

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

GABRIEL ALCALÁ TABATA

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE DOS MINÉRIOS DE FERRO DO TIPO PELLET
FEED E SINTER FEED NO COMPORTAMENTO DE COMPACTAÇÃO E
ADESÃO EM DIFERENTES GEOMETRIAS**

SANTOS/SP

2025

GABRIEL ALCALÁ TABATA

**INFLUÊNCIA DA UMIDADE DOS MINÉRIOS DE FERRO DO TIPO PELLET
FEED E SINTER FEED NO COMPORTAMENTO DE COMPACTAÇÃO E
ADESÃO EM DIFERENTES GEOMETRIAS**

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

SANTOS/SP

2025

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

625.61
T115i

Tabata, Gabriel Alcalá.

Influência da umidade dos minérios de ferro do tipo pellet feed e sinter feed no comportamento de compactação e adesão em diferentes geometrias / Gabriel Alcalá Tabata.

2025.

80 f.

Orientador: Dr. Felipe Bertelli.

Coorientador: Dr. Vitor Silva Rosa.

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

I. Bertelli, Felipe . II. Influência da umidade dos minérios de ferro do tipo pellet feed e sinter feed no comportamento de compactação e adesão em diferentes geometrias.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, João de Freitas Tabata e Elisabeth Cristina Alcalá Tabata, que me incentivaram e me ofereceram todo suporte incondicional para que tudo isso fosse possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais um dia, pela vida, pelo amor, pela esperança e pelo aprendizado de que tudo passa.

Aos meus pais, João de Freitas Tabata e Elisabeth Cristina Alcalá Tabata, pela doação dedicada aos filhos, pela motivação em tempos difíceis, pelo amor incondicional, apoio em minhas decisões, pelo suporte e ensinamentos.

Ao Prof. Dr. Felipe Bertelli pela confiança em mim depositada, pela orientação, conselhos e apoio ao longo do trabalho.

Ao Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior, Prof. Dr. Vítor da Silva Rosa, Prof^a. Dra. Nelize Maria de Almeida Coelho, Prof. Dr. Edinaldo Pereira da Silva, Prof. Me. Yuri Silva Storino e ao meu colega de mestrado Eng. João Batista Cyrino Florence pelas sugestões, suporte e conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Amaral Moino pelos ensinamentos, conselhos e amizade desde a minha entrada à universidade.

Ao meu irmão, Felipe Alcalá Tabata, aos meus amigos, em especial Raul Gustavo Ribeiro Hyppolito e Sthefani Giraldelli de Jesus Oliveira, pelo apoio absoluto, pela constante motivação e por sempre acreditarem em mim nessa jornada.

Aos meus familiares, às famílias Gallo e Melo, e às pessoas próximas, pela assistência e incentivo ao longo desses anos.

Aos colegas e amigos Beatriz Borges Garcia, Isabella Ezverzuthe Gonzaga, Isabella Vieira Moraes, Leonardo Henriques dos Santos, Lívia de Souza Alves, Luís Henrique Fernandes de Albuquerque e Roberto Patella Neto por todo esforço e trabalho dedicado, pela paciência e persistência que foram fundamentais para a realização de todo esse trabalho.

Aos técnicos do Laboratório de Operações Unitárias, a Irineu Penha da Ressureição, técnico do Laboratório de Mecânica, e aos funcionários da Unisanta pela ajuda no desenvolvimento, limpeza da infraestrutura e manutenção dos equipamentos utilizados ao longo desta pesquisa.

À Universidade Santa Cecília pelo espaço cedido para a elaboração e realização de todos os ensaios e experimentos, juntamente com seu corpo docente que contribuíram diretamente em minha formação.

À VALE S.A. pelo financiamento do projeto, pela bolsa de mestrado e por todo fornecimento de materiais para o desenvolvimento desta pesquisa.

RESUMO

O transporte ferroviário no Brasil desempenha papel essencial no escoamento do minério de ferro utilizando vagões gôndola e enfrenta desafios operacionais, especialmente relacionados à concentração de água e à formação de recheio, que se constitui de um acúmulo de minério aderido nas paredes internas do vagão. Este estudo investiga o comportamento de aderência de dois tipos de minério de ferro, *pellet feed* e *sinter feed*, sob diferentes condições de saturações e geometria, visando identificar soluções para otimizar o processo de descarregamento. A caracterização dos minérios incluiu análises de densidade aparente, saturação, granulometria e microscopia, evidenciando as significativas diferenças entre os materiais. O *pellet feed* apresentou uma densidade aparente maior, uma uniformidade granulométrica superior com boa graduação no tamanho das partículas em comparação com o *sinter feed*, que possui maior variação no tamanho de partículas e alta desuniformidade em seus grãos. Os ensaios de aderência demonstraram que o *pellet feed* é mais aderente em baixos níveis de saturação, alcançando até 80% de aderência a partir de 15% de umidade, sobretudo em superfícies de acrílico e aço com diferentes geometrias. Por outro lado, o *sinter feed* exibiu um comportamento crescente de aderência com o aumento da saturação, com uma aderência abaixo de 10% especialmente nas superfícies de acrílico, aço e na chapa conformado no raio de 250mm, modificando seu comportamento nas chapas soldadas a 90°. Os resultados apontam que a geometria e o material das superfícies, combinados às condições de saturação, influenciam diretamente na aderência do minério, impactando os processos de descarregamento ferroviário. A compactação do minério com maiores teores de água foi maior para o *pellet feed* quando comparado ao mesmo minério seco. Em contrapartida, quanto mais água foi adicionada no *sinter feed*, menor foi sua compactação devido à dificuldade da expulsão do ar no interior do minério. Conclui-se que a adoção de geometrias otimizadas nas superfícies de contato, aliada ao controle da umidade no carregamento, é fundamental para reduzir a aderência e a compactação do minério durante o transporte ferroviário. Essas medidas agilizam o descarregamento, diminuem a necessidade de intervenção manual, aumentam a eficiência operacional, reduzem riscos aos operadores e geram economia nos custos logísticos.

Palavras-chave: transporte ferroviário; minério de ferro; aderência; compactação; caracterização de minério.

ABSTRACT

The railway transportation in Brazil plays a fundamental role in the outflow of iron ore, predominantly using gondola wagons. However, it faces operational challenges, particularly related to water accumulation and the formation of "rechego," which refers to the buildup of ore adhered to the internal walls of the wagons. This study investigates the adhesion behavior of two types of iron ore, *pellet feed* and *sinter feed*, under different saturation levels and surface geometries, aiming to identify solutions to optimize the unloading process. The characterization of the ores included analyses of bulk density, saturation, granulometry, and microscopy, highlighting significant differences between the materials. Pellet feed exhibited a higher bulk density and greater granulometric uniformity, with well-graded particle sizes when compared to sinter feed, which presented a wider particle size distribution and high irregularity in grain shapes. The adhesion tests revealed that *pellet feed* shows greater adhesion at lower saturation levels, reaching up to 80% adhesion from 15% moisture content, particularly on acrylic and steel surfaces with varying geometries. In contrast, *sinter feed* exhibited a progressive increase in adhesion with increasing saturation, maintaining adhesion below 10%, especially on acrylic, steel, and curved plates with a radius of 250 mm. However, its behavior changed when tested on welded plates at a 90° angle. The results indicate that the geometry and material of the surfaces, in combination with the saturation conditions, directly influence ore adhesion and consequently impact rail unloading processes. The compaction of ore with higher moisture content was more pronounced in *pellet feed* when compared to the same dry ore. Conversely, the addition of water to *sinter feed* led to lower compaction levels, due to difficulties in air displacement within the ore mass. It is concluded that the adoption of optimized contact surface geometries, together with moisture control during loading, is essential to reduce ore adhesion and compaction during rail transport. These measures accelerate the unloading process, reduce the need for manual intervention, enhance operational efficiency, minimize risks to operators, and result in significant savings in logistical costs.

Keywords: railway transportation; iron ore; adhesion; compaction; ore characterization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – EFC. (Fonte: adaptado da ANTT, 2022)	17
Figura 2 – EFVM. (Fonte: adaptado da ANTT, 2022)	18
Figura 3 – Vagão do tipo gôndola.....	19
Figura 4 – Índice pluviométrico em Canaã dos Carajás (PA). (Fonte: ClimaTempo, 2024)	20
Figura 5 – Índice pluviométrico em Barão de Cocais (MG). (Fonte: ClimaTempo, 2024)	20
Figura 6 – Acúmulo de minério dentro do vagão visto de cima.	22
Figura 7 – Três fases do material particulado: sólidos, água e ar: a) material disposto naturalmente e b) frações totais de cada constituinte.	24
Figura 8 – Diferentes graduações que compõe o material particulado. (Fonte: adaptado de CAPUTO, 2015)	27
Figura 9 – Curvas granulométricas com características distintas. (Fonte: CAPUTO, 2015)	28
Figura 10 – Quantidade de líquido no particulado: a) seco, b) estado pendular, c) funicular, d) capilaridade e e) polpa. (Fonte: adaptado de MITARAI e NORI, 2006)	33
Figura 11 – Minério de ferro do tipo <i>pellet feed</i>	34
Figura 12 – Minério de ferro do tipo <i>sinter feed</i>	35
Figura 13 – Agitador eletromagnético de peneiras.	35
Figura 14 – Provetas em acrílico.....	36
Figura 15 – Peneiras para ensaio de granulometria.....	36
Figura 16 – Microscópio óptico OPTECH.....	37
Figura 17 – Placas de acrílico e de aço planas para o ensaio de <i>Sticking</i>	37
Figura 18 – Junções internas críticas do vagão para formação de recheio: b) chapa plana; c) chapa fletida em um raio de 250mm e d) chapas soldadas em 90°.....	38
Figura 19 – Placa de aço com raio de 250mm para o ensaio de <i>Sticking</i>	39
Figura 20 - Placa de aço em ângulo de 90° para o ensaio de <i>Sticking</i>	39
Figura 21 – Protótipo do virador de vagão.	40
Figura 22 – Esquemático do ensaio de densidade aparente: (a) Adição do minério na proveta; (b) Agitação da proveta e (c) Minério compactado.	41
Figura 23 – Representação esquemática do ensaio de saturação: (a) Adição do minério sobre uma massa de água; (b) Agitação da proveta; (c) Minério adicionado sobre a lâmina de água e (d) Agitação da proveta sem aparição da lâmina d'água.	42
Figura 24 – Esquemático do ensaio de granulometria utilizando o agitador eletromagnético de peneiras.	44
Figura 25 – Representação esquemática do ensaio de <i>Sticking</i> : (a) Despejo da massa de minério; (b) Placa virada e (c) Massa aderida. (Fonte: adaptado de Alencar et al., 2021)	46
Figura 26 – Disposição das chapas com raio de 250mm e 90° para o ensaio de <i>Sticking</i>	46

Figura 27 – Esquemática do ensaio de compactação com água depositada inicialmente: (a) Adição de minério com água depositada; (b) Agitação da proveta e (c) Minério compactado com lâmina d'água na superfície.....	48
Figura 28 – Esquemática do virador de vagão.	49
Figura 29 – Densidade aparente para ambos os minérios.....	50
Figura 30 – Concentração mássica de água para atingir 100% de saturação para ambos os minérios.	51
Figura 31 – Curva granulométrica de <i>sinter feed</i> e <i>pellet feed</i>	52
Figura 32 – Índice de <i>Sticking</i> por saturação do <i>pellet feed</i> com acrílico.	54
Figura 33 - Índice de <i>Sticking</i> por saturação do <i>sinter feed</i> com acrílico.	54
Figura 34 – Comparações entre ensaios de aderência do <i>pellet feed</i> no acrílico.	55
Figura 35 – Comparações entre ensaio de aderência do <i>sinter feed</i> no acrílico.	56
Figura 36 - Índice de <i>Sticking</i> do <i>pellet feed</i> com aço plano.	57
Figura 37 – Índice de <i>Sticking</i> do <i>pellet feed</i> com aço com raio de 250mm.	58
Figura 38 - Índice de <i>Sticking</i> do <i>pellet feed</i> com aço com angulação de 90°.	58
Figura 39 - Comparações entre ensaio de aderência do <i>pellet feed</i> no aço plano.	59
Figura 40 – Comparação de adesão do <i>pellet feed</i> nas placas soldadas perpendicularmente.....	60
Figura 41 - Índice de <i>Sticking</i> do <i>sinter feed</i> com aço plano.	61
Figura 42 - Índice de <i>Sticking</i> do <i>sinter feed</i> com aço com raio de 250mm.	62
Figura 43 - Índice de <i>Sticking</i> do <i>sinter feed</i> com aço com angulação de 90°.	62
Figura 44 - Comparações entre ensaio de aderência do <i>sinter feed</i> no aço plano.	64
Figura 45 - Comparação de adesão do <i>sinter feed</i> nas placas soldadas perpendicularmente.....	65
Figura 46 – Compactação de <i>pellet feed</i> com diferentes níveis de água antes do carregamento.	66
Figura 47 - Compactação de <i>sinter feed</i> com diferentes níveis de água antes do carregamento.	66
Figura 48 – Massa aderida e compactação percentual do <i>pellet feed</i> no vagão em acrílico de diferentes condições de carregamento.	67
Figura 49 - Massa aderida e compactação percentual do <i>sinter feed</i> no vagão de acrílico em diferentes condições de carregamento.	68
Figura 50 - Comparação de adesão do minério no vagão com 2% e 8% de água carregada antes do <i>pellet feed</i>	69
Figura 51 – Comparação de adesão do minério no vagão com 0% e 8% de água carregada antes do <i>sinter feed</i>	70
Figura 52 – Granulometria para calcular parâmetros de caracterização do <i>pellet feed</i>	79
Figura 53 – Granulometria para calcular parâmetros de caracterização do <i>sinter feed</i>	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem de peneiras no ensaio granulométrico.	43
Tabela 2 – Lista de saturações do ensaio de <i>Sticking</i>	45
Tabela 3 – Características da composição granulométrica dos minérios.	52
Tabela 4 – Granulometria do <i>pellet feed</i> para cálculo de diâmetro médio de Sauter.	76
Tabela 5 - Granulometria do <i>sinter feed</i> para cálculo de diâmetro médio de Sauter.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	-	Agência Nacional de Mineração
ANTT	-	Agência Nacional de Transportes Terrestres
EFC	-	Estrada de Ferro Carajás
EFVM	-	Estrada de Ferro Vitória-Minas
GDE	-	Vagão com bordas e fundo fixo para descarga com giro com peso bruto entre 80t e 100t
IBGE	-	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MT	-	Ministério dos Transportes
NBR	-	Norma Brasileira

LISTA DE SÍMBOLOS

a	-	Constante que corrige as forças de atração entre as moléculas
b	-	Volume de um mol de moléculas
C_c	-	Coeficiente de Curvatura
C_u	-	Coeficiente de Uniformidade
C_w	-	Concentração mássica de água
d_{10-60}	-	Diâmetro de 10% a 60% da massa passante
\bar{D}_{pi}	-	Diâmetro médio da partícula
\bar{D}_S	-	Diâmetro médio de volume-superfície
F_{ad}	-	Força total de adesão
F_c	-	Força de capilaridade
F_{es}	-	Força eletrostática
F_{vdw}	-	Força de van der Waals
k_e	-	Constante eletrostática
m	-	Massa
m_a	-	Massa de água
m_m	-	Massa do material após a secagem
mm	-	Milímetros
n	-	Número de mols
P	-	Pressão
q	-	Carga elétrica da partícula
R	-	Constante dos gases ideais
r	-	Distância entre as cargas elétricas
S	-	Grau de saturação
T	-	Temperatura
V_a	-	Volume de água
V_{ap}	-	Volume
V_v	-	Volume de vazios
x_i	-	Fração mássica em um dado incremento
z	-	Número de incrementos
μm	-	Micrometros

ρ_{ap} - Densidade aparente

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
1.1	Importância	17
1.2	Problemática	21
1.3	Justificativa	22
1.4	Objetivos	22
1.4.1	Objetivo geral.....	22
1.4.2	Objetivos específicos	23
1.5	Fundamentação Teórica.....	23
1.5.1	Compactação.....	23
1.5.2	Densidade Aparente	24
1.5.3	Grau de Saturação e Umidade	25
1.5.4	Granulometria e Microscopia	26
1.5.5	Aderência.....	30
2.	MATERIAS E MÉTODOS	34
2.1	Materiais	34
2.1.1	Minério de Ferro.....	34
2.1.2	Equipamentos	35
2.1.3	Protótipo de Virador de Vagão	39
2.2	Métodos	40
2.2.1	Ensaio de Caracterização de Minério	40
2.2.1.1	Densidade Aparente	40
2.2.1.2	Saturação	41
2.2.1.3	Granulometria e Microscopia.....	42
2.2.2	Ensaio de Sticking	44
2.2.3	Compactação de minério com água depositada	47
2.2.4	Protótipo de virador de vagão.....	48
3.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
3.1	Ensaio de Caracterização de Minério.....	50
3.1.1	Densidade Aparente	50
3.1.2	Saturação	50
3.1.3	Granulometria e Microscopia	51
3.2	Ensaio de <i>Sticking</i>	53
3.2.1	Acrílico	53

3.2.2	<i>Pellet feed</i> com Aço	57
3.2.3	<i>Sinter feed</i> com Aço	61
3.3	Compactação de minério com água depositada	65
3.4	Protótipo de virador de vagão	67
4.	CONCLUSÕES	71
5.	REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância

No ano de 2022, a produção de minério de ferro no Brasil foi de 457 milhões de toneladas e a produção comercializada rendeu 163 bilhões de reais às mineradoras (ANM, 2023). Além disso, no mesmo período o minério de ferro ocupou a terceira posição no ranking dos principais produtos e serviços industriais do país com 3,1% de participação na receita líquida de vendas (IBGE, 2024).

O transporte do minério de ferro no país, caracteriza-se por ser principalmente realizado por malhas ferroviárias, pela sua capacidade de transportar grandes volumes com uma alta eficiência energética, sendo que nos anos de 2022 e 2023, este produto foi responsável por cerca de 72% de participação da movimentação total de cargas no modal ferroviário (MT, 2024). A Estrada de Ferro Carajás - EFC (Figura 1) e a Estrada de Ferro Vitória à Minas - EFVM (Figura 2) são as duas principais linhas de escoamento do produto entre as minas produtoras e os portos de exportação (ANTT, 2024).

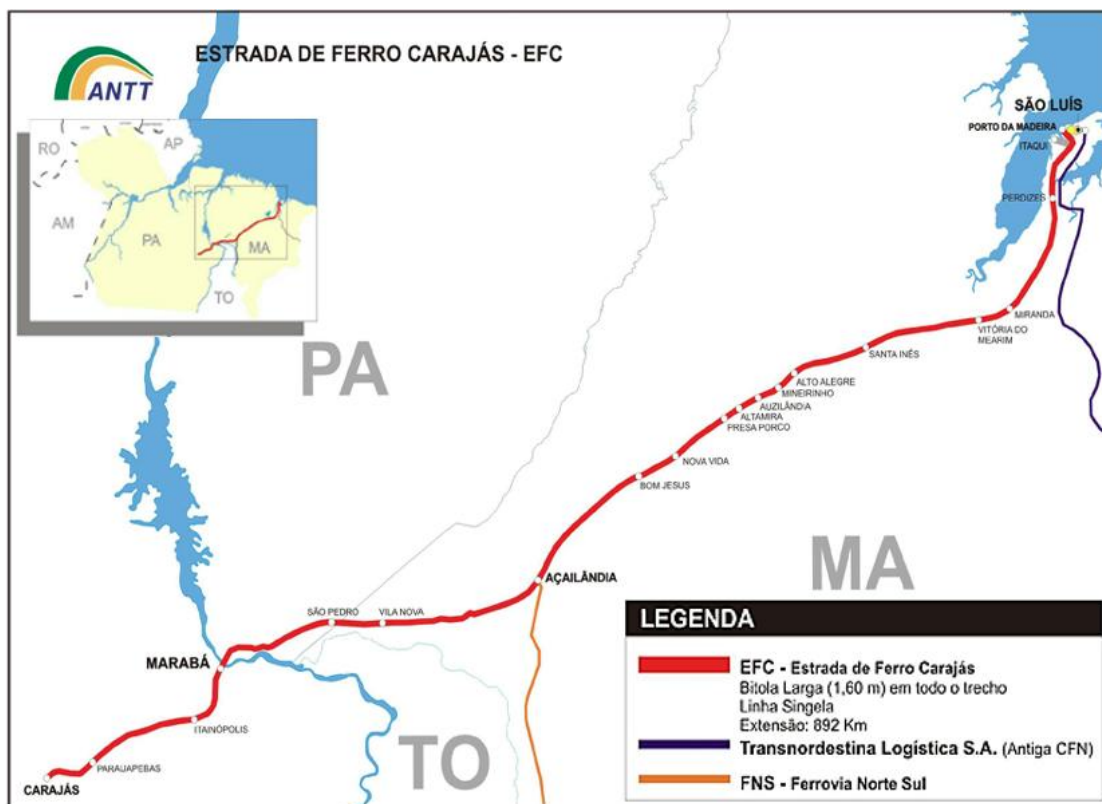


Figura 1 – EFC. (Fonte: adaptado da ANTT, 2022)



Figura 2 – EFVM. (Fonte: adaptado da ANTT, 2022)

Os vagões que transportam esse tipo de minério entre os pontos de extração e porto de exportação ou indústrias de processamento, normalmente são do tipo gôndola (Figura 3), abertos na parte superior, onde a carga fica exposta às intempéries climáticas durante toda a logística, o que facilita o manuseio nas etapas de carregamento e descarregamento (SEMYKINA et al., 2021).



