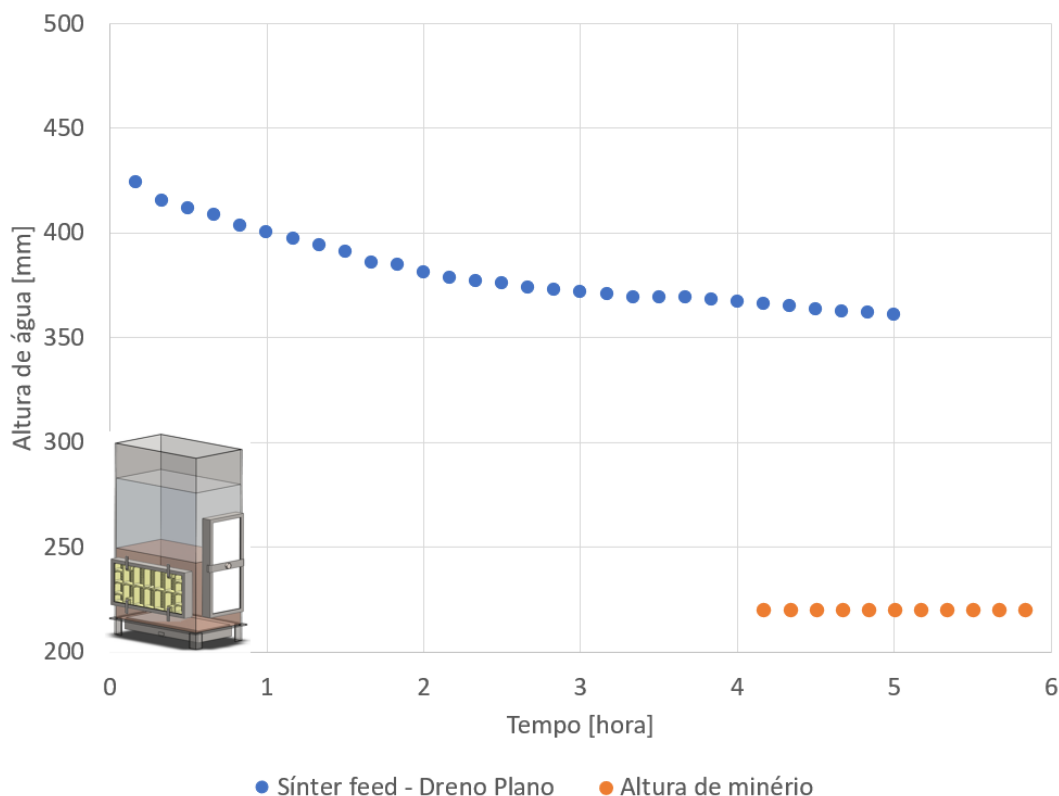


Figura 65 – Curvas de altura de água para dreno instalado na lateral do tanque de ensaio.

Durante a desmontagem do equipamento para o dreno instalado na posição lateral horizontal, o Sínter Feed apresentou saturação completa durante toda a verticalidade do equipamento. Na remoção da amostra, o minério apresentou desde o topo uma condição de firmamento até atingir a altura de instalação do dreno, fazendo com que o mesmo apresentasse maior maleabilidade próximo ao fundo do tanque de ensaio.

3.5.1.3 Ensaio com dreno lateral vertical

A instalação do dreno na posição lateral vertical fez com que a massa de Sínter Feed adicionada ao tanque de ensaio fosse elevada para 36kg, permitindo com que o dreno ficasse abaixo da altura máxima de minério. Esse acréscimo também fez com que a velocidade de introdução da água de percolação fosse reduzida, mantendo seu nível mais próximo à borda do tanque de ensaio.

O comportamento do minério para esta configuração se assemelhou com a montagem lateral horizontal, apresentando uma leve passagem de particulado pelas frestas do dreno durante a etapa de compactação e percolação inicial de água.

Durante a execução do ensaio, a região superior do dreno se mostrou mais efetiva para a remoção da água, pois ficou em contato direto com a água livre formada acima da coluna de minério. Neste posicionamento, as frestas estão agora dispostas verticalmente, fazendo com que o particulado acumulado não seja capaz de preencher o canal por completo como mostrado na Figura 66.



Figura 66 - Frestas de dreno lateral vertical após ensaio.