Figura 3 – Vagão do tipo gôndola.

O vagão possui essa característica devido o processo de carregamento e descarregamento do minério que ocorre em um virador de vagão. A classificação com a inicial da sigla “GD”, são vagões com bordas e fundos fixos para descarga por giro, como os vagões GDE utilizados na EFVM, por exemplo. Essa sigla é determinada segundo a norma ABNT NBR 11691:2024 (ABNT, 2024), que estabelece a classificação, identificação e marcação dos diferentes vagões.

No Brasil, em razão da sua natureza tropical, a incidência de chuvas é elevada ao longo de toda sua extensão territorial. Na mina de extração de Carajás, onde se inicia a EFC, o índice pluviométrico pode ser observado na Figura 4, e na mina de Brucutu, onde se inicia a EFVM, tal índice pode ser verificado na Figura 5.

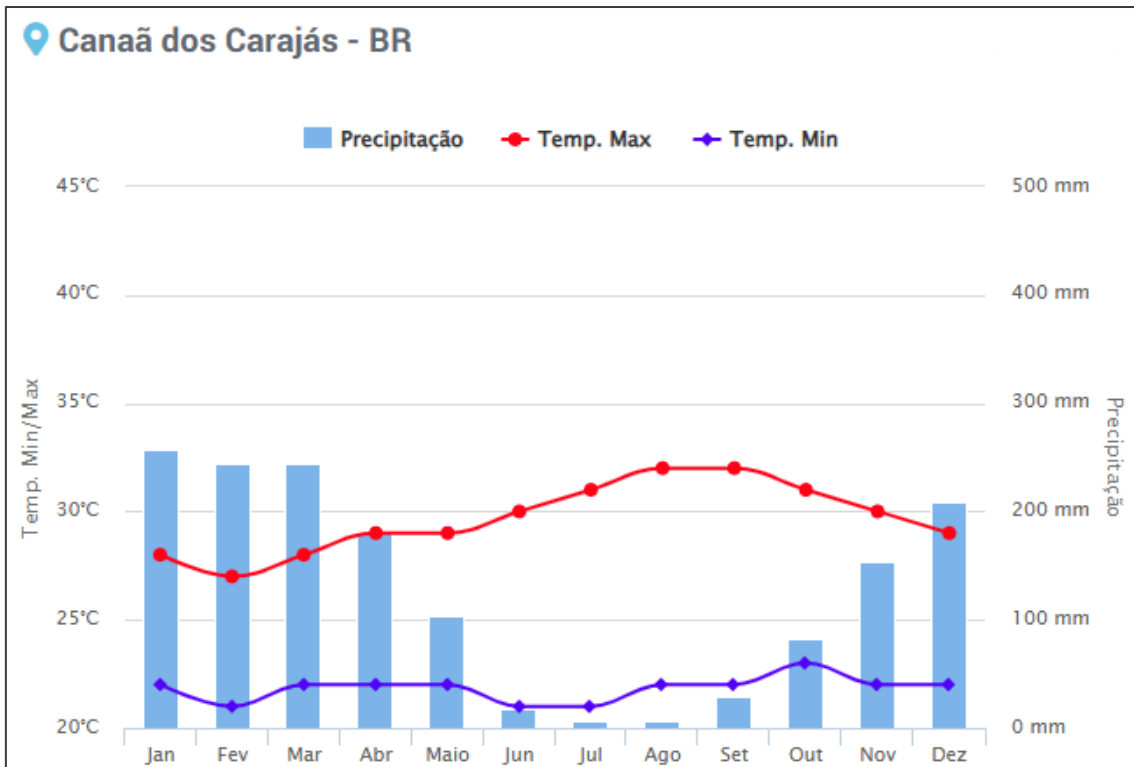


Figura 4 – Índice pluviométrico em Canaã dos Carajás (PA). (Fonte: Climatempo, 2024)

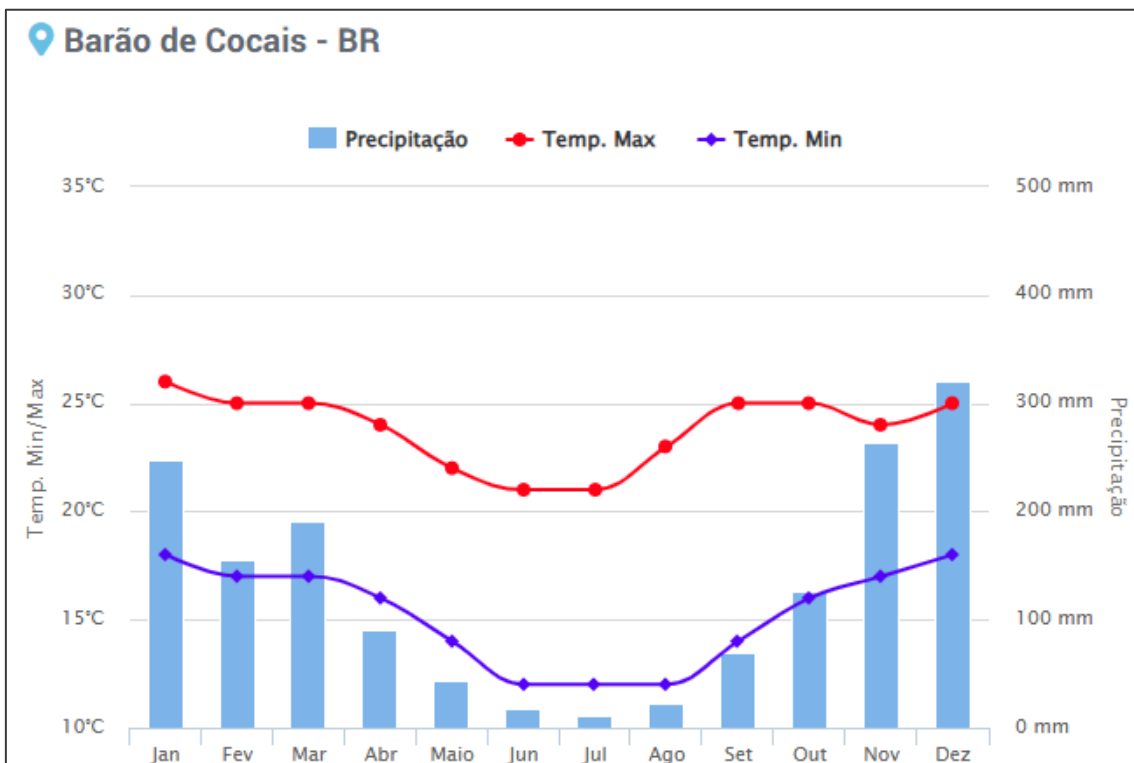


Figura 5 – Índice pluviométrico em Barão de Cocais (MG). (Fonte: Climatempo, 2024)

A água acumulada nos vagões conta com uma grande dificuldade de ser escoada pelos drenos, localizados no assoalho e, às vezes, nas cabeceiras do

vagão. Esta dificuldade se deve ao entupimento dos drenos pelos finos de minério que ali ficam aderidos, impedindo a diminuição da umidade da carga. Com o objetivo de aumentar a eficiência da drenagem no transporte do minério no modal ferroviário, a empresa VALE S.A. em parceria com a Unisanta firmou um acordo para financiamento de pesquisas que envolvam proposições de métodos de avaliação de drenagem em vagão de minério. Este projeto de mestrado envolve uma das esferas de avaliação do problema a ser mitigado, no tocante à aderência de minério às chapas do vagão e acúmulo de água de fundo antes do carregamento, devido ao entupimento de drenos localizados no assoalho.

1.2 Problemática

Em virtude das fortes chuvas ao longo do ano e das etapas de armazenamento e transporte do minério de ferro serem realizadas a céu aberto, ocorre um acúmulo excessivo de água no minério em toda cadeia logística entre a mina e os terminais de exportações. Se a drenagem for ineficiente, o minério dentro dos vagões chega à supersaturação facilmente durante os períodos chuvosos e ocorre o acúmulo da água excedente sobre a carga, sendo denominada água livre.

Ao mesmo tempo, a dinâmica de movimento do vagão no transporte ferroviário propicia vibrações, intrínsecas ao processo, causando a compactação do minério no interior do vagão. Esta acomodação das partículas pode ser mais intensa em cenários onde há acúmulo de água sobre a carga ou quando a carga é depositada sobre camadas de água, acumuladas no fundo de um vagão devido ao entupimento dos drenos anteriormente mencionado.

A conjuntura destes fatos proporciona a formação de recheço, que é o minério residual aderido nas paredes internas do vagão, majoritariamente concentrado nas quinas e arestas (ponto de convergência) das chapas de aço que compõem a estrutura. Este acúmulo causa atrasos no descarregamento do minério de dentro do vagão devido a necessidade de interferência manual para eliminação do recheço e limpeza do vagão (Figura 6), bem como o nivelamento da carga para mitigar o risco de descarrilamento ou tombamento do vagão ao longo da ferrovia, como descrito por Maia et al. (2012).



Figura 6 – Acúmulo de minério dentro do vagão visto de cima.

1.3 Justificativa

O custo da mão de obra necessária para o retrabalho e remoção de recheio nos vagões, paralisação da linha férrea, diminuindo a produtividade, além da escassez de dados na literatura que auxiliem no entendimento da ocorrência de tais fenômenos, motivaram este estudo sobre:

- a) O comportamento do minério em relação à aderência às superfícies do vagão com diferentes geometrias;
- b) A correlação da compactação para diferentes níveis de saturação de água;
- c) Os efeitos de acúmulo de água no fundo do vagão na compactação e aderência.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O trabalho visou realizar uma análise quantitativa e qualitativa da aderência de minério de ferro em superfícies de aço com diferentes geometrias e avaliar os efeitos do acúmulo de água no fundo do vagão sobre a compactação,

formação de água livre e formação de recheio em um virador em escala reduzida.

1.4.2 Objetivos específicos

Com intuito de efetivar o objetivo geral, foram designados tais objetivos específicos:

- a) Levantamento atualizado da literatura referente às principais pesquisas relacionadas à compactação e aderência de minérios;
- b) Caracterização física dos dois principais minérios de ferro transportados no Brasil: *sinter feed* e *pellet feed*;
- c) Elaboração de superfícies com as geometrias plana, curva e de ângulo reto para ensaios de adesão;
- d) Realização de ensaios de aderência dos minérios para uma ampla faixa de variação de saturação de água;
- e) Análise de diferentes cenários de carregamento de minério em relação aos níveis de água de fundo e efeitos sobre os níveis de compactação em provetas;
- f) Desenvolvimento de um protótipo de um virador de vagão em escala reduzida a fim de simular experimentalmente a formação de recheio;
- g) Avaliação da adesão do minério em cenários com carregamento sobre diferentes volumes de água previamente acumulada no fundo do vagão.

1.5 Fundamentação Teórica

1.5.1 Compactação

Durante o transporte ferroviário, as vibrações geradas pelo movimento dos vagões promovem a compactação do minério de ferro, constituído de material granulado. De acordo com a sua geometria, a presença de espaços entre partículas constitui os vazios, que podem ser parcialmente ou totalmente preenchido por água quando úmidos, como ilustra a Figura 7 (CAPUTO, 2015). A percolação consiste na passagem da água pelos espaços vazios entre os grãos do sólido granulado, como o minério de ferro. Na letra (a) da Figura 7, é possível verificar esquematicamente um sólido granulado parcialmente úmido e,

na letra (b) da mesma figura, o mesmo particulado separado nas frações que o compõe quanto à água, ar e sólido.

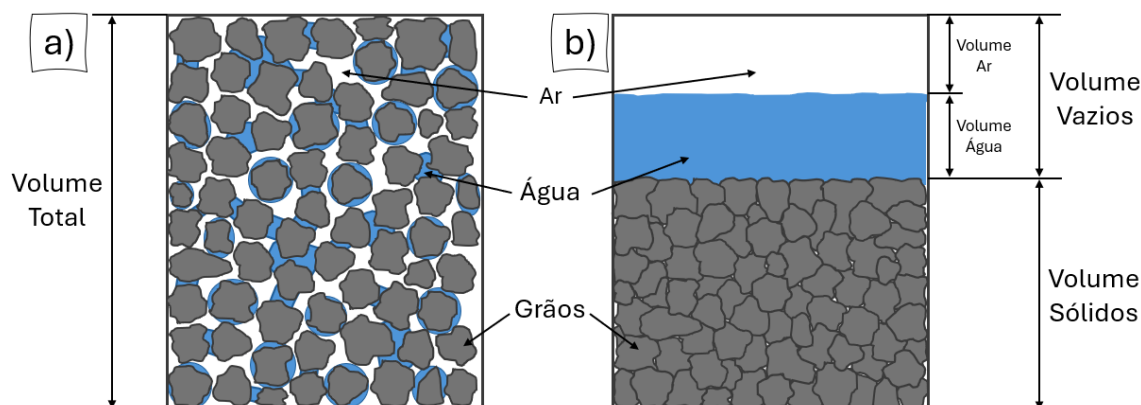


Figura 7 – Três fases do material particulado: sólidos, água e ar: a) material disposto naturalmente e b) frações totais de cada constituinte.

Na compactação as quantidades de sólidos e de água permanecem constantes. O aumento da densidade corresponde à eliminação dos vazios, causada por uma vibração, que depende fundamentalmente da energia dispendida e do teor de umidade, podendo alterar diversas propriedades como: aumentar a rigidez do particulado, diminuir o volume ocupado, reduzir a permeabilidade e percolação, entre outros (CAPUTO, 2015; PINTO, 2006). Na ferrovia, a vibração pode ser causada pela própria dinâmica do transporte dos vagões pelos trilhos, propiciando uma compactação do minério de ferro.

1.5.2 Densidade Aparente

A densidade do material é importante por influenciar diretamente no comportamento do minério durante o transporte, armazenagem e descarregamento, além de impactar o cálculo de carga útil nos vagões. O minério de ferro é um material granulado com grande variação entre os grãos em tamanho e geometria. Partículas de mesmo volume podem apresentar massas ou pesos distintos. Para exprimir com precisão tal dessemelhança, foi necessário criar uma grandeza chamada densidade, representando massas de diferentes substâncias em unidade de volume (NUSSENZVEIG, 2013).

Ao compactar o minério de ferro para eliminação máxima dos vazios de forma que ele ocupe o menor volume para uma mesma massa, obtém-se a

densidade aparente, que considera o volume das partículas mais o volume dos vazios, definido pela Equação 1 (CHAVES, 2022; SERWAY, JUNIOR, 2014).

$$\rho_{ap} = \frac{m}{V_{ap}} \quad (1)$$

Sendo:

ρ_{ap} a densidade aparente [g/cm³];

m a massa [g];

V_{ap} o volume [cm³].

1.5.3 Grau de Saturação e Umidade

A presença de água nos vagões de minério implica na absorção da água pelo próprio material particulado e nos comportamentos de adesão em superfícies, compactação, carregamento e descarregamento. Quando os vazios e poros nas partículas do minério estão desprovidos de água, o material é considerado completamente seco, não apresentando umidade. A presença de água, oriunda de chuvas, umidade atmosférica ou adição intencional, preenche então os espaços vazios entre as partículas, alterando o comportamento do minério de ferro. À medida em que a água ocupa os espaços vazios, esse acúmulo encontra um ponto máximo de retenção quando todos os poros e vazios existentes são preenchidos por ela, chamado de saturação máxima (VARGAS, 1977). A partir desse ponto, todo diferencial de água adicionado transforma-se em água livre, sobressalente e não intrínseca no minério, conhecido também como supersaturação. Define-se o grau de saturação a partir da Equação 2 (CAPUTO, 2015).

$$S = \frac{V_a}{V_v} \cdot 100\% \quad (2)$$

Sendo:

S o grau de saturação [%];

V_a o volume de água [mm³];

V_v o volume de vazios [mm³].

O controle de umidade no minério de ferro é um fator crítico para a segurança e eficiência do transporte, tanto marítimo quanto ferroviário. Normas internacionais estabelecem limites rigorosos para evitar a liquefação do material durante o transporte marítimo (MUNRO, MOHAJERANI, 2015). Um dos aspectos que influenciam diretamente no teor de umidade é a distribuição do tamanho de partículas do material granulado. Quando partículas maiores se misturam com partículas menores, elas tendem a se reorganizar de maneira mais compacta, afetando o volume de vazios entre grãos. Esse empacotamento de partículas influencia diretamente a retenção de umidade, pois altera a forma como a água ocupa os espaços entre as partículas (FERREIRA, LIMA, 2023).

O teor de umidade representa a proporção de água presente em uma substância, expressa em termos percentuais (SEVERINO, LUZ, 2019). A técnica mais utilizada para essa determinação, conforme Daihao et al. (2025), é o método de secagem, no qual o material é pesado antes e após o processo de secagem. Essa concentração mássica pode ser expressa em base seca ou base úmida: a base seca refere-se à razão entre a massa de água e a massa do material seco, enquanto a base úmida, empregada neste estudo, é definida conforme apresentado na Equação 3.

$$C_w = \frac{m_a}{m_a + m_m} \cdot 100\% \quad (3)$$

Sendo:

C_w a concentração mássica de água [%];

m_a a massa de água [g];

m_m a massa do material após a secagem [g].

1.5.4 Granulometria e Microscopia

Para compreender as propriedades físicas de materiais granulados, como o minério de ferro, é essencial analisar o tamanho e a forma das partículas que os compõem. Essa análise pode indicar comportamentos de percolação, aderência e compactação e começa com a granulometria por peneiramento, onde o material é separado em diferentes frações de tamanho por meio de um conjunto de peneiras com aberturas graduais, empilhadas de forma ordenada. O

material retido em cada peneira é quantificado em porcentagem, o que permite avaliar a uniformidade e a homogeneidade do minério com base nos tamanhos médios das partículas.

De acordo com Pascoal et al. (2016), a variação no tamanho das partículas exerce influência direta nos processos de produção de *sinter feed* e *pellet feed*, sendo a granulometria um fator determinante para atender aos requisitos de qualidade e otimizar a eficiência operacional. A correta classificação granulométrica permite direcionar adequadamente as frações do minério, maximizando o aproveitamento do ferro e assegurando o desempenho dos processos siderúrgicos subsequentes.

Os resultados dessa análise granulométrica são representados graficamente por meio de uma curva granulométrica, traçada em um diagrama semi-logarítmico ou sob forma de tabelas (LUZ, SAMPAIO, FRANÇA, 2010; VARGAS, 1977). Essa curva permite identificar diferentes granulometrias, diferenciando, por exemplo, a presença de partículas finas e grossas. Na Figura 8, são ilustradas algumas dessas variações na graduação granulométrica.