Após o ensaio, assim como nas disposições anteriores, o minério removido do dispositivo apresentava condição de supersaturação ao longo de toda a verticalidade do tanque. A camada superior se mostra em aspecto mais enrijecido, apresentando dificuldade para remoção. A partir de 6 centímetros abaixo do topo até o fundo do tanque, o minério passa a apresentar aspecto mais maleável, promovendo menor resistência durante a remoção.

3.5.2 Pellet Feed

3.5.3 Ensaio com dreno de fundo

Os ensaios utilizando o Pellet Feed continuam apresentando menores tempos

de escoamento quando comparados ao Sínter Feed, analogamente aos ensaios da bancada reduzida. Este minério apresenta menor aderência entre partículas quando comparado com o Sínter Feed, promovendo uma percolação mais rápida como mostrado na Figura 67. Nos ensaios efetuados, o maior tempo de percolação registrado para os 12 litros de água foi de 5 horas e 40 minutos.

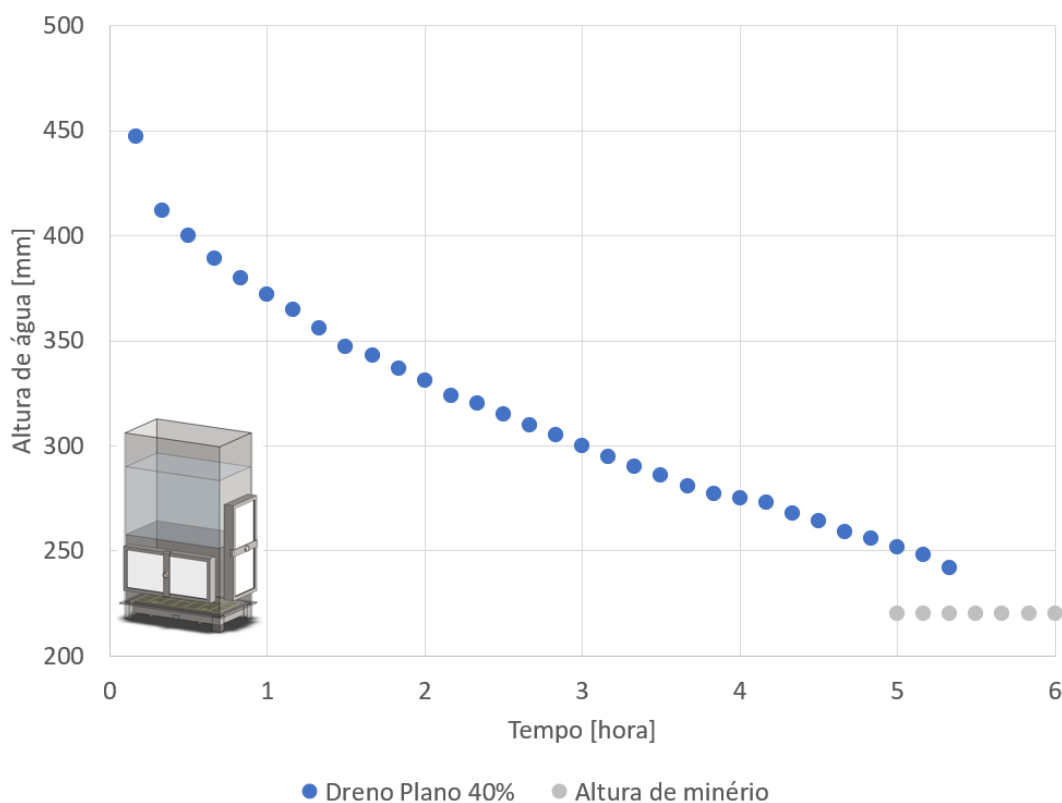


Figura 67 - Perfil de percolação para Pellet Feed com dreno de fundo.

A granulometria com partículas de pequeno diâmetro médio associada a uma menor aderência entre as partículas do Pellet Feed faz com que este material apresente turbulências durante a etapa de compactação no tanque de ensaio. Este fenômeno tende a proporcionar deslocamentos na massa de amostra para o dreno ou para a superfície do tanque como visto na Figura 68. A água utilizada para percolação e drenagem atravessa os poros da amostra, arrastando consigo particulado na fronteira entre a água e os sólidos. Esta condição provoca erosões nas camadas inferiores de minério, até que haja o colapso da amostra, despejando parte do material particulado e da água de percolação através das aberturas do dreno.



Figura 68 - Região de turbilhão em ensaio com Pellet Feed.