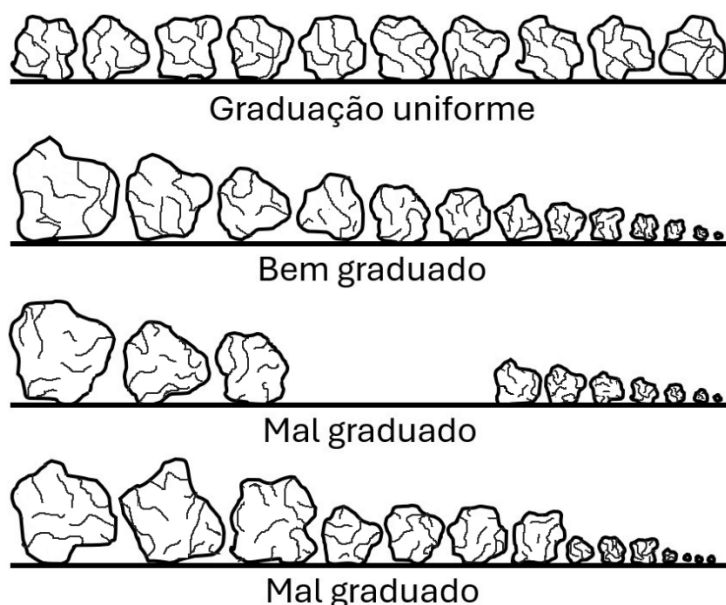


Figura 8 – Diferentes graduações que compõe o material particulado. (Fonte: adaptado de CAPUTO, 2015)

A curva granulométrica (Figura 9), conforme Allen-Hazen (apud Caputo, 2015), possibilita visualizar o comportamento de granulometrias bem graduadas

(curva A), mal graduadas (curva B) e com granulometria uniforme (curva C); além disso, permite também definir dois parâmetros importantes: o diâmetro efetivo e o grau de uniformidade. O diâmetro efetivo indica o quão fino é o material e serve como uma medida da permeabilidade do particulado. Quanto maior ele for, melhor é a permeabilidade. Ele é representado pelo valor de d_{10} , que corresponde ao diâmetro em que 10% da massa total do material passa pelas peneiras.

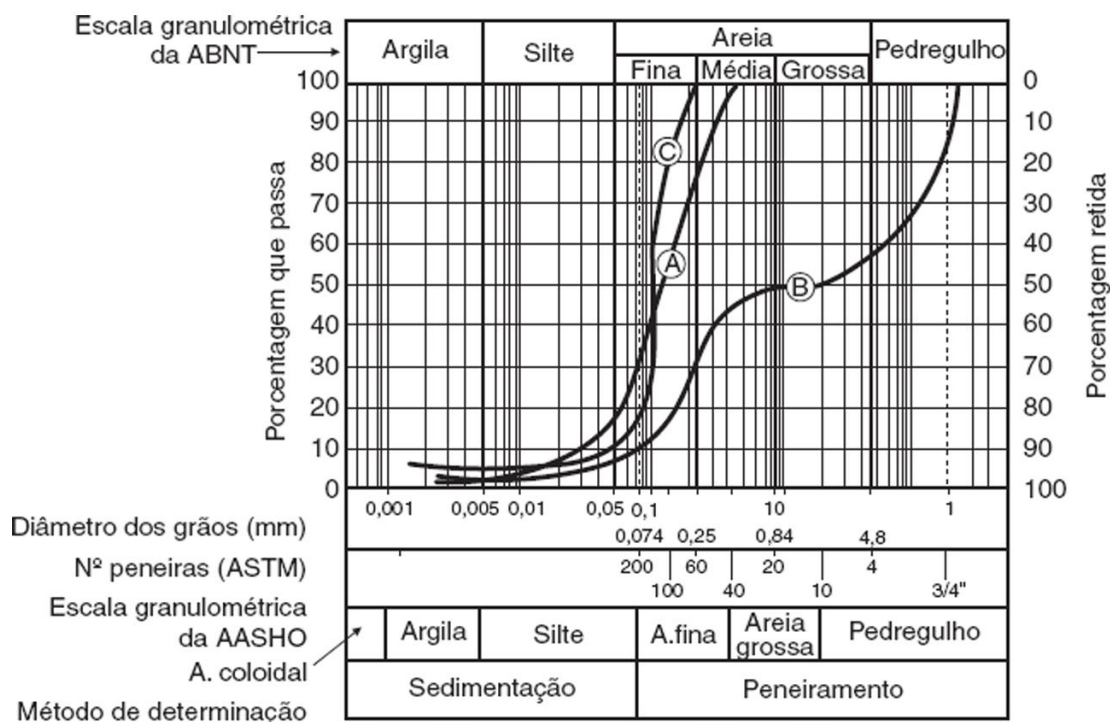


Figura 9 – Curvas granulométricas com características distintas. (Fonte: CAPUTO, 2015)

Por sua vez, o grau de uniformidade reflete a inclinação média das curvas granulométricas (VARGAS, 1977). Pode ser chamado também de grau de desuniformidade, pois quanto maior o seu valor, mais desuniforme o material é. O coeficiente de uniformidade, representado por C_u , pode ser calculado por meio da Equação 4, com os valores obtidos diretamente a partir da curva granulométrica. Quanto menor for o seu valor, mais uniforme é o material. Consideram-se de uniformidade média se $5 < C_u < 15$, muita uniformidade quando menor que 5 e desuniforme acima de 15. (CAPUTO, 2015).

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

Sendo:

C_u o coeficiente de uniformidade [adimensional];

d_{60} o diâmetro correspondente a 60% da massa total [mm];

d_{10} o diâmetro correspondente a 10% da massa total [mm].

Foi definido o coeficiente de curvatura através da Equação 5, para indicar uma má graduação por uniformidade central ou por uma descontinuidade nos tamanhos dos grãos. Para boa graduação seu valor deve ser compreendido entre 1 e 3 (CAPUTO, 2015).

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} \quad (5)$$

Sendo:

C_c o coeficiente de curvatura [adimensional];

d_{30} o diâmetro correspondente a 30% da massa total [mm];

d_{60} o diâmetro correspondente a 60% da massa total [mm];

d_{10} o diâmetro correspondente a 10% da massa total [mm].

Outro parâmetro fundamental para caracterizar materiais particulados é o diâmetro médio das partículas que o compõe. Nomeado de diâmetro médio de Sauter, foi definido como o tamanho médio da partícula que possui a relação entre volume e área superficial equivalente à de todas as partículas da amostra (KOWALCZUK, DRZYMALA, 2016). Desta maneira, é possível avaliar o tamanho do material considerando simultaneamente sua forma e distribuição, refletindo a uniformidade de sua granulometria (CREMASCO, 2012). O diâmetro médio de volume-superfície foi evidenciado na Equação 6 (MCCABE, 2009).

$$\bar{D}_S = \frac{1}{\sum_{i=1}^z \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} \quad (6)$$

Sendo:

\bar{D}_S o diâmetro médio de volume-superfície [mm];

z o número de incrementos [adimensional];

x_i a fração mássica em um dado incremento [adimensional];
 \bar{D}_{pi} o diâmetro médio da partícula, tomado como a média aritmética dos menores e maiores diâmetros de partícula em cada incremento [mm].

Adicionalmente, com o auxílio de um microscópio óptico é possível analisar a regularidade das formas das partículas estratificadas no peneiramento, qualificando sua morfologia (FURAT et al., 2018). Essas informações são cruciais para entender características como o comportamento do minério no preenchimento dos espaços intersticiais.

1.5.5 Aderência

A atração física entre as moléculas de materiais diretamente em contato resulta na união de superfícies, e fatores como umidade, granulometria, rugosidade e temperatura afetam a sua intensidade, assim como diferenciam a influência das interações envolvidas. Em um estudo de carregamento de minério utilizando uma correia transportadora com *sinter feed* seco e úmido, o ângulo de carregamento foi alterado e a perda mássica de minério foi quantificada. Em ângulos maiores de carregamento, o minério úmido evidenciou uma menor perda, revelando a significativa influência da umidade na adesão das partículas entre si para um sistema de logística vastamente empregado no setor de mineração (FLORENCE et al., 2023).

De modo geral, segundo Petean e Aguiar (2015) e You e Wan (2013), as principais forças que atuam na adesão entre partículas e superfícies são a força eletrostática, a força de van der Waals e a força capilar. A adesão total observada é resultante da interação combinada dessas três forças, cuja intensidade varia conforme as características do material, o teor de umidade e as propriedades da superfície em contato. A força total de adesão foi descrita na Equação 7 (PETEAN, AGUIAR, 2015; YOU, WAN, 2013).

$$F_{ad} = F_{vdw} + F_c + F_{es} \quad (7)$$

Sendo:

F_{ad} a força total de adesão [N];

F_{vdw} a força de van der Waals [N];

F_c a força de capilaridade [N];

F_{es} a força eletrostática [N].

A força eletrostática caracteriza-se pela presença de cargas elétricas pontuais que se atraem mutuamente, podendo ser provocadas pelo choque entre partículas ou pela presença de um campo elétrico, quando opostas. Além disso, é influenciada pela distância dessas partículas entre si (HALLIDAY, RESNICK, 2016). A força eletrostática foi descrita pela Lei de Coulomb na Equação 8 (YOUNG, FREEDMAN, 2015).

$$|F_{es}| = k_e \frac{|q_1 \cdot q_2|}{r^2} \quad (8)$$

Sendo:

F_{es} a força eletrostática [N];

k_e a constante eletrostática [$N \cdot m^2 / C^2$];

q_1 e q_2 a carga elétrica das partículas 1 e 2 [C];

r a distância entre as cargas elétricas [m].

No entanto, em ambientes com alta umidade, a força eletrostática tende a ser reduzida devido à diminuição do potencial eletrostático, o que faz com que sua influência seja menor em comparação com outras forças, como a de van der Waals e a capilar (YOU, WAN, 2013). Nessas condições, especialmente em ambientes atmosféricos comuns, essas duas forças passam a ter um papel mais relevante na adesão entre partículas e superfícies. Cargas concentradas geradas pela movimentação de elétrons que acontece de maneira aleatória, conhecida como dipolos, determinam a força de van der Waals, que pode ser intersuperficial ou intermolecular. Essa interação molecular ocorre em superfícies, átomos ou moléculas, e a intensidade depende da distância entre elas (ATKINS, 2018). A força de atração acontece quando duas moléculas apolares se aproximam entre si, formando flutuações dos momentos dipolares que tendem a se sincronizar (TIPLER, LLEWELLYN, 2019). Mesmo sendo de baixa intensidade quando comparada a outros tipos de interações, como as ligações químicas iônica e covalente, quando são cumulativas, é essencial para compreender os fenômenos de adesão e da capilaridade (BROWN et al., 2016). Tal fenômeno é utilizado frequentemente com gases, mas quando é comprimido

suficientemente, o gás pode se liquefazer. Uma vez liquefeito, o fluido tende a resistir à compressão, assim como acontece com os sólidos (NUSSENZVEIG, 2013). A força de van der Waals foi descrita na Equação 9 (YOUNG, FREEDMAN, 2016).

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2} \right) \cdot (V - nb) = nRT \quad (9)$$

Sendo:

P a pressão [N/m²];

a a constante que corrige as forças de atração entre as moléculas [J.m³/mol²];

b o volume de um mol de moléculas [m³/mol];

V o volume total [m³];

n o número de mols [mol];

R a constante dos gases ideais [J/mol.K];

T a temperatura [K].

As forças capilares exercem uma significativa influência no comportamento de partículas sólidas no controle de aglomeração e retenção de umidade (PAYAM, 2023; YANG, HEINICHEN, VELANKAR, 2018). Segundo Tang et al. (2018), quando a água entra em contato com o minério, ela é conduzida para o interior do material por meio de forças capilares que atua para unir as partículas. A capilaridade é a capacidade de fazer com que um fluido incompressível percorra os espaços intersticiais do material granulado contra o sentido gravitacional, devido a dois tipos de interação: a adesão e a coesão. Essa força é criada através do contato do fluido com a superfície sólida (AZEVEDO, 2013). A afinidade entre moléculas distintas, no caso água e partículas do minério, é chamada de força de adesão; enquanto a força de coesão é a atração intermolecular entre partículas semelhantes, especificamente as moléculas da água. De acordo com Kan, Nakamura e Watano (2016), o estudo de aderência partículas em colisão por meio de gotas, demonstrou que partículas mais hidrofílicas possuem uma maior probabilidade de aderência, influenciada pela formação de pontes capilares mais fortes. Dependendo da quantidade de líquido com a qual o particulado está em contato, são

evidenciados na Figura 10 quatro regimes: o estado pendular, funicular, estado de capilaridade e de polpa (MITARAI, NORI, 2006). Ambas as forças atuam em sentidos opostos, sendo que se a força de coesão for inferior à força de adesão, a água tende a preencher os espaços vazios interagindo favoravelmente com o sólido granulado; causando a ascensão desse fluido pelos poros se a proporção de seus tamanhos for relativamente pequena.

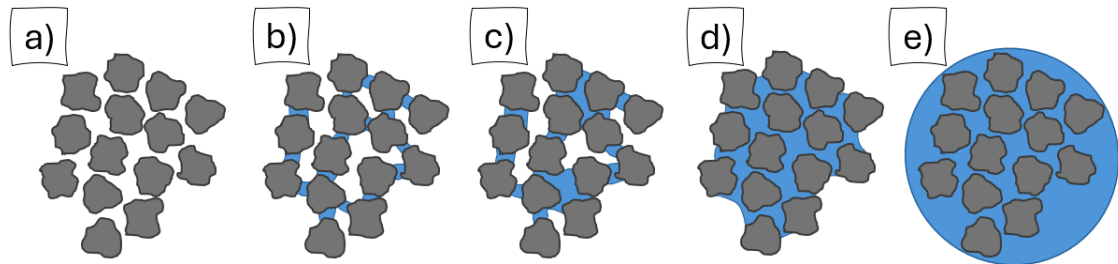


Figura 10 – Quantidade de líquido no particulado: a) seco, b) estado pendular, c) funicular, d) capilaridade e e) polpa. (Fonte: adaptado de MITARAI e NORI, 2006)

2. MATERIAS E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho se divide em três etapas. A primeira foi a caracterização dos minérios de ferro estudados. A segunda foi uma adaptação do estudo realizado por Alencar et al. (2021) sobre o índice de *Sticking* ou de aderência do minério em diferentes superfícies e geometrias. Por fim, foi o desenvolvimento e adaptação de um virador de vagão em escala reduzida para descarregamento de minério de ferro, proposto por Cosentino (2018) e verificação da aderência e compactação em diferentes cenários de carregamento com água previamente adicionada, assim como acontecem com os vagões em períodos chuvosos.

2.1 Materiais

2.1.1 Minério de Ferro

Foram utilizados neste trabalho os minérios de ferro do tipo *pellet feed* e *sinter feed*, conforme pode-se observar na Figura 11 e na Figura 12.



Figura 11 – Minério de ferro do tipo *pellet feed*.



Figura 12 – Minério de ferro do tipo *sinter feed*.

2.1.2 Equipamentos

Para os ensaios de granulometria, densidade aparente, saturação e compactação com água depositada, foi utilizado um agitador eletromagnético de peneiras modelo SP-1100 SPLABOR, conforme a Figura 13.



Figura 13 – Agitador eletromagnético de peneiras.

Para realização dos ensaios de densidade aparente, saturação e compactação com água depositada, 4 provetas foram confeccionadas em acrílico com geometria cilíndrica com diâmetros internos de 44mm, 48mm, 53mm e 114mm, conforme a Figura 14. Respectivamente, a altura das 3 provetas menores é de aproximadamente 250mm. A proveta com maior diâmetro, possui uma altura de 445mm. Desta forma, a variação volumétrica de cada proveta

permite uma análise estatística a partir de diferentes massas de minérios e superfícies internas distintas, diminuindo a influência da granulometria dos particulados mais grosseiros aos mais finos dos minérios.

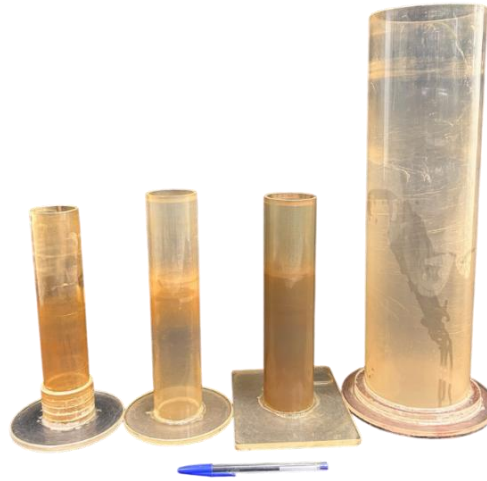


Figura 14 – Provetas em acrílico.

Para o ensaio de granulometria, foi utilizado um jogo de 28 peneiras de 8 polegadas de diâmetro com frestas variando entre 0,020 mm e 31,5mm, demonstrado na Figura 15.



Figura 15 – Peneiras para ensaio de granulometria.

Para uma melhor análise dos diferentes grãos dos minérios de ferro, o microscópio da marca OPTECH foi utilizado, conforme a Figura 16.



Figura 16 – Microscópio óptico OPTECH.

Foram empregadas para a determinação do índice de *Sticking*, placas de dois materiais distintos, com configurações de geometria diferentes e dimensões de 500x500mm. Foi utilizada uma placa plana confeccionada em acrílico (a), conforme a Figura 17. O motivo deste ensaio foi avaliar o comportamento do minério sobre uma placa com baixa rugosidade a contrapor com superfície em aço austenítico 316 (b), onde esperou-se que a rugosidade maior favorecesse a aderência de minério.

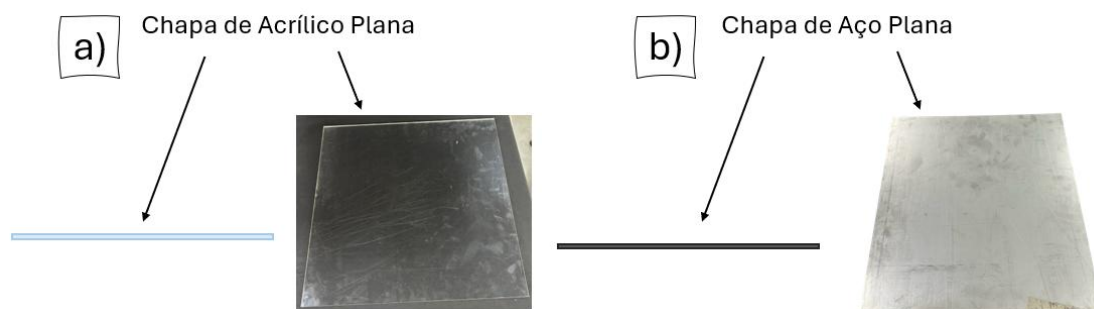


Figura 17 – Placas de acrílico e de aço planas para o ensaio de *Sticking*.

Considerando a frota mais moderna de vagões GDE que compõe a EFVM da Vale S.A., o aço austenítico 316 foi o material adotado para sua fabricação. Para este tipo de material, os ensaios de aderência foram realizados em três geometrias diferentes: (b) plana, (c) fletida em um raio de 250mm e (d) soldada em 90°. Quando ocorrer a omissão da especificação do aço, subentende-se que se trata deste aço austenítico 316. A superfície (c) se refere à região de junção

entre a chapa lateral do vagão e o assoalho, sendo que a superfície (d) se refere à junção da chapa lateral e cabeceira, indicadas na Figura 18.