As condições do dreno para esta configuração após o ensaio apresentam partículas retidas majoritariamente à face frontal em contato com a carga ensaiada, não mantendo material acumulado no decorrer das frestas (Figura 69). A aderência do Pellet Feed, contudo, demonstra ser bem inferior quanto ao Sínter Feed. Com o dreno seco após o ensaio, pequenos impactos ou a própria movimentação da peça faz com que o Pellet Feed se desprenda do dreno e desfaça os aglomerados, desobstruindo as frestas.



Figura 69 - Aspecto do dreno de fundo após ensaio.

3.5.4 Ensaio com dreno lateral horizontal

O efeito de turbilhão mencionado anteriormente, por vezes ocasiona em um esguicho de material pelo dreno quando posicionado na lateral do tanque de ensaio. Isto faz com que o início do experimento tenha uma queda abrupta na altura de água, até que o efeito seja estabilizado como mostrado na Figura 70.

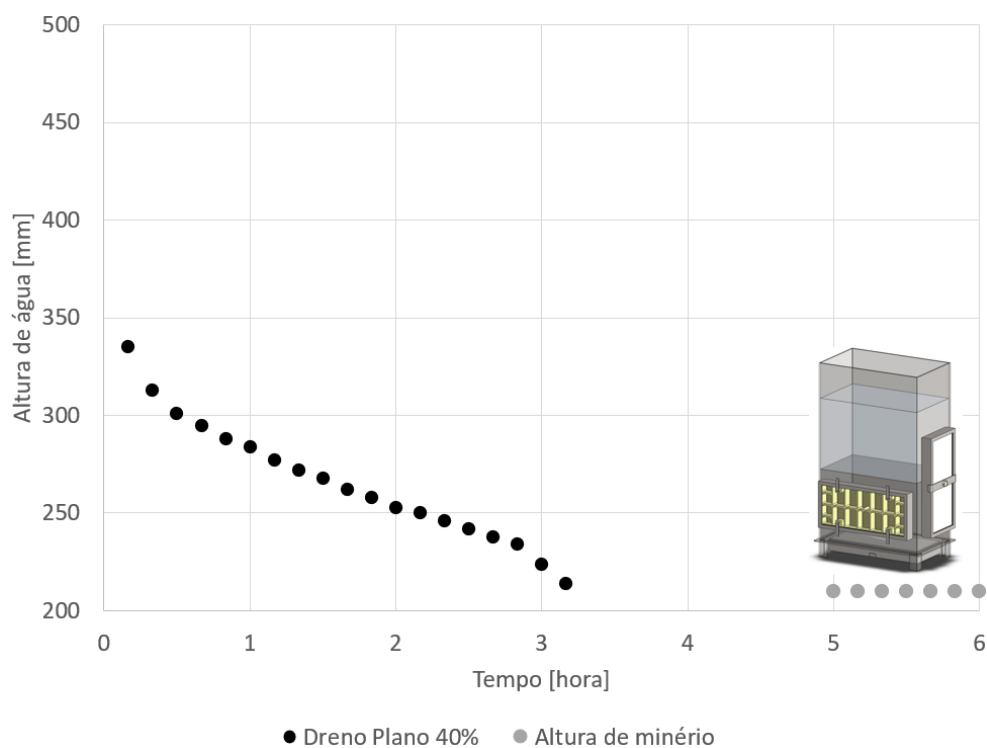


Figura 70 - Padrão de percolação para dreno em posição horizontal.

O dreno quando ensaiado neste posicionamento, assim como para o Sínter Feed, retrata a retenção de material na face frontal do dreno, estendendo-se durante todo o comprimento da fresta e acúmulo de material na região posterior como visto na Figura 71.



Figura 71 - Face externa de dreno após ensaio com Pellet Feed.

Os ensaios que caracterizam o Pellet Feed com instalação de dreno na posição lateral vertical do tanque não foram concluídos. Assim como para os ensaios realizados com Pellet Feed, a massa de minério foi acrescida – de 36kg para 56kg – para sobrepôr a altura total na qual o dreno é instalado. Contudo, a altura inicial do particulado se mantém muito próxima à borda do dispositivo antes de sua compactação, fazendo com que a introdução de água seja demasiadamente lenta.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho introduziu uma proposta inovadora para o estudo do desempenho na percolação e drenagem de minério de ferro laboratorialmente. Foram desenvolvidas duas bancadas de ensaio operando com pequenas massas de minério e água em relação aos vagões, avaliando diretamente as condições dos drenos após a operação de percolação e drenagem. A falta de literatura referente ao assunto, faz com que não haja material disponível para comparativo direto sobre capacidade de drenagem, eficiência das geometrias e comportamento de material durante o processo. Portanto, a interação com engenheiros responsáveis pela análise em campo permitiu avaliar as informações levantadas nos ensaios e se fez presente ao longo da investigação, através de parceria entre a empresa Vale S.A. e a Universidade Santa Cecília, onde os protótipos foram idealizados e construídos a partir desta dissertação.