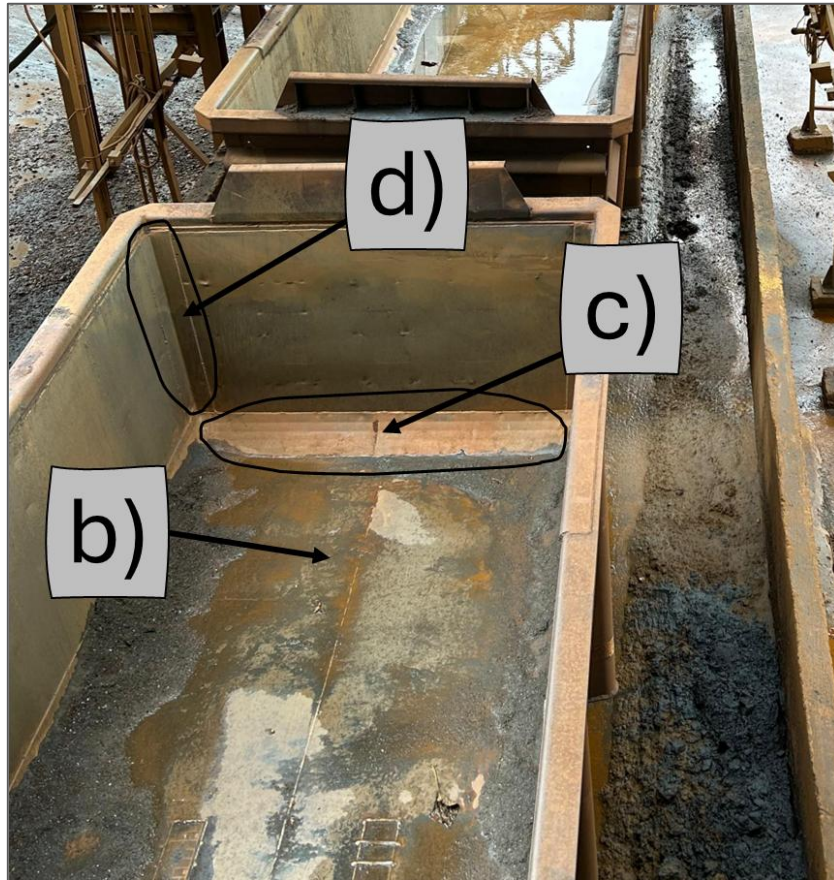


Figura 18 – Junções internas críticas do vagão para formação de recheio: b) chapa plana; c) chapa fletida em um raio de 250mm e d) chapas soldadas em 90°.

A segunda placa, com as mesmas dimensões da chapa plana, foi conformada mecanicamente em um raio de 250mm. Essa estrutura foi representada na Figura 19.



Figura 19 – Placa de aço com raio de 250mm para o ensaio de *Sticking*.

Por fim, a terceira placa de dimensões idênticas às anteriores, foi cortada ao meio para suas metades serem soldadas perpendicularmente entre si. Esta disposição foi indicada na Figura 20.

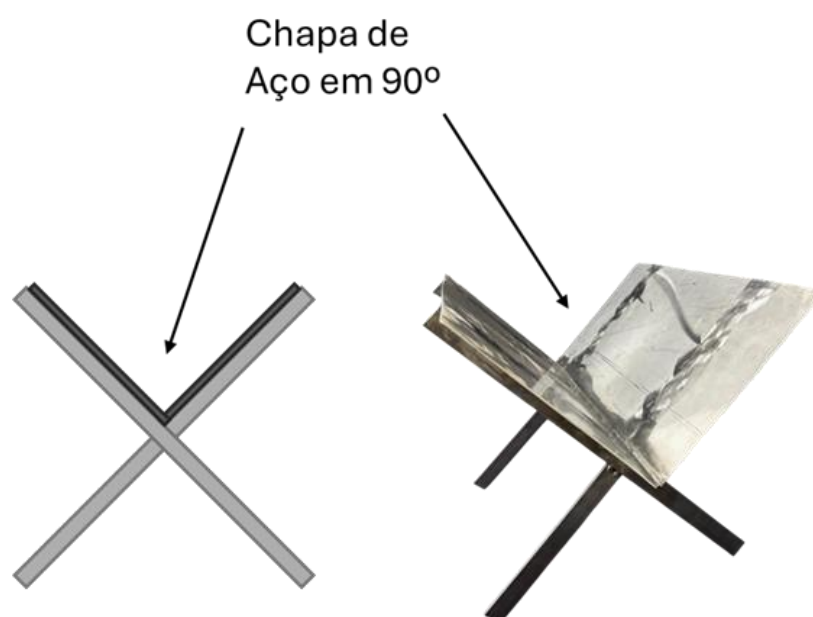


Figura 20 - Placa de aço em ângulo de 90° para o ensaio de *Sticking*.

2.1.3 Protótipo de Virador de Vagão

Baseado no estudo realizado por Cosentino (2019), um protótipo de virador de vagão foi desenvolvido com uma caixa de acrílico com o comprimento

de 500mm, largura de 400mm e altura de 300mm, para avaliar a aderência de minério úmido e compactado por um motor com eixo excêntrico após o descarregamento do vagão em diferentes cenários de água inicialmente acumulada no fundo, evidenciado na Figura 21. A vibração induzida possui um funcionamento e comportamento similar ao agitador eletromagnético de peneiras.

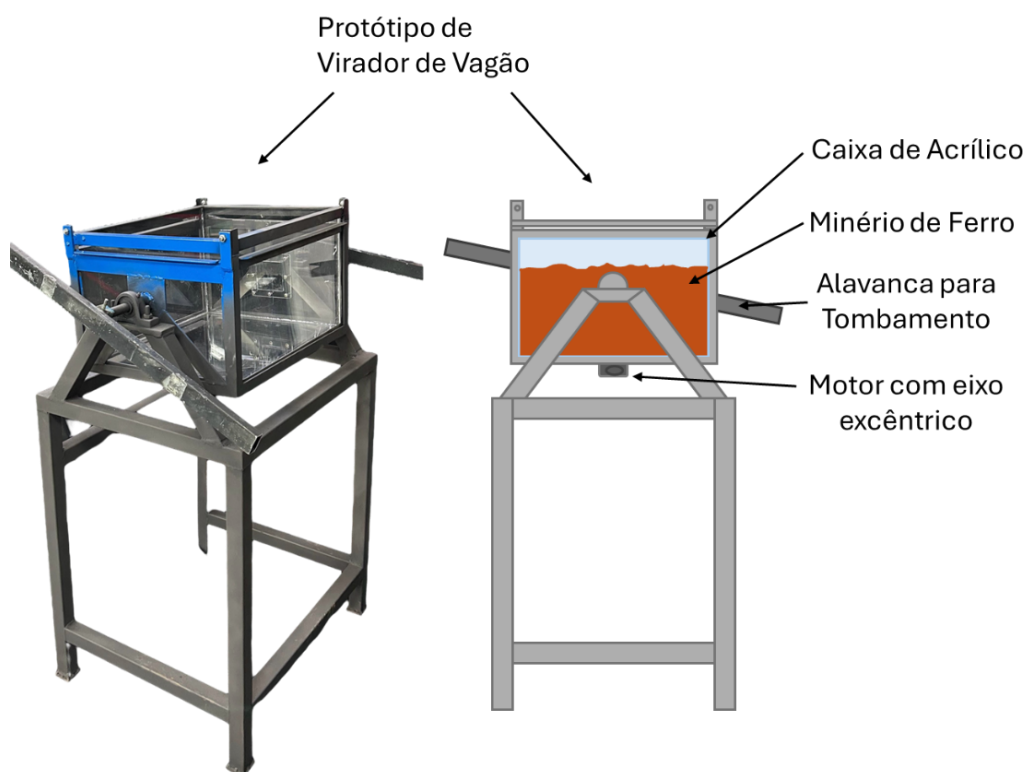


Figura 21 – Protótipo do virador de vagão.

2.2 Métodos

Para garantir o controle de umidade e repetibilidade de todos os ensaios, o minério foi seco previamente a todos os ensaios em uma estufa a 110°C e com a duração de, ao menos, 24 horas, para a retirada total da umidade nele contida. A temperatura de secagem foi baseada na ABNT NBR ISO 4701:2020 (ABNT, 2020) e Caputo (CAPUTO, 2015).

2.2.1 Ensaios de Caracterização de Minério

2.2.1.1 Densidade Aparente

O ensaio foi desenvolvido com uma adaptação da norma NBR ISO 3852:2009 (ABNT, 2009) que serviu como referência principal. Para encontrar a

densidade aparente, uma massa aleatória de minério seco foi depositada em provetas com diâmetro conhecido e preso no agitador eletromagnético de peneiras. Com o intuito de compactar o minério depositado na proveta, o agitador foi ligado causando uma vibração induzida, fazendo com que os espaços vazios fossem preenchidos pelo próprio minério, diminuindo então a altura do minério no interior da proveta, como pode ser observado na Figura 22. Após os espaços terem sido preenchidos, essa altura foi medida com o auxílio de um paquímetro. Esse processo foi repetido 10 vezes em 2 provetas diferentes para ambos os minérios.

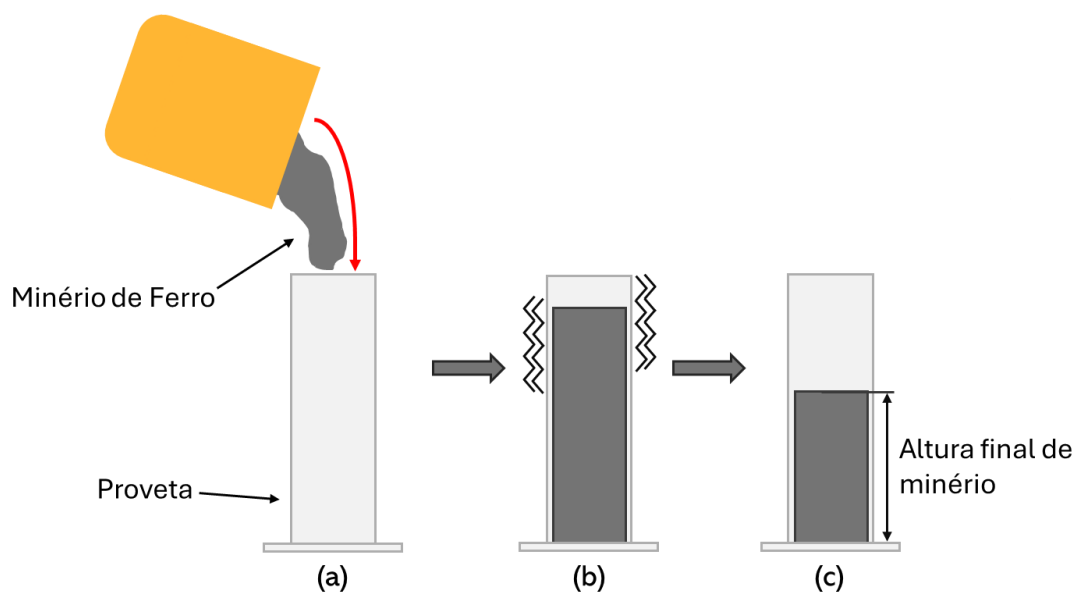


Figura 22 – Esquemático do ensaio de densidade aparente: (a) Adição do minério na proveta; (b) Agitação da proveta e (c) Minério compactado.

Utilizando uma balança analítica, a massa da proveta vazia foi obtida e, em seguida, da proveta preenchida com o minério. Dessa forma, com o diâmetro da proveta e a altura do minério em centímetros foi possível calcular o volume ocupado pelo minério em cm^3 . Com a massa da proveta cheia de minério e a massa da proveta vazia, foi possível calcular a massa do minério em gramas.

2.2.1.2 Saturação

Com o intuito de compreender a quantidade máxima de água que o minério pode absorver antes de formar uma lâmina superficial de água livre ou, em outras palavras, atingir a supersaturação, uma massa de água deionizada foi

adicionada em uma proveta e o valor foi anotado. Em seguida, o minério seco foi adicionado na proveta, que foi fixada no agitador eletromagnético de peneiras. Com o agitador ligado durante 5 minutos, a vibração causada por ele fez com que o minério compactasse. Na sequência, foi deixado em repouso por 5 minutos para decantar a mistura e parte da água adicionada no início subisse. Mais minério então foi adicionado e o processo foi repetido até que não formasse mais água livre sobre a superfície, como esquematizado na Figura 23. Ao final do processo, a proveta foi pesada e a massa de minério foi contabilizada. O ensaio foi realizado 10 vezes com cada minério. Com isso, foi obtido o valor de saturação máxima de água em que o minério suporta.

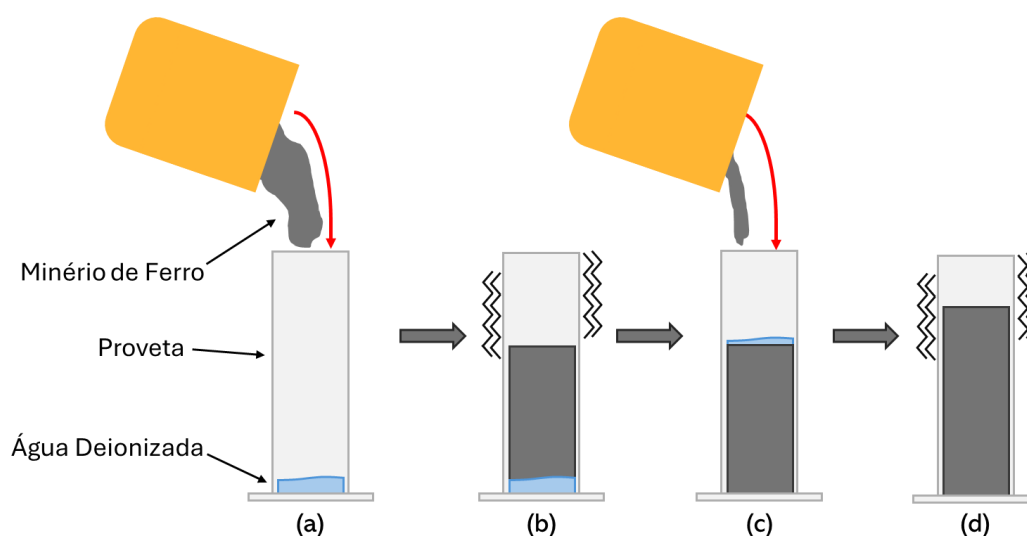


Figura 23 – Representação esquemática do ensaio de saturação: (a) Adição do minério sobre uma massa de água; (b) Agitação da proveta; (c) Minério adicionado sobre a lâmina de água e (d) Agitação da proveta sem aparição da lâmina d'água.

2.2.1.3 Granulometria e Microscopia

Para classificar os diferentes tamanhos de grãos e suas quantidades percentuais, foi seguido a ABNT NBR ISO 4701:2020 (ABNT, 2020) que determina como deve ser realizado o ensaio para a obtenção da distribuição granulométrica por peneiramento de minério de ferro.

As diferentes peneiras foram separadas na ordem decrescente com base no tamanho de suas aberturas, da maior fresta à menor. No agitador eletromagnético de peneiras, foram empilhadas 8 peneiras mais uma bandeja

fechada na posição inferior, uma sobre as outras. Depois de organizar as peneiras no agitador, uma amostra de minério seco de 800g para ambos os tipos de minério foi adicionada sobre a peneira superior e então o agitador foi ligado por 15 minutos para separação dos diferentes grãos sobre as diferentes aberturas das peneiras, como mostra a Figura 24. Parte do minério ficou retido sobre as peneiras e a outra parte ficou na bandeja, abaixo de todas as peneiras. Cada peneira então foi pesada individualmente e a massa do minério retido foi anotada. Após isso, foram organizadas as outras 8 peneiras com menores aberturas na ordem descrita na Tabela 1, sendo que os números a esquerda identificam a sequência delas de cima para baixo (de 1 a 8), e as letras determinam a batelada em que as peneiras são organizadas (de A até D). Com o minério retido na bandeja, ele foi despejado sobre as novas peneiras e o processo foi repetido até que todas as peneiras fossem agitadas com minério e pesadas. O ensaio foi realizado em triplicata para ambos os minérios.

Tabela 1 – Ordem de peneiras no ensaio granulométrico.

Sequência	Abertura da peneira [mm]	Sequência	Abertura da peneira [mm]
1 - A	31,50	1 - C	0,710
2 - A	25,00	2 - C	0,500
3 - A	16,00	3 - C	0,355
4 - A	12,50	4 - C	0,250
5 - A	9,50	5 - C	0,180
6 - A	8,00	6 - C	0,125
7 - A	6,30	7 - C	0,090
8 - A	5,60	8 - C	0,063
1 - B	4,75	1 - D	0,045
2 - B	4,00	2 - D	0,038
3 - B	2,80	3 - D	0,025
4 - B	2,00	4 - D	0,020
5 - B	1,70		
6 - B	1,40		
7 - B	1,18		
8 - B	1,00		

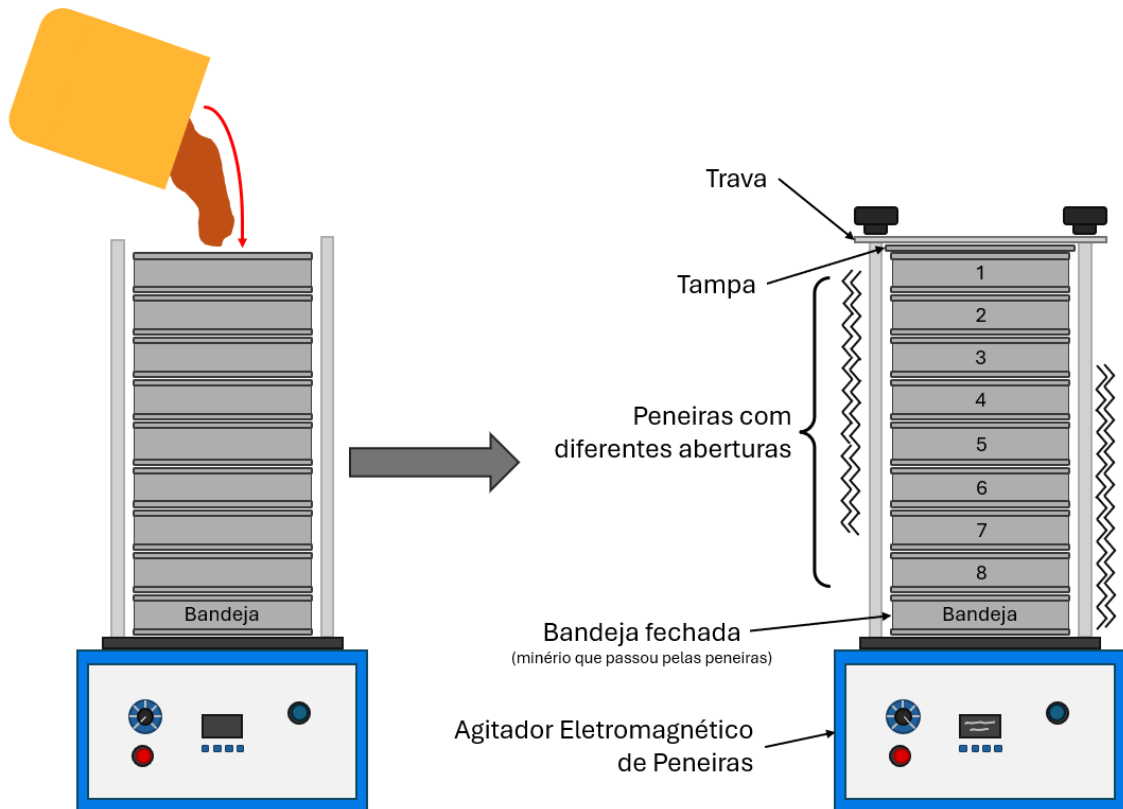


Figura 24 – Esquemático do ensaio de granulometria utilizando o agitador eletromagnético de peneiras.

Após o ensaio de granulometria foram retiradas amostras de diferentes peneiras para realizar a análise microscópica de acordo com diferentes diâmetros médios de partículas. As peneiras foram selecionadas de forma específica para cada material, a fim de analisar porções representativas de distintas faixas granulométricas. Para o *pellet feed* foi retirado amostras das peneiras de 355 μ m, 125 μ m e 45 μ m. Em seguida, com o *sinter feed* foram utilizadas as peneiras de 4mm, 355 μ m e 45 μ m.

2.2.2 Ensaio de Sticking

Com a finalidade de compreender o comportamento do minério de ferro quanto a aderência dele em materiais e umidades diferentes, o ensaio de *Sticking* proposto por Alencar et al. (2021) foi adaptado para outras geometrias, superfícies e 14 saturações diferentes.