Com os dados obtidos neste trabalho, é possível obter algumas conclusões referentes ao processo de drenagem:

A umidade inicial do minério possui alta influência no comportamento da percolação. Quanto maior o grau de saturação, maior será a compactação inicial do minério e, conseqüentemente, menor será a porosidade do meio para a passagem de água.

A vibração possui papel fundamental para a compactação do minério. Mesmo que a saturação não esteja em valores elevados, a vibração contínua tende a coalescer o material e reproduzir o efeito de deposição dos sólidos direcionando a água para a superfície.

Os drenos instalados no fundo dos tanques de ensaio – referentes ao assoalho dos vagões – acabam sendo menos eficientes na condição de drenagem devido à dificuldade de percolação da água através do minério de ferro. Um fator determinante para tal é a decantação de minério durante a vibração, fazendo com que a parcela sólida se deposite e compacte no fundo dos tanques, enquanto a água é direcionada para a superfície. Ainda assim, estes drenos compõem papel fundamental na área prática, realizando a drenagem dos vagões de minério quando estes estão sem carga no transporte do porto de volta à mina.

Para os drenos instalados na lateral, a orientação das frestas pode oportunizar uma melhora caso estas sejam aplicadas na posição vertical e no limite superior entre

a carga e a área em contato com a água livre. Esta configuração dificulta o repouso de material nos drenos e fazendo com que os canais das frestas se mantenham limpos por maiores períodos.

O aumento da largura das frestas não promove diretamente uma melhor condição de drenagem do Sinter Feed. Uma vez que o mesmo vagão pode transportar mais de um tipo de minério, frestas acima de 1,5mm de largura promovem uma passagem acentuada de Pellet Feed pelos drenos. Esta perda de material pode acarretar outros problemas como a contaminação dos sistemas de rodagem e freio dos vagões assim como das malhas ferroviárias.

4.1 Trabalhos futuros

A pesquisa realizada explorou a operação dos mecanismos de percolação e drenagem de água e minério de ferro, produzindo um comparativo em diferentes cenários de ensaio e configurações geométricas para estudo. Este trabalho pode dar origem a outras linhas de pesquisa continuando e aprimorando os métodos aqui empregados em outros tipos de minério ou insumos sólidos transportados, diferentes cargas de impacto e frequências de vibração. Além disso, sistemas distintos de drenagens podem ser testados, elevando a capacidade de redução de custo e prazo para definições de recebimento de drenos pelas empresas do setor ferroviário.

4.2 Trabalhos publicados

2020 – Artigo completo publicado em congresso no **9º Encontro Nacional de Pós-Graduação – Unisanta**: *Desenvolvimento de um Projeto de Bancada para Avaliação Experimental de Drenos Aplicados em Vagões de Minério*. Marcelo Augusto Valeriano Bogsan, Pedro Henrique Silva de Moraes, Murilo Antunes Alves Lucindo, Deovaldo de Moraes Junior, Vitor da Silva Rosa, Felipe Bertelli.

2021 – Artigo completo publicado em congresso no **1º Encontro Internacional de Pós-Graduação – Unisanta**: *Estudo da influência da umidade do minério de ferro Sinter Feed sobre o escoamento de água em torre de bancada com drenagem vertical*. Marcelo Augusto Valeriano Bogsan, Augusto Cesar Andrini, Vitor Palmarin Oliveira Santos, Deovaldo de Moraes Junior, Vitor da Silva Rosa, Felipe Bertelli

2022: Resumo apresentado no congresso internacional **The Fifth International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, Montpellier, France**: *Development of an experimental bench to evaluate percolation and water drainage in iron ore*. Marcelo Augusto Valeriano Bogsan, Deovaldo de Moraes Júnior, Vitor da Silva Rosa, Felipe Bertelli.

Pedido de patente: **BR 10 2022 020517 5**. Título: BANCADA EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE PERCOLAÇÃO E DE DRENAGEM DE ÁGUA

REFERÊNCIAS

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro, LTC, 6ª edição, 1996.

Egis. **Expansão da estrada de ferro Carajás – EFC**. Disponível em: <<https://www.egis-latam.com/action/realisations/expansao-da-estrada-de-ferro-carajas-efc>>. Data de acesso: 08 de agosto de 2020.