Para o ensaio, foram organizadas 4 diferentes superfícies conforme apresentado na Figura 17, Figura 19 e Figura 20. Para cada minério foi escolhido níveis de umidade diferentes baseadas no comportamento de aderência de cada

um. Inicialmente, foi feito o ensaio com o minério seco (0% de umidade) e com o minério em saturação máxima. Em seguida, com os níveis de umidade de 25%, 50%, 75%, 125% e 150%. As demais umidades foram selecionadas com base na Tabela 2, de acordo com os pontos de transição de comportamento, para melhorar a análise da aderência. Não foi possível avaliar maiores níveis de umidade pela dificuldade de garantir a homogeneização da mistura. Toda homogeneização foi realizada com água deionizada.

Tabela 2 – Lista de saturações do ensaio de *Sticking*.

Saturação [%]			
<i>Pellet feed</i>		<i>Sinter feed</i>	
0	100	0	130
8	115	25	135
15	125	50	145
25	135	75	150
35	150	100	155
50	155	115	165
75	165	125	175

Primeiramente, uma massa de minério seca de 500g para ambos os minérios foi despejada em queda livre a uma altura de 60cm da placa de acrílico plana disposta sobre a mesa na posição horizontal. Após 10 segundos do minério ser despejado, a placa foi virada na posição próxima a vertical, formando um ângulo de, aproximadamente, 90° em relação à posição inicial. Depois de 10 segundos nesta posição, parte do minério ficou aderido na placa e a outra parte caiu sobre a bandeja que foi posicionada abaixo da chapa. Em seguida, o acrílico plano foi pesado para medir a quantidade de minério que nele ficou aderido. Com a massa inicial de minério despejado e a massa de minério aderida, foi possível calcular o índice de *Sticking* em percentual, conforme a Equação 10. A representação esquemática do ensaio de *Sticking* pode ser observada a partir da Figura 25.

$$I. S. = \frac{m_{aderida}}{m_{despejada}} \cdot 100\% \quad (10)$$

Sendo:

I.S. o índice de *Sticking* [%];

m_{aderida} a massa de minério aderida [g];

$m_{\text{despejada}}$ a massa de minério despejada [g].

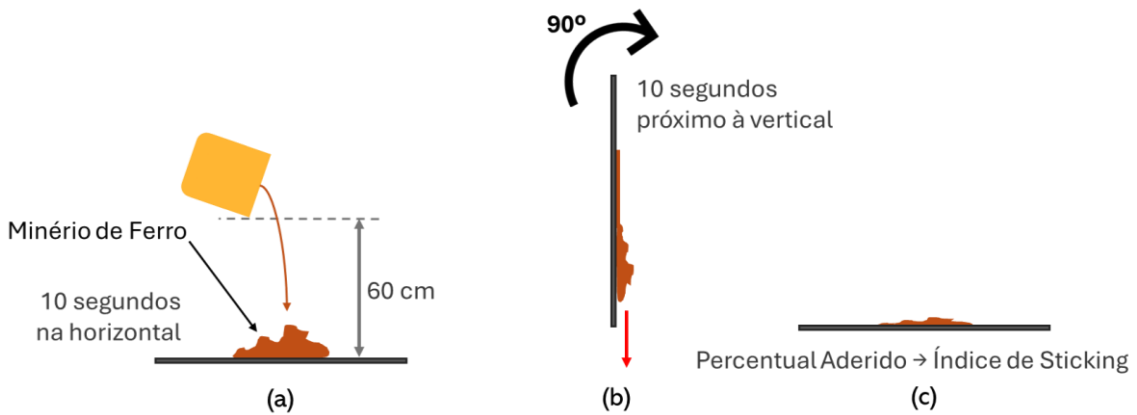


Figura 25 – Representação esquemática do ensaio de *Sticking*: (a) Despejo da massa de minério; (b) Placa virada e (c) Massa aderida. (Fonte: adaptado de Alencar et al., 2021)

O mesmo processo foi repetido para todas as geometrias, materiais e diferentes teores de umidade. Para as chapas com conformação no raio de 250mm e soldada no ângulo de 90°, a disposição proposta pode ser encontrada na Figura 26. O sentido de rotação das chapas foi adotado com intuito de analisar a maior aderência do minério nessas condições, sendo diferente do eixo de rotação do vagão no virador de vagões.

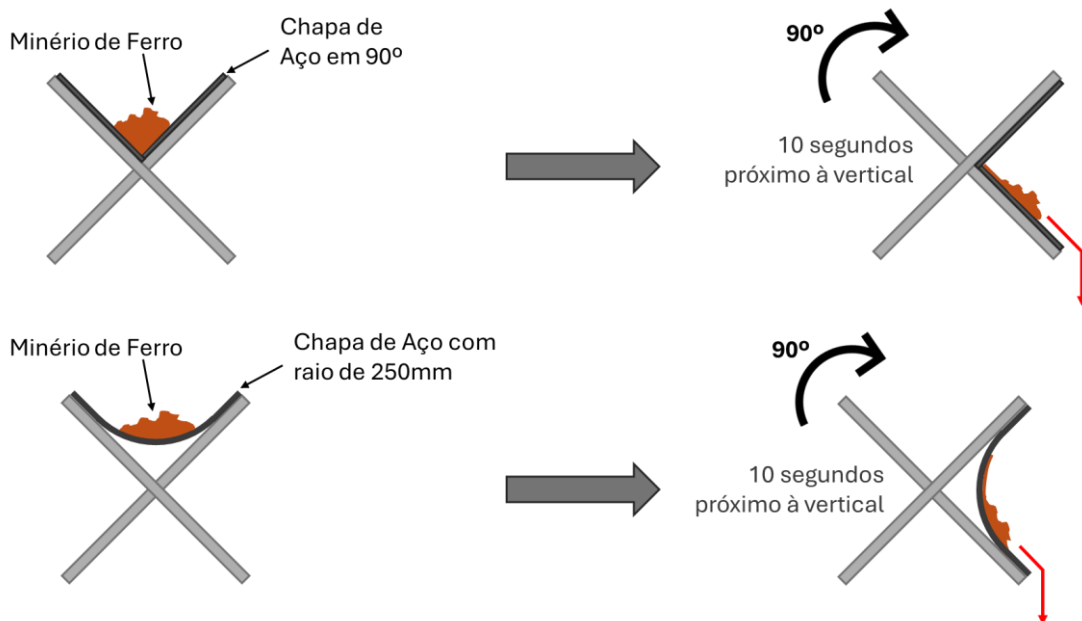


Figura 26 – Disposição das chapas com raio de 250mm e 90° para o ensaio de *Sticking*.

2.2.3 Compactação de minério com água depositada

Primeiramente, o ensaio constituiu-se na adição de minério de ferro saturado com água deionizada na proveta com 114mm de diâmetro interno até atingir a altura de 420mm. Com o intuito de compreender a compactação ao longo do tempo do minério saturado com diferentes níveis de água inicial, a proveta foi presa no agitador eletromagnético e a vibração induzida foi iniciada compactando o minério, diminuindo assim, sua altura dentro da proveta. Foram realizadas as medições das alturas de minério com o intervalo de tempo de 3, 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54 e 60 minutos, além de algumas medições entre o intervalo de 0 a 3 minutos com auxílio de uma escala. Durante o início do experimento até o terceiro minuto inicial, o tempo foi anotado quando o minério atingia as alturas de 400mm, 380mm, 360mm, 340mm, 320mm e 300mm, ou até completar os 3 minutos de ensaio, parando em qual chegasse primeiro (altura demarcada ou os 3 minutos de ensaio). Esse método foi utilizado devido a diminuição abrupta da altura nos minutos iniciais, para obter uma melhor aderência da curva de compactação anotada ao comportamento físico.

Posteriormente, foi realizado o mesmo processo já descrito, porém com a adição inicial de água deionizada no fundo da proveta. Com isso, o minério saturado foi carregado sobre a água e compactado na sequência, conforme a Figura 27. Este ensaio foi realizado somente com minério saturado e com as alturas de água de 8,4mm, 16,8mm e 33,6mm que correspondem respectivamente a 2%, 4% e 8% com base na altura inicial de minério.

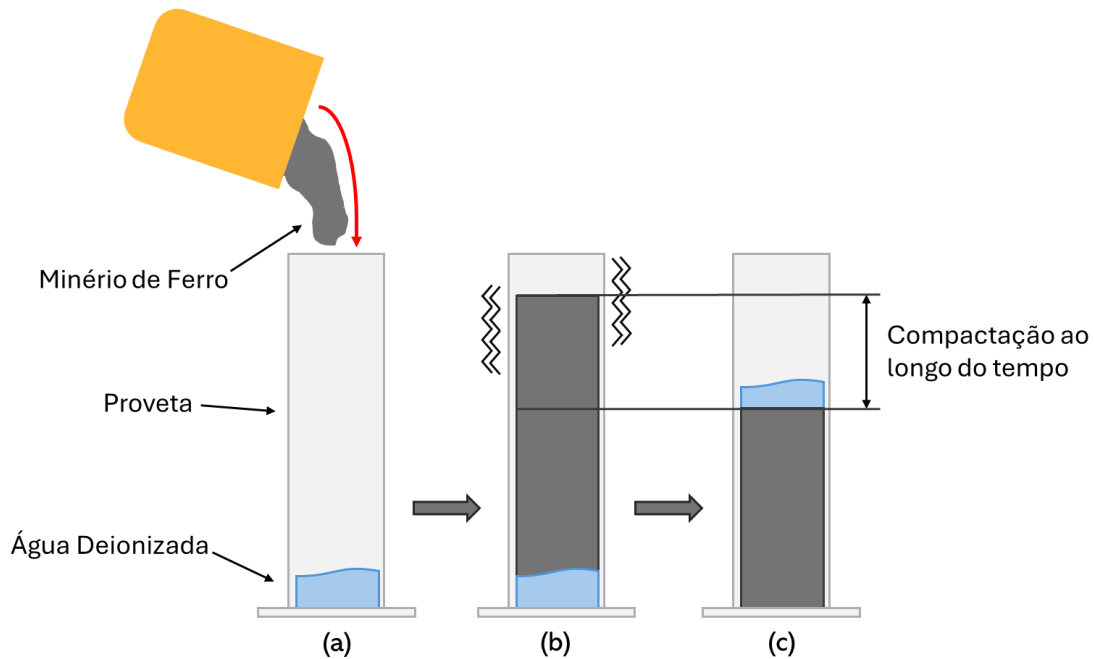


Figura 27 – Esquemática do ensaio de compactação com água depositada inicialmente: (a) Adição de minério com água depositada; (b) Agitação da proveta e (c) Minério compactado com lâmina d'água na superfície.

2.2.4 Protótipo de virador de vagão

O minério foi saturado e depositado em uma caixa de acrílico, sem água acumulada previamente. Para a saturação, foram utilizados 76kg de *sinter feed* seco com 8206g de água deionizada e 88kg de *pellet feed* seco com 9442g de água deionizada. Logo após a deposição, o material atingiu uma altura aproximada de 250mm, correspondendo a um volume de 50 litros. Em seguida, o dispositivo de vibração que fica localizado na região inferior do vagão foi acionado e mantido ligado durante 6 minutos, propiciando a compactação total do minério, baseando-se nos resultados da compactação de minério com água depositada em uma proveta. Utilizando uma escala para medição da altura final depois de compactado, foram estabelecidos 14 pontos de medição no perímetro da caixa de acrílico para obter uma média da altura do minério. Por fim, o vagão foi invertido em 180° em relação à horizontal, conforme a Figura 28, e o minério foi despejado em um recipiente localizado abaixo do virador de vagão. O minério aderido nas paredes internas da caixa foi retirado e pesado para sua quantificação. Todo o processo foi repetido com a inserção de água deionizada antes do carregamento do minério. As alturas de água adicionadas foram de 2%, 4% e 8% em relação à altura de minério depositado antes da compactação.

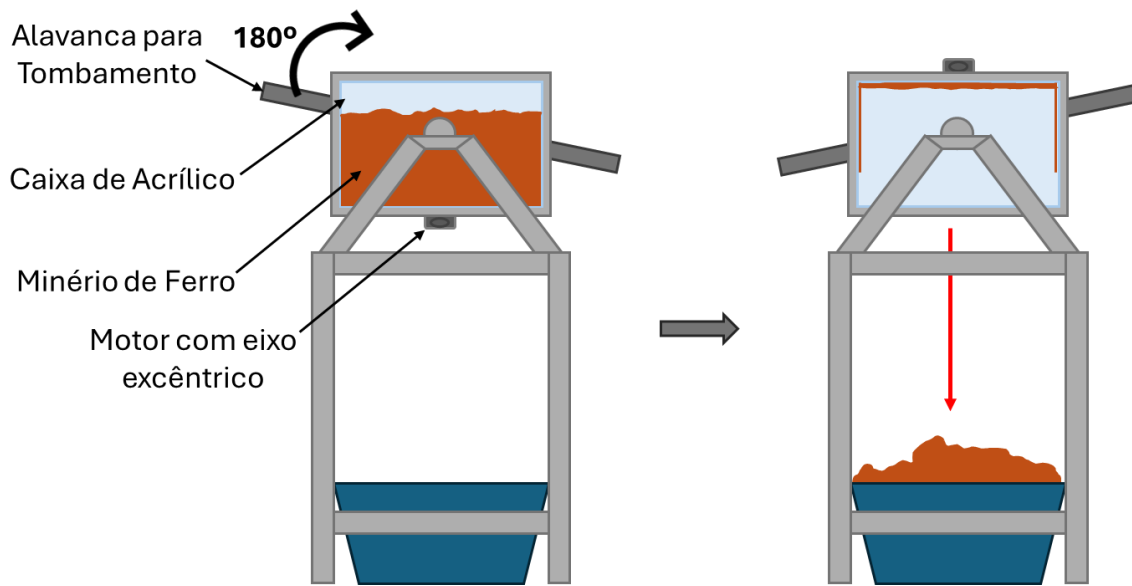


Figura 28 – Esquemática do virador de vagão.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Caracterização de Minério

3.1.1 Densidade Aparente

Foi indicado na Figura 29 os ensaios efetuados de densidade aparente junto com suas médias para cada minério.

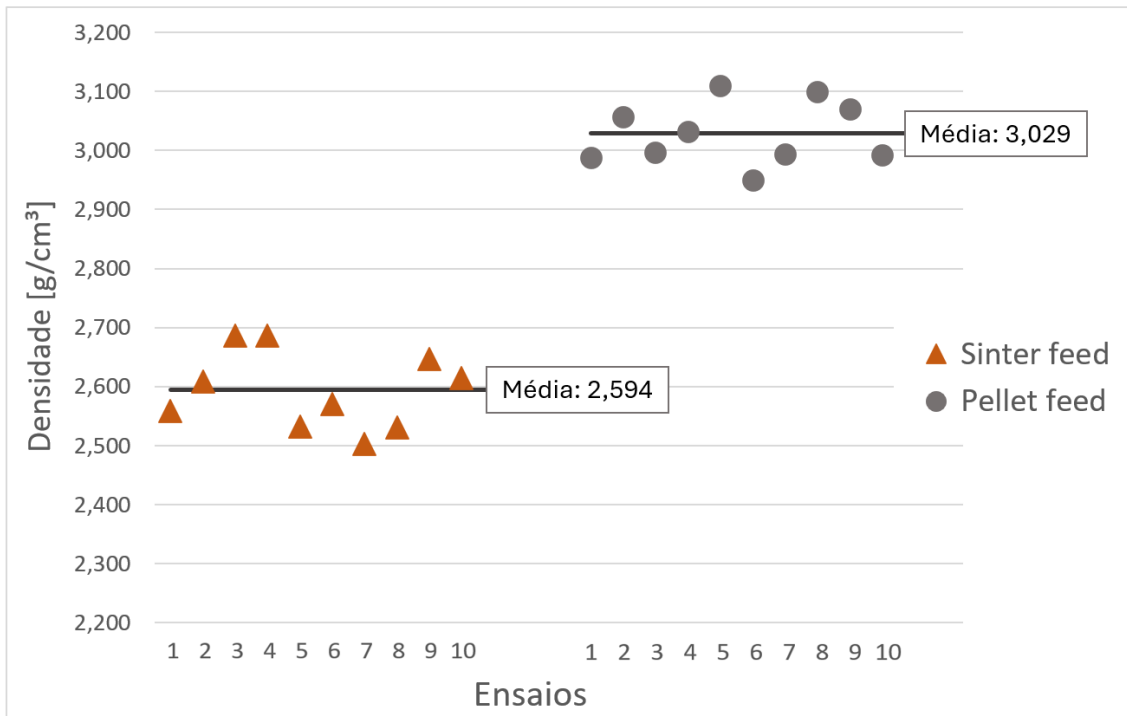


Figura 29 – Densidade aparente para ambos os minérios.

Por meio de provetas, a densidade aparente foi obtida com massas distintas de minério a cada ensaio. O *sinter feed* foi o particulado com menor densidade aparente, com um valor médio de 2,594g/cm³ contra os 3,029g/cm³ do *pellet feed*. O desvio padrão dos resultados foram de 0,0653 para o *sinter* e 0,0535 para o *pellet*.

3.1.2 Saturação

Através da concentração mássica de água, na Figura 30, foi possível observar a saturação máxima de cada minério antes da formação de água livre.

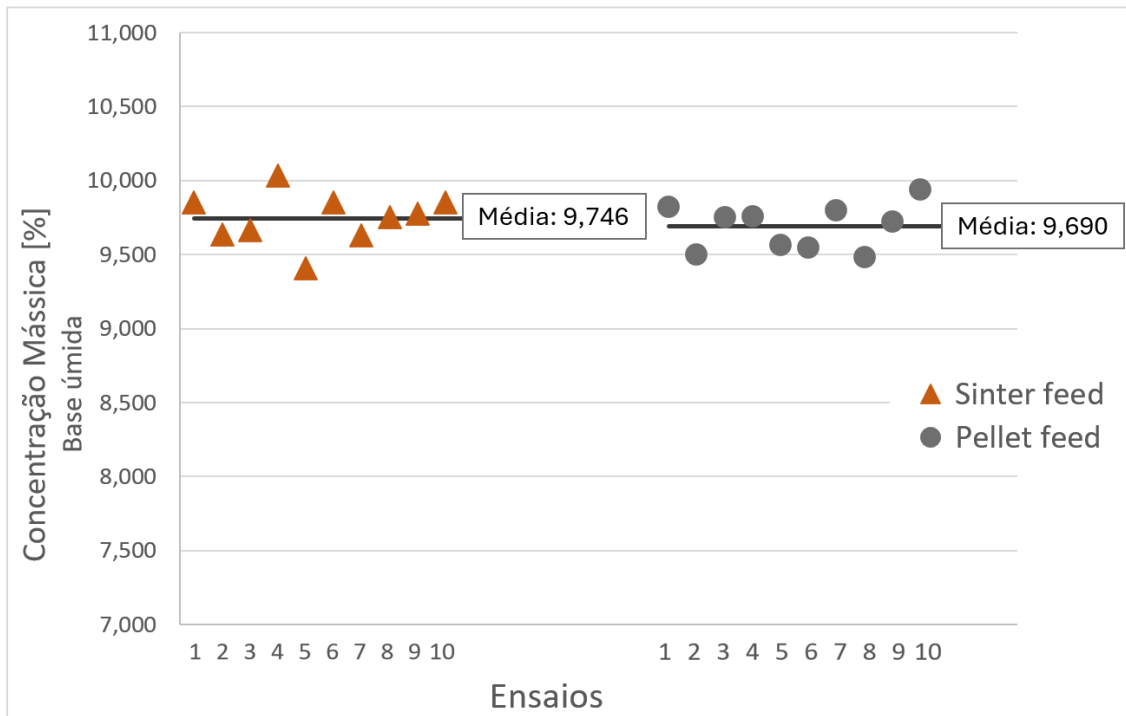


Figura 30 – Concentração mássica de água para atingir 100% de saturação para ambos os minérios.

Ambos os minérios indicaram concentrações mássicas próximas entre si, apesar de possuírem características diferentes em tamanhos de grãos. Cada ensaio foi realizado com diferentes massas iniciais e resultou em valores agrupados, com desvios padrões na faixa de 0,1716 e 0,1541 para *sinter* e *pellet*, respectivamente.