EKER, Omer F.; CAMCI, Fatih; JENNIONS, Ian K. Physics-based prognostic modelling of filter clogging phenomena. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 75, p. 395-412, 2016.

FELICETTI, M. A., Determinação da Força de Adesão entre Partículas e uma Superfície Aplicando a Técnica Centrífuga. São Carlos. UFSCar, 2004, (Dissertação de Mestrado).

Ferreira RF. Modelos para Previsão do Limite de Umidade para Transporte Marítimo de Finos de Minério de Ferro. Universidade Federal de Ouro Preto; 2019. [tese de doutorado].

GONÇALVES, Heloisa H. S. et al. **Mecânica dos solos e fundações**. São Paulo, USP, 2014.

JOHN B, Burland. Chapter 14 Soils as particulate materials. In: **ICE manual of geotechnical engineering**. Thomas Telford Ltd, 2012. p. 153-161.

Kai T, Xuewei LV, Shanshan WU, Senwei X, Xiaobo H, Chenguang B. Measurement for contact angle of iron ore particles and water. *ISIJ Int*, 2017; 58:379–400.

LUZ, A.B. et al. **Tratamento de minérios**. 5ª ed. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq/MCT, 2010.

MCCABE, Warren Lee; SMITH, Julian Cleveland; HARRIOTT, Peter. **Unit**

operations of chemical engineering. 7th ed. New York: McGraw-hill, 2005.

PANACHUKI, E. **Infiltração de água no solo e erosão hídrica, sob chuva simulada, em sistema de integração agricultura-pecuária.** Universidade Federal De Mato Grosso Do Sul Campus De Dourados. Dourados, 2003.

PETEAN, P. G. da C. **Determinação da força de adesão entre partícula e Superfícies rugosas através da técnica centrífuga.** Tese de doutorado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

QUITES, Noel Aparecido Siqueira. **Influência de diferentes tipos de minério de ferro na umidade do Sínter Feed.** 2018.

RENNIE, Paul R.; CHEN, X. D.; MACKERETH, Antony R. Adhesion characteristics of whole milk powder to a stainless steel surface. **Powder technology**, v. 97, n. 3, p. 191-199, 1998.

ROCKY. **Liquid bridge model: accounting for liquid film in wet material modeling.** Disponível em: <<https://rocky.esss.co/blog/liquid-bridge-model-accounting-for-liquid-film-in-wet-material-modeling/>>. Data de acesso: 08 de novembro de 2020.

USP. **Água no solo: características e comportamento.** Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1389787/mod_resource/content/2/Apostila%20parte%20II%20-%20%C3%81gua%20no%20Solo.pdf>. Data de acesso: 09 de maio de 2020.

VALE. **Estrada de ferro Carajás: o caminho onde passa a nossa riqueza.** Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/carajas-railway/Paginas/default.aspx>>. Data de acesso: 08 de maio de 2020.

VALE. **Estrada de Ferro Vitória a Minas completa 111 anos sobre os trilhos.** Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/estrada-ferro-vitoria-minas-completa-111-anos-sobre-trilhos.aspx>>. Data de acesso: 08 de

maio de 2020.

VIEIRA, J. L.; ABRAMENTO, M.; CAMPOS, M. V. W. Experimental study of clogging in drainage systems. In: **Proceedings of the 9th International Conference on Geosynthetics**, Guarujá, Brazil. 2010. p. 23-27.

WEBBER, John Beausire Wyatt. **Characterising porous media**. 2000. Tese de Doutorado. University of Kent at Canterbury.

YADROITSEV, I. et al. Manufacturing of fine-structured 3D porous filter elements by selective laser melting. **Applied Surface Science**, v. 255, n. 10, p. 5523-5527, 2009.

APÊNDICE A – Cálculo do Diâmetro de Sauter para minério de ferro Sínter Feed.

Tabela 17 - Arranjo granulométrico para o Sínter Feed.