3.1.3 Granulometria e Microscopia

A partir das massas retidas nas peneiras durante os ensaios granulométricos, realizados com 800g de cada minério seco, foram elaboradas as curvas granulométricas dos minérios *pellet feed* e *sinter feed* (Figura 31). Os resultados detalhados dos ensaios podem ser consultados nos apêndices A e B. Também foi realizada a análise microscópica do material retido nas peneiras de 45µm, 125µm e 355µm para o *pellet feed*, e de 4mm, 355µm e 45µm para o *sinter feed*.

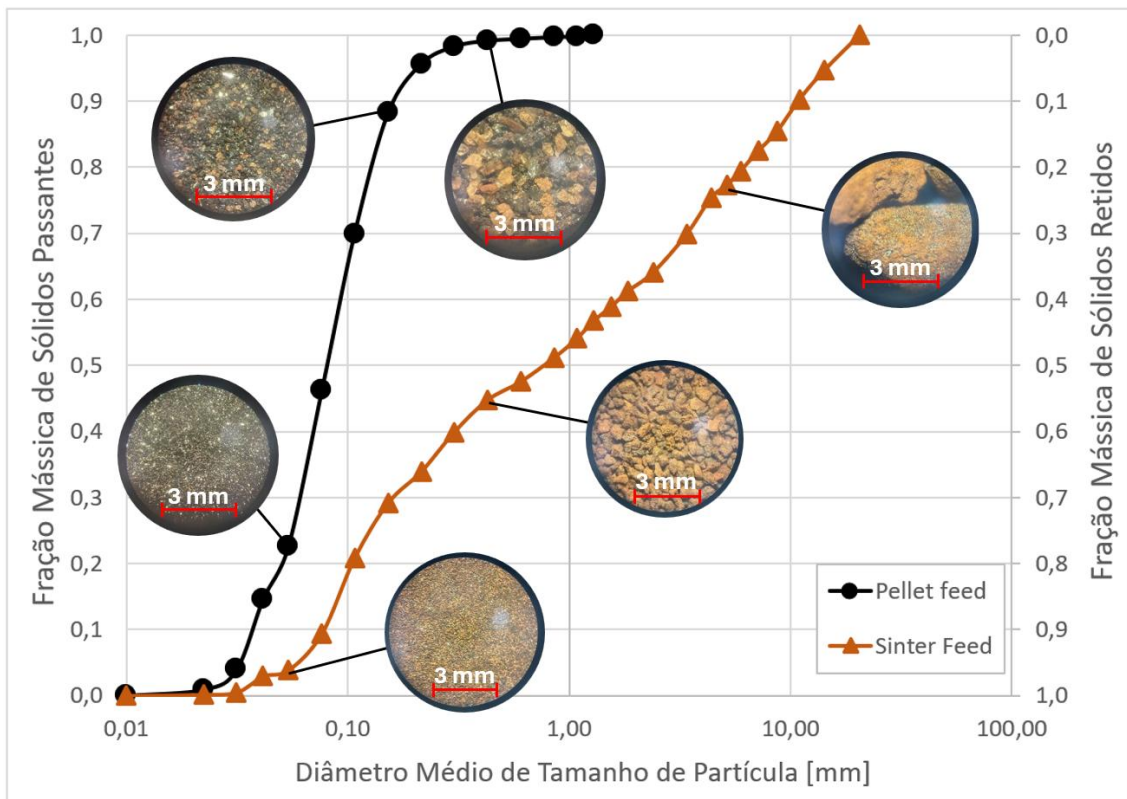


Figura 31 – Curva granulométrica de *sinter feed* e *pellet feed*.

Observa-se que o *pellet feed* apresentou uma boa graduação nos tamanhos de grãos pela característica da curva semi-logarítmica. Entretanto, o *sinter* apresentou tamanhos de grãos consideravelmente maiores quando comparado ao *pellet feed*. Além disso, foi possível analisar uma má distribuição nos tamanhos de grãos do *sinter feed* pela tendência de comportamento da curva a partir de 0,10mm de diâmetro médio de partículas.

Através dos resultados de granulometria, o diâmetro médio de Sauter, diâmetro efetivo e os coeficientes de uniformidade e curvatura foram calculados e evidenciados na Tabela 3. Os detalhamentos adicionais desses resultados podem ser consultados nos apêndices de A a D.

Tabela 3 – Características da composição granulométrica dos minérios.

	<i>Pellet feed</i>	<i>Sinter feed</i>
Diâmetro Médio de Sauter	57 μ m	177 μ m
Diâmetro Efetivo	0,037 mm	0,078 mm
Coeficiente de Uniformidade	2,5	21,6
Coeficiente de Curvatura	1,1	0,2

O diâmetro médio de Sauter foi menor para o *pellet feed* quando comparado ao *sinter feed*, resultado da granulometria mais fina do *pellet*. Esse comportamento foi ilustrado na Figura 31, onde a curva se concentra nas regiões de menor diâmetro, à esquerda da figura. Essa característica também foi refletida no diâmetro efetivo, parâmetro diretamente relacionado à permeabilidade do material. Assim, o *sinter feed* apresentou um desempenho superior na passagem efetiva de água através do material particulado, destacando sua maior permeabilidade.

O *pellet feed* apresentou um coeficiente de uniformidade reduzido, evidenciando uma elevada uniformidade no tamanho das partículas. Além disso, seu coeficiente de curvatura permaneceu dentro da faixa que caracteriza uma boa graduação do particulado, indicando uma distribuição contínua de tamanhos de grãos. Por outro lado, o *sinter feed* demonstrou alta desuniformidade, refletida por um coeficiente de curvatura baixo, caracterizando-o como um material com má graduação de material particulado. Observa-se que, em situações em que o coeficiente de uniformidade classifica o particulado como uniforme, o coeficiente de curvatura tende a indicar uma má graduação dos grãos, devido à descontinuidade nos tamanhos das partículas ao longo de toda a faixa granulométrica ou a uma uniformidade central no tamanho do particulado.

3.2 Ensaio de *Sticking*

3.2.1 Acrílico

Os resultados do ensaio de *Sticking* realizado com a chapa plana de acrílico foram analisados através dos diagramas de caixas que podem ser vistos na Figura 32 e na Figura 33.

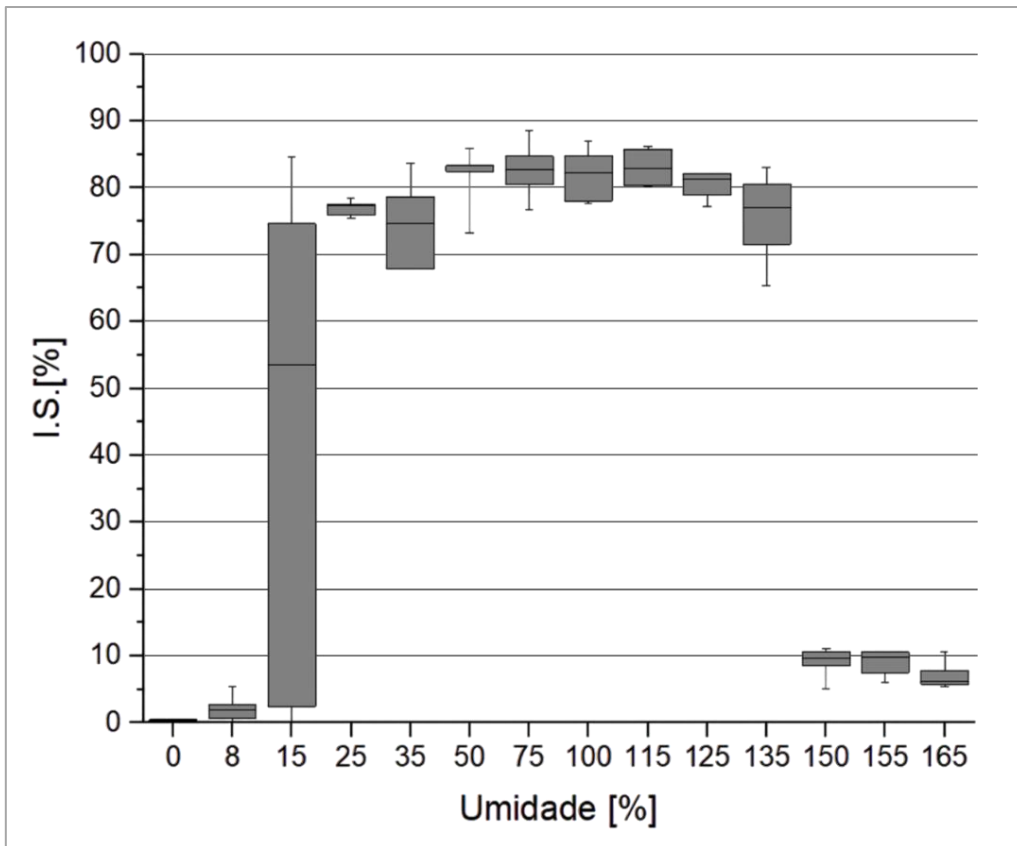


Figura 32 – Índice de *Sticking* por saturação do *pellet feed* com acrílico.

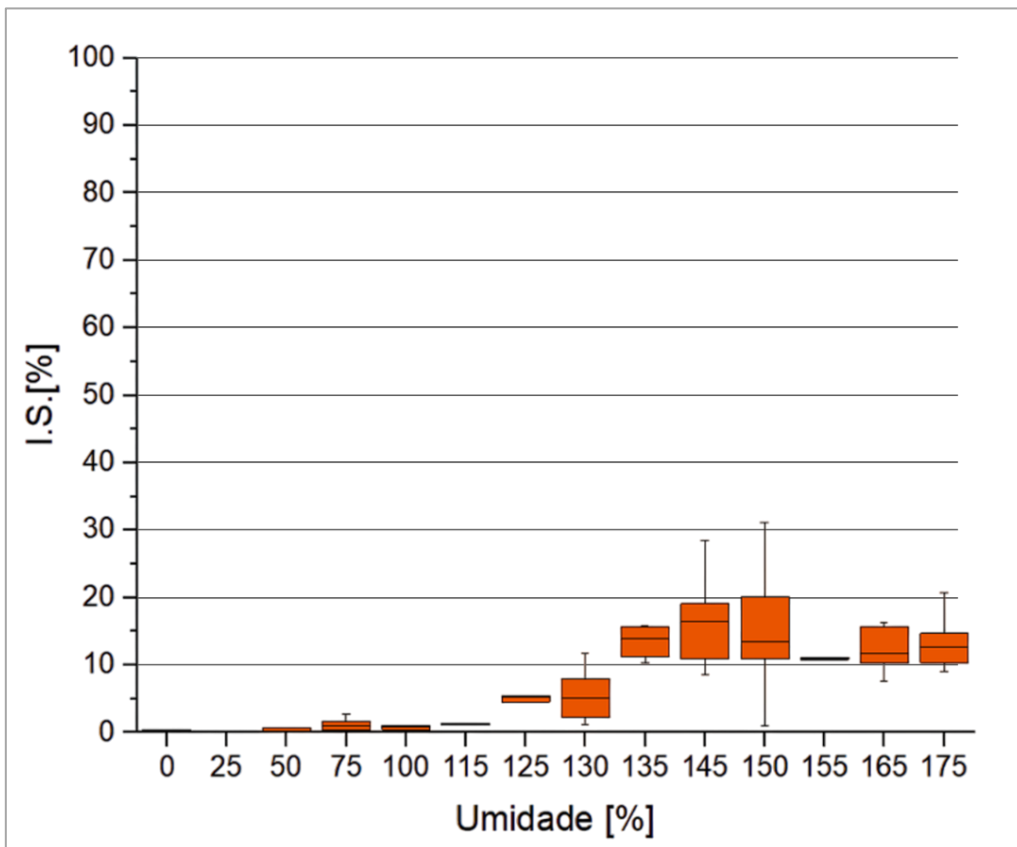


Figura 33 - Índice de *Sticking* por saturação do *sinter feed* com acrílico.

O *pellet feed* foi o minério que demonstrou maior aderência mesmo em menores saturações. Foi possível notar a mudança no comportamento a partir de 15% no grau de saturação, alcançando o patamar de 80% de material aderido na chapa de acrílico, evidenciado na Figura 34. Ao atingir o percentual de 150%, outra mudança foi notada devido à concentrada presença de água, auxiliando o escorregamento do minério na placa.

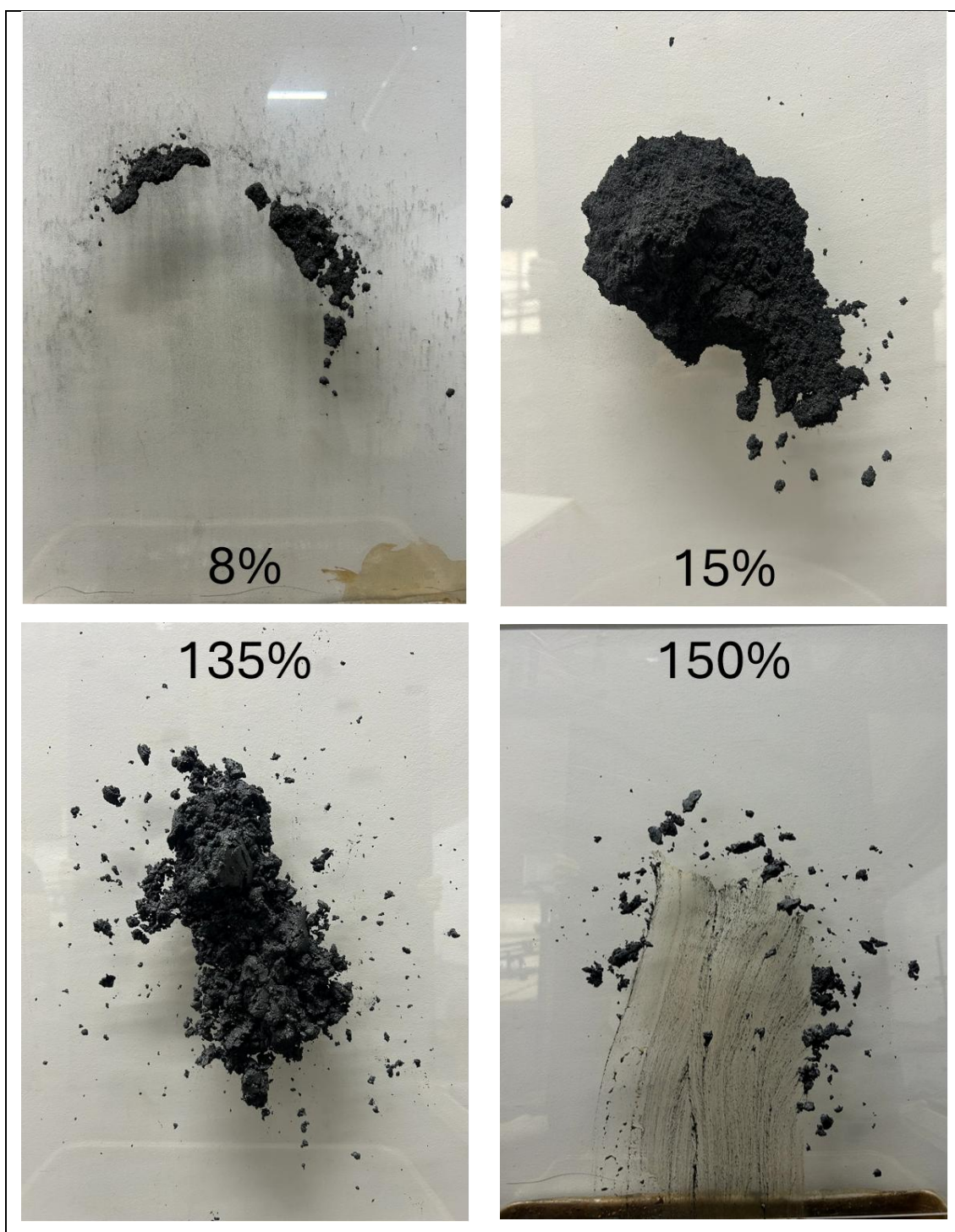


Figura 34 – Comparações entre ensaios de aderência do *pellet feed* no acrílico.

Em contrapartida, a partir do minério seco, o *sinter feed* permaneceu em uma linha de tendência crescente de aderência até 130% de umidade, onde seu comportamento apresentou variações (Figura 35). Entre 135% e 175% de saturação de água, o patamar de aderência aumentou e permaneceu acima dos 10%.

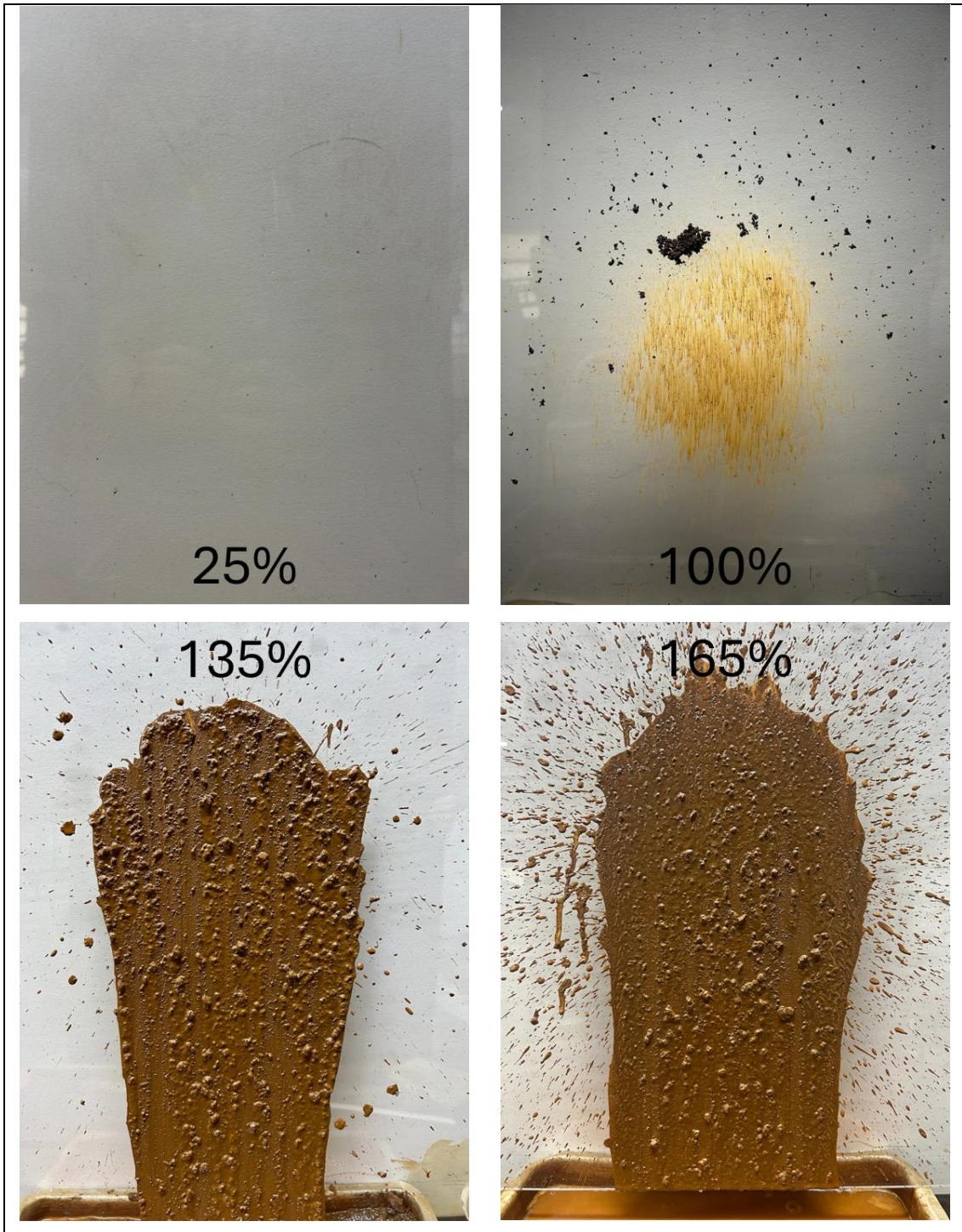


Figura 35 – Comparações entre ensaio de aderência do *sinter feed* no acrílico.