Abertura [mm]	dp [mm]	Massa [g]	x	x/dp
2,83 - 2	2,415	264,30	0,0957	0,0396
2 - 1,41	1,705	233,43	0,0845	0,0496
1,41 - 1	1,205	175,48	0,0635	0,0527
1 - 0,5	0,75	361,28	0,1308	0,1744
0,5 - 0,354	0,427	112,02	0,0406	0,0950
0,354 - 0,297	0,3255	40,05	0,0145	0,0446
0,297 - 0,25	0,2735	152,49	0,0552	0,2019
0,25 - 0,21	0,23	52,34	0,0190	0,0824
0,21 - 0,149	0,1795	224,24	0,0812	0,4523
0,149 - 0,105	0,127	288,53	0,1045	0,8226
0,105 - 0,074	0,0895	323,56	0,1172	1,3090
0,074 - 0,044	0,059	459,23	0,1663	2,8183
0,044 - 0,032	0,038	74,84	0,0271	0,7131
Σ		2761,79	1	6,8555

A partir da (Eq. 10), é determinado o Diâmetro de Sauter para o Sínter Feed:

$$D_{sa} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} = \frac{1}{6,8555} = 0,146\text{mm}$$

APÊNDICE B – Cálculo do Diâmetro de Sauter para minério de ferro Pelle Feed.

Tabela 18 - Arranjo granulométrico para o Pellet Feed.

Abertura [mm]	dp [mm]	Massa [g]	x	x/dp
0,297 - 0,25	0,2735	26,64	0,0109	0,0400
0,25 - 0,21	0,23	22,71	0,0093	0,0406
0,21 - 0,149	0,1795	183,27	0,0753	0,4195
0,149 - 0,105	0,127	337,66	0,1387	1,0925
0,105 - 0,074	0,0895	613,13	0,2519	2,8149
0,074 - 0,044	0,059	864,51	0,3552	6,0207
0,044 - 0,032	0,038	385,82	0,1585	4,1718
Σ		2433,74	1	14,5999

A partir da (Eq. 10), é determinado o Diâmetro de Sauter para o Pellet Feed:

$$D_{sa} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} = \frac{1}{14,599} = 0,068 \text{mm}$$

APÊNDICE C – Cálculo do Diâmetro de Sauter para minério de ferro CFFZ.

Tabela 19 - Arranjo granulométrico para o CFFZ.

Abertura [mm]	dp [mm]	Massa [g]	x	x/dp
2,83 - 2	2,415	142,80	0,0717	0,0297
2 - 1,41	1,705	152,33	0,0764	0,0448
1,41 - 1	1,205	124,00	0,0622	0,0516
1 - 0,5	0,75	352,44	0,1769	0,2358
0,5 - 0,354	0,427	179,34	0,0900	0,2108
0,354 - 0,297	0,3255	58,08	0,0291	0,0895
0,297 - 0,25	0,2735	182,83	0,0918	0,3355
0,25 - 0,21	0,23	63,33	0,0318	0,1382
0,21 - 0,149	0,1795	211,58	0,1062	0,5916
0,149 - 0,105	0,127	137,82	0,0692	0,5446
0,105 - 0,074	0,0895	134,90	0,0677	0,7564
0,074 - 0,044	0,059	163,01	0,0818	1,3866
0,044 - 0,032	0,038	90,12	0,0452	1,1902
Σ		1992,58	1	5,6054

A partir da (Eq. 10), é determinado o Diâmetro de Sauter para o CFFZ:

$$D_{sa} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} = \frac{1}{5,6054} = 0,178\text{mm}$$

APÊNDICE D – Cálculo do Diâmetro de Sauter para minério de ferro FCAL.

Tabela 20 - Arranjo granulométrico para o FCAL.

Abertura [mm]	dp [mm]	Massa [g]	x	x/dp
2,83 - 2	2,415	84,67	0,0372	0,0154
2 - 1,41	1,705	88,19	0,0388	0,0227
1,41 - 1	1,205	75,83	0,0333	0,0277
1 - 0,5	0,75	231,67	0,1018	0,1358
0,5 - 0,354	0,427	110,57	0,0486	0,1138
0,354 - 0,297	0,3255	42,06	0,0185	0,0568
0,297 - 0,25	0,2735	135,77	0,0597	0,2182
0,25 - 0,21	0,23	68,69	0,0302	0,1313
0,21 - 0,149	0,1795	228,75	0,1005	0,5601
0,149 - 0,105	0,127	212,38	0,0933	0,7350
0,105 - 0,074	0,0895	262,05	0,1152	1,2868
0,074 - 0,044	0,059	495,96	0,2180	3,6945
0,044 - 0,032	0,038	238,73	0,1049	2,7611
Σ		2275,32	1	9,7590

A partir da (Eq. 10), é determinado o Diâmetro de Sauter para o FCAL:

$$D_{sa} = \frac{1}{\sum \left(\frac{x_i}{d_{pi}} \right)} = \frac{1}{9,7590} = 0,102\text{mm}$$