3.2.2 Pellet feed com Aço

Evidenciam-se na Figura 36, Figura 37 e Figura 38 o comportamento de adesão de 500g de *pellet feed*, respectivamente, na placa de aço plana, na placa conformada em um raio de 250mm e na configuração com as duas metades da chapa de aço soldadas perpendicularmente entre si.

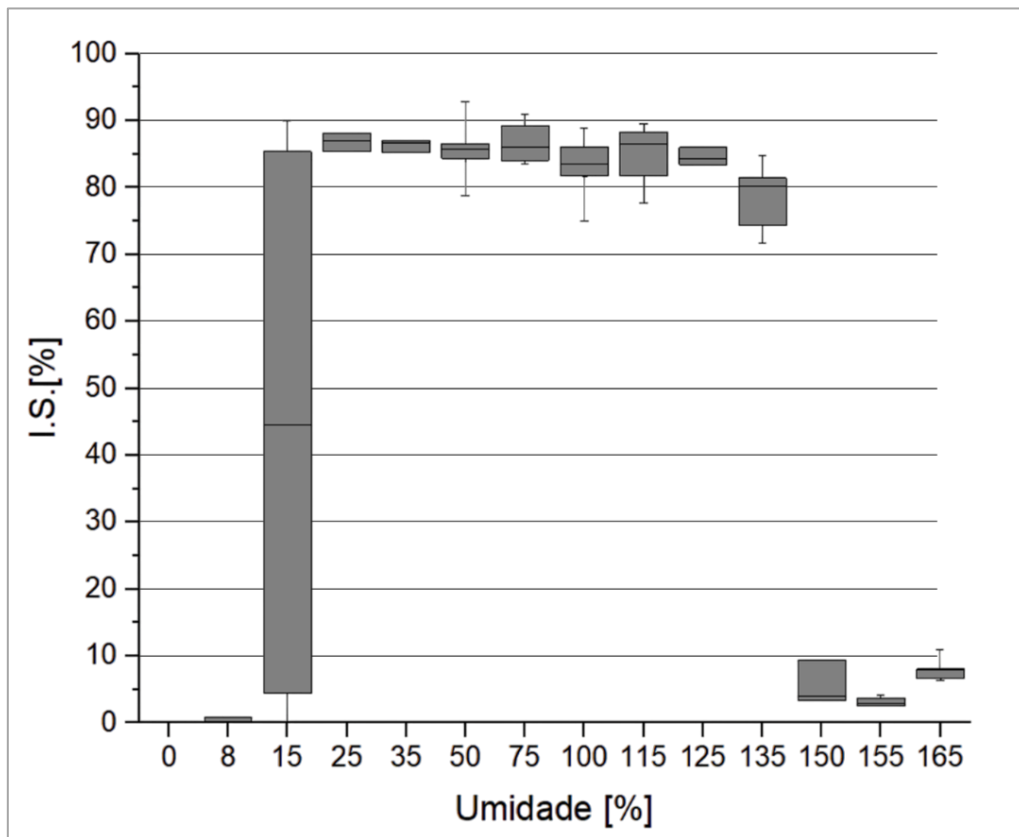


Figura 36 - Índice de *Sticking* do *pellet feed* com aço plano.

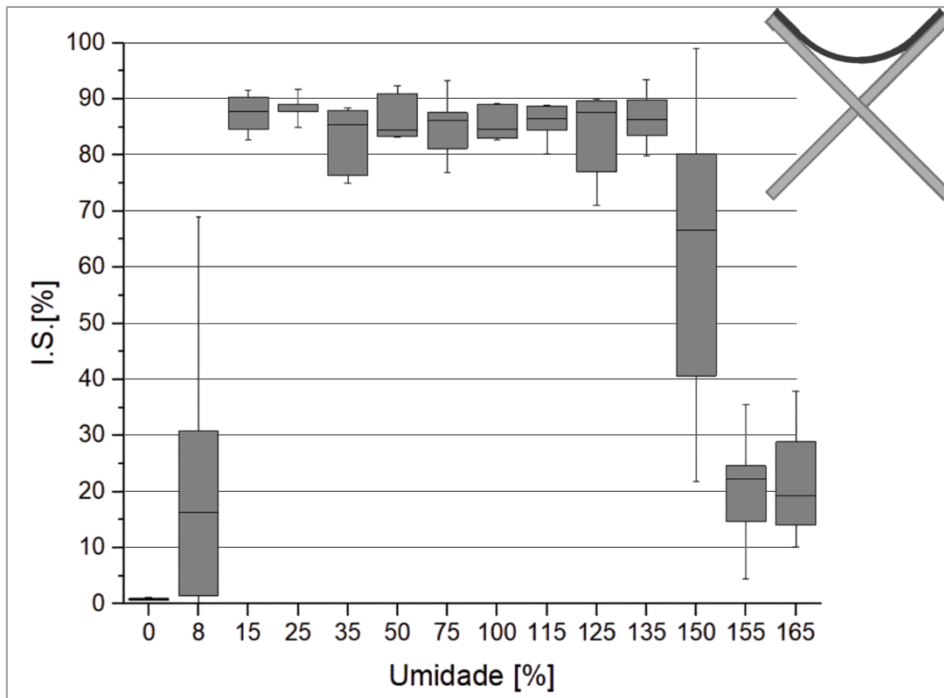


Figura 37 – Índice de *Sticking* do *pellet feed* com aço com raio de 250mm.

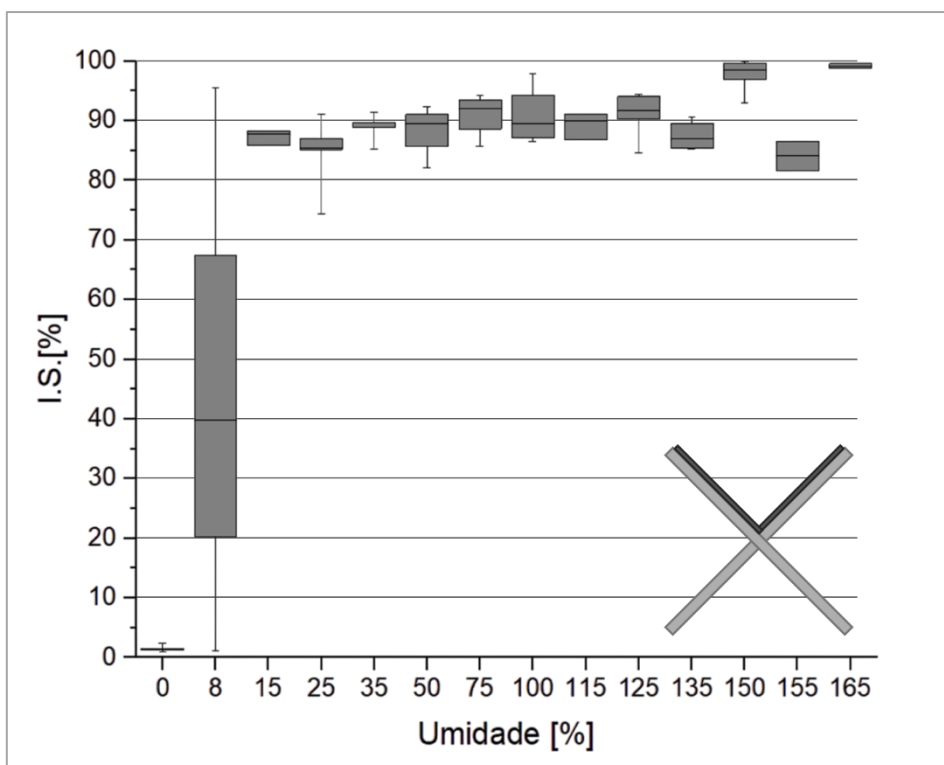


Figura 38 - Índice de *Sticking* do *pellet feed* com aço com angulação de 90°.

O comportamento do minério na placa de aço plano foi bastante semelhante ao do acrílico, com a mudança de comportamento ocorrendo a partir de 15% de saturação, como demonstrado na Figura 39. Em contrapartida, nas

chapas com geometria semicircular e soldadas a 90°, o comportamento permaneceu similar até atingir os 135% de umidade. A placa soldada perpendicularmente mostrou alta adesão a partir de 15% de saturação, com esse comportamento sendo mantido mesmo em altos percentuais de supersaturação, alcançando quase 100% de adesão quando o minério foi saturado a 150% e 165% (Figura 40).

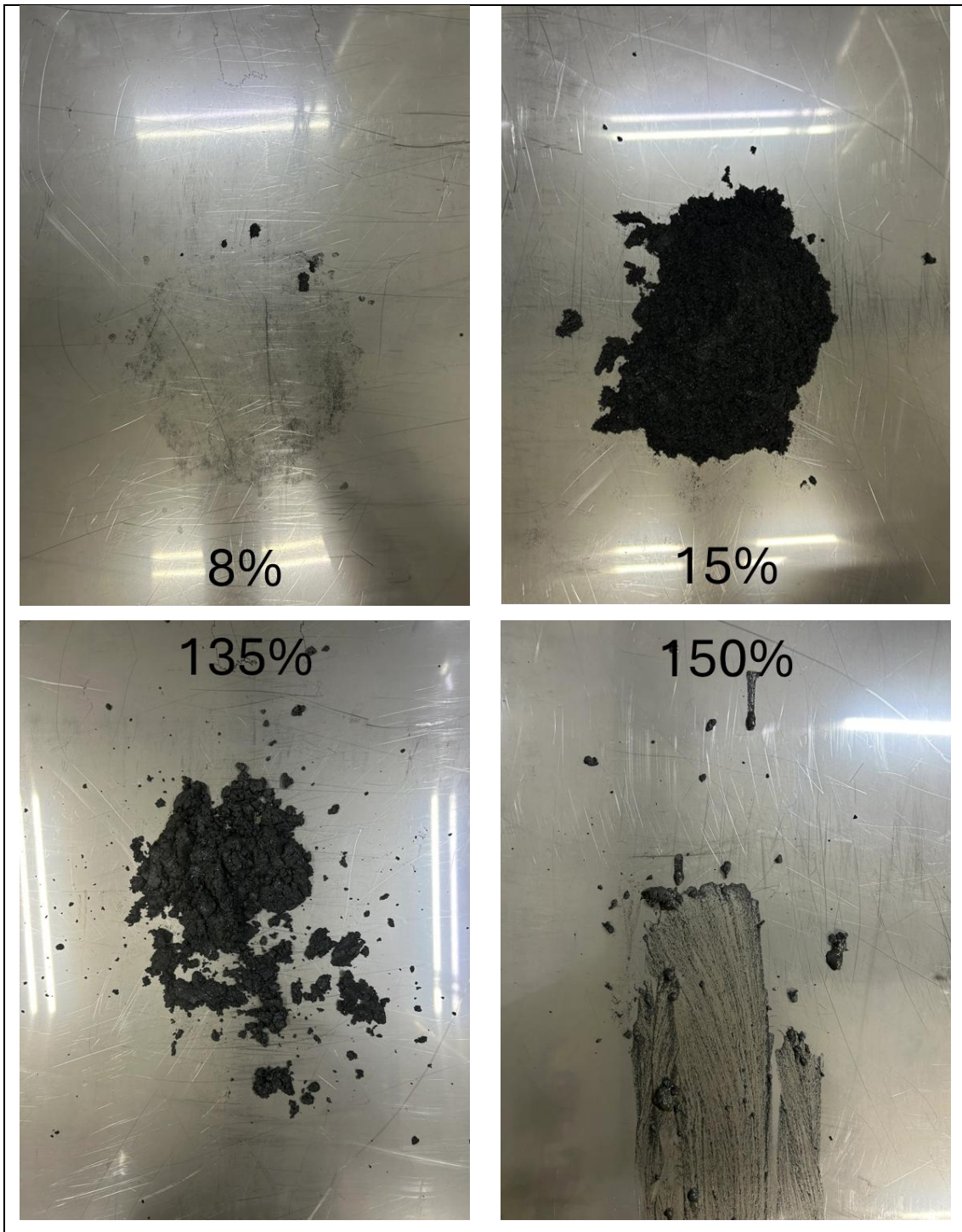


Figura 39 - Comparações entre ensaio de aderência do *pellet feed* no aço plano.

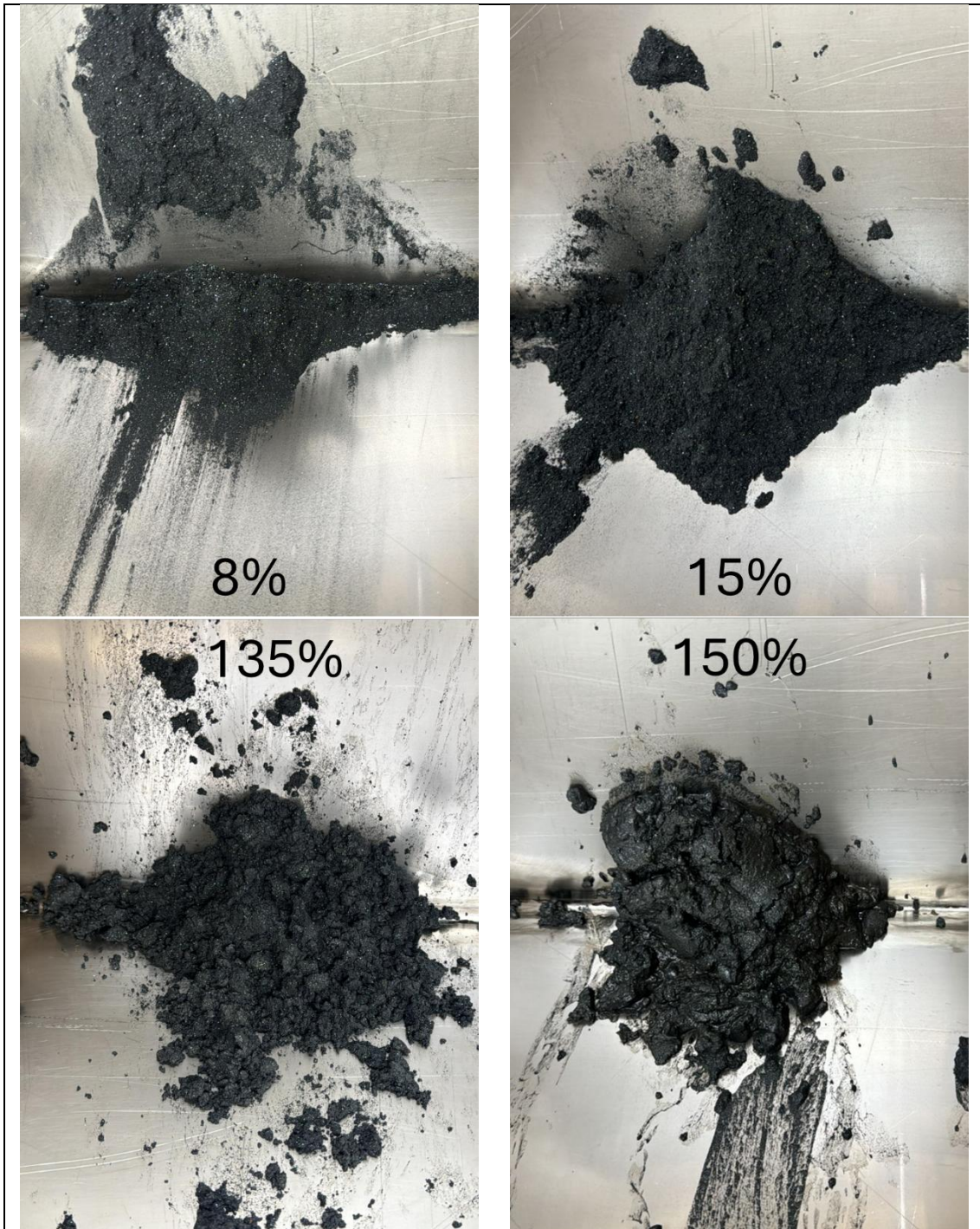


Figura 40 – Comparação de adesão do *pellet feed* nas placas soldadas perpendicularmente.

A somatória das forças de adesão garantiu que o *pellet* ficasse mais retido na chapa soldada em 90° em comparação as outras, demonstrando a influência da geometria e da granulometria mais refinada. Já na placa conformada com raio de 250 mm, a transição de comportamento ocorreu entre 8% e 15% de saturação. A partir de 150% de umidade, foi observada uma nova transição,

análoga ao comportamento do aço plano, embora com adesões próximas a 20%, enquanto a aderência na placa plana ficou abaixo de 10%.

3.2.3 *Sinter feed* com Aço

Para o *sinter feed* utilizando diferentes geometrias com aço, foram ilustrados na Figura 41, Figura 42 e Figura 43 o comportamento de aderência de 500g no aço plano, na chapa com raio de 250mm conformado mecanicamente, e nas chapas soldadas no ângulo de 90° entre si.

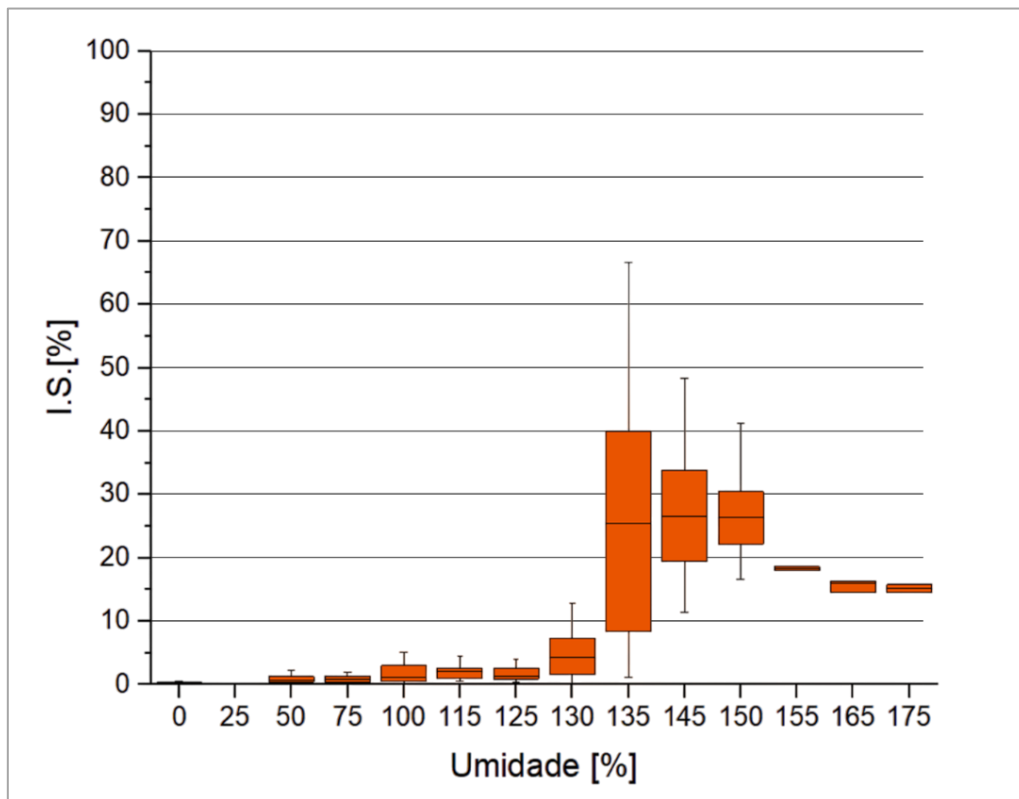


Figura 41 - Índice de *Sticking* do *sinter feed* com aço plano.

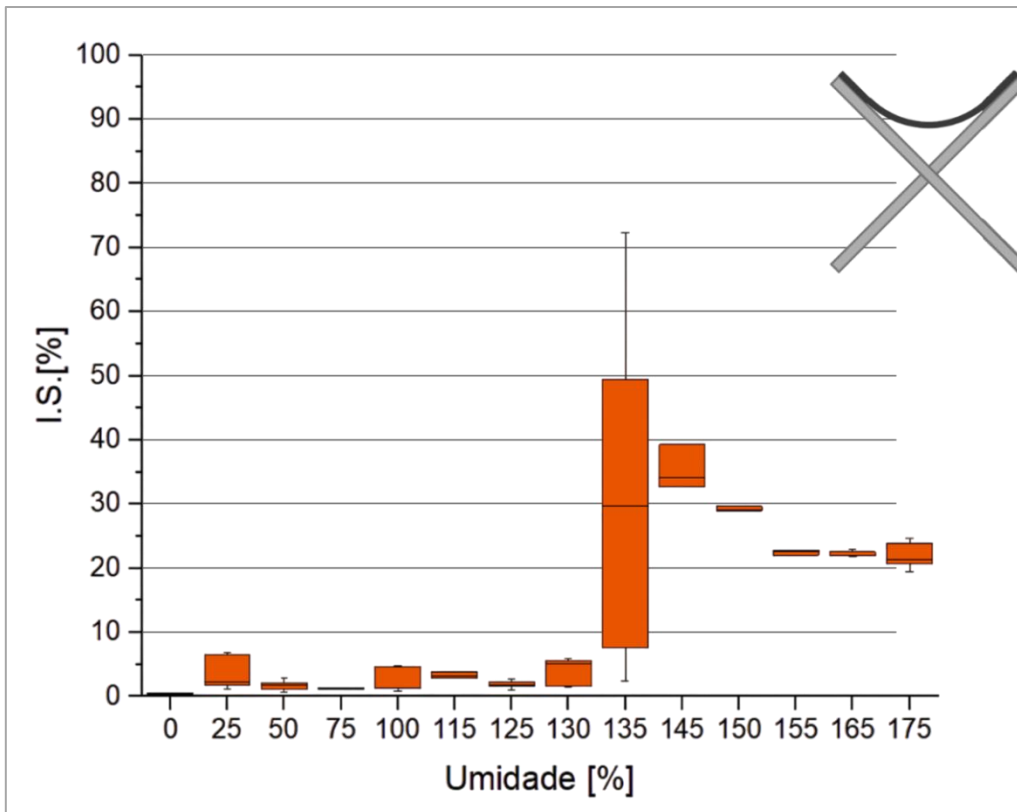


Figura 42 - Índice de *Sticking* do *sinter feed* com aço com raio de 250mm.

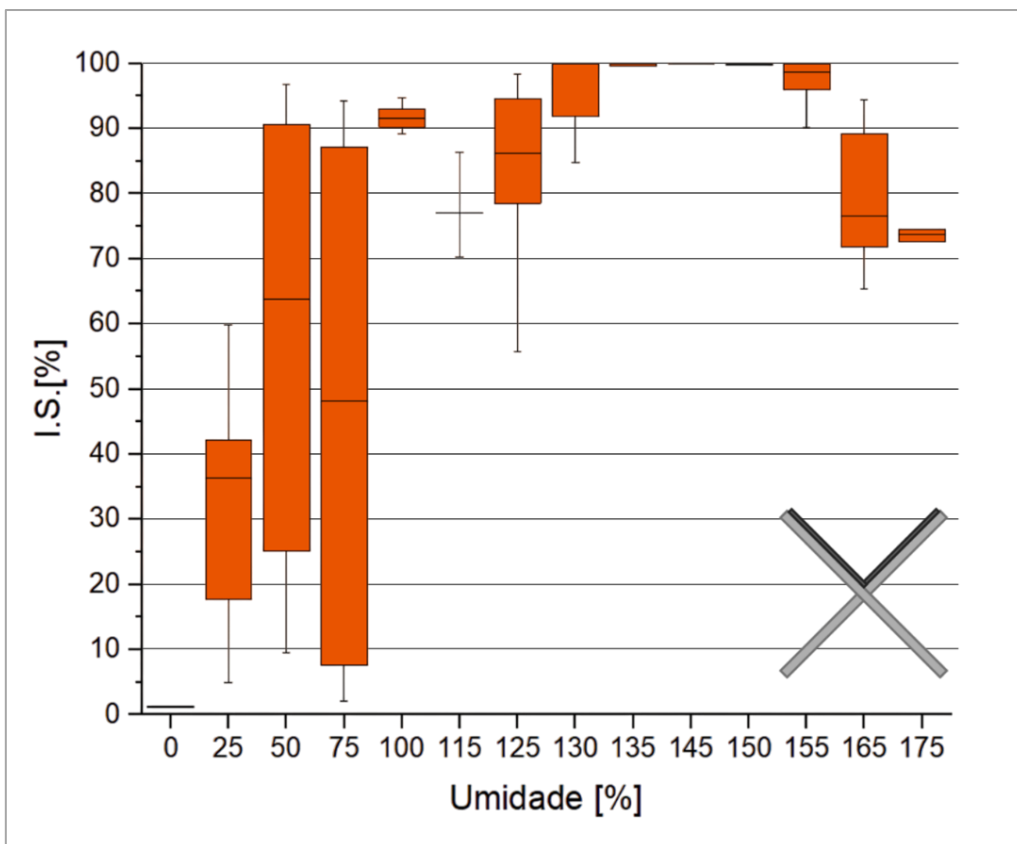


Figura 43 - Índice de *Sticking* do *sinter feed* com aço com angulação de 90°.

O comportamento do *sinter* com o aço plano, evidenciado na Figura 44, e com a chapa de raio de 250 mm foi semelhante ao observado com o acrílico, com a mudança de comportamento ocorrendo a 135% de umidade. No entanto, a partir dessa transição, os níveis de aderência foram mais elevados, sendo ainda maiores para a chapa de aço e mais expressivos para a geometria semicircular. Por outro lado, as chapas perpendiculares apresentaram um comportamento distinto em relação aos demais, com uma faixa de transição de comportamento entre 25% e 75% de saturação, caracterizada por altas aderências nos níveis subsequentes de umidade, demonstrando uma maior força de adesão entre o minério e a superfície de aço e os efeitos da granulometria mais grosseira (Figura 45).

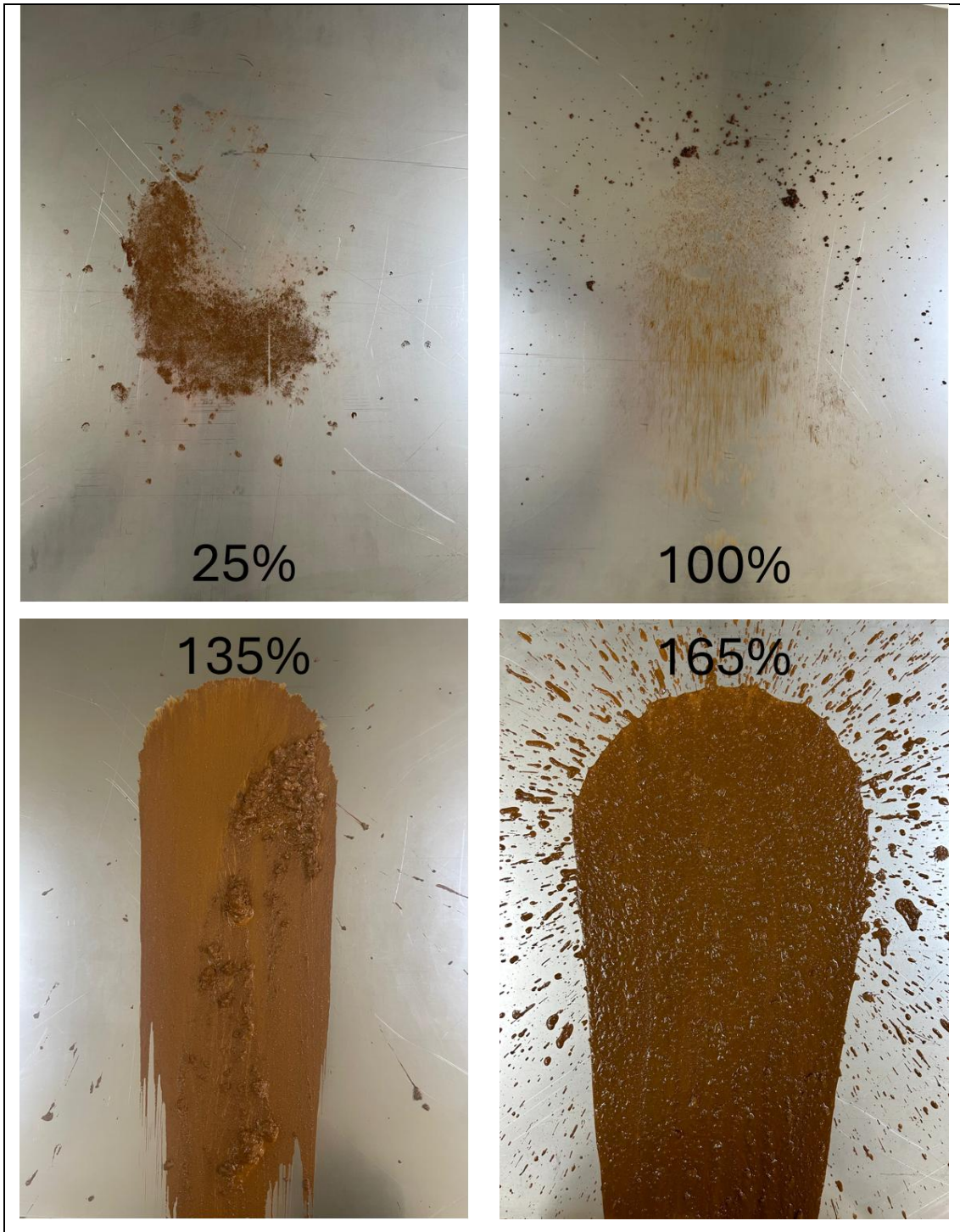


Figura 44 - Comparações entre ensaio de aderência do *sinter feed* no aço plano.

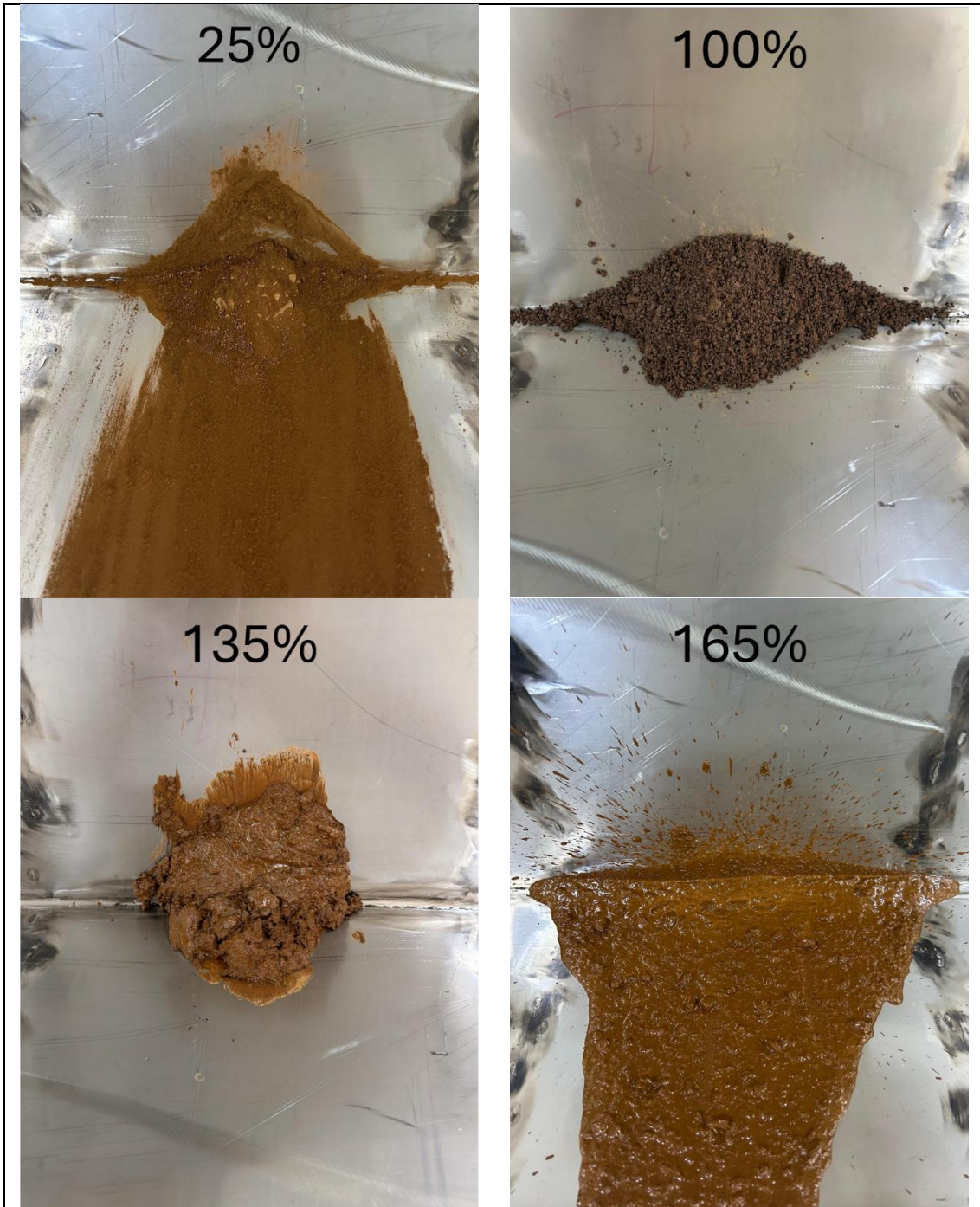


Figura 45 - Comparação de adesão do *sinter feed* nas placas soldadas perpendicularmente.

3.3 Compactação de minério com água depositada

Com a água inicialmente depositada antes do carregamento e com o minério saturado, os resultados obtidos da compactação ao longo do tempo, são identificados na Figura 46 e na Figura 47. À direita de cada curvas, são indicados os percentuais de compactação final de cada cenário.

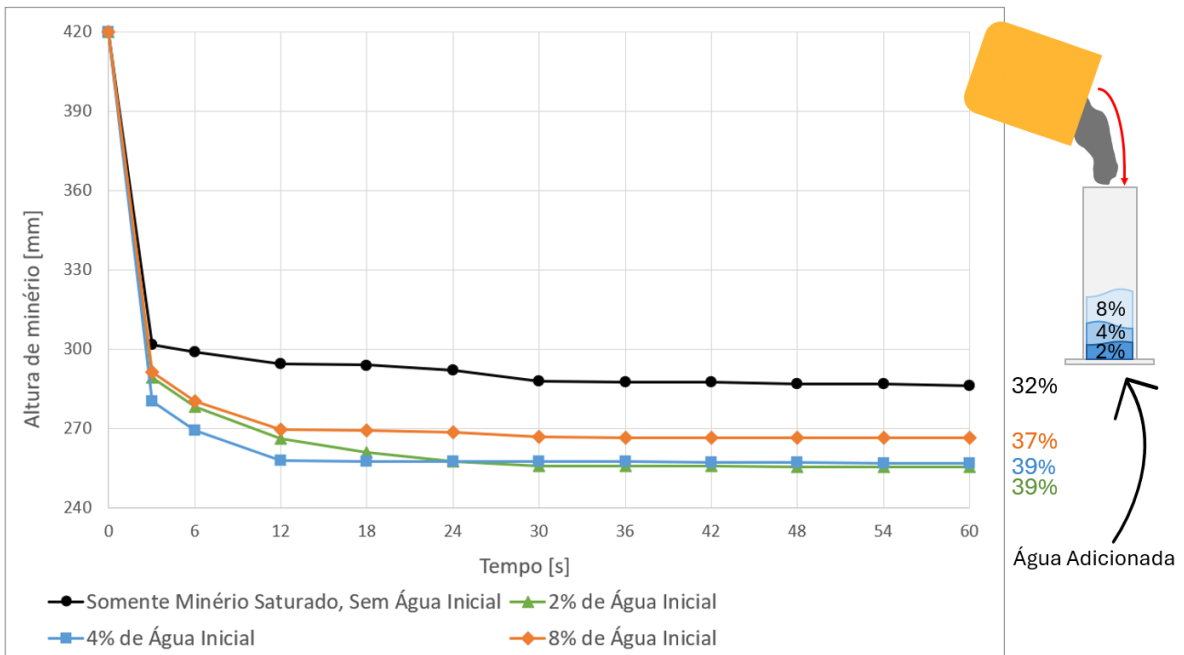


Figura 46 – Compactação de *pellet feed* com diferentes níveis de água antes do carregamento.

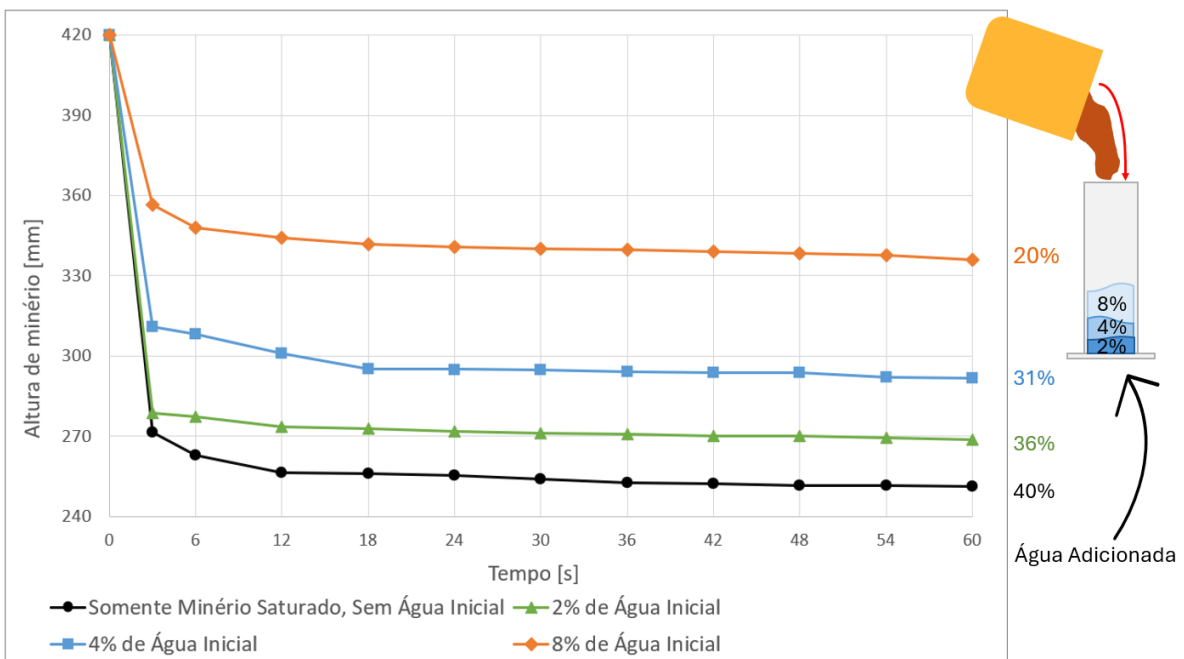


Figura 47 - Compactação de *sinter feed* com diferentes níveis de água antes do carregamento.

O *pellet feed* apresentou maior compactação nas faixas de 2% a 4% de adição de água, atingindo cerca de 39%. Para 8% de água inicial, a compactação foi superior à do minério saturado, mas ainda assim inferior às de 2% e 4%. No caso do *sinter feed*, quanto maior a adição de água, menor foi a compactação. Com o minério saturado, a compactação atingiu 40%, enquanto com a adição de

8% de água inicial, a compactação caiu para aproximadamente 20%. Esse comportamento é típico de materiais com alto teor de umidade.

Quando o material particulado se compacta com pequenas quantidades de água, o atrito entre as partículas é maior, dificultando a redução dos vazios. Em saturações mais elevadas, a água e pequenas partículas agem como um lubrificante entre os grãos, facilitando seu deslizamento e acomodação. No entanto, ao atingir saturações mais altas, o ar encontra maior dificuldade para percorrer os canais intercomunicados, pois fica envolto pela água, o que dificulta sua expulsão do minério e resulta na diminuição da compactação (LI et al., 2018; PINTO, 2006).

3.4 Protótipo de virador de vagão

Para avaliar as diferentes compactações e a aderência do minério, foram realizados ensaios com duas condições de carregamento: inicialmente com o material 100% saturado e, em seguida, com a adição de camadas de água com alturas de 5 mm, 10 mm e 20 mm, correspondentes a 2%, 4% e 8% da altura inicial de água, respectivamente. O objetivo foi simular o comportamento do minério após períodos de chuva, quando os vagões já contêm lâminas iniciais de água. Os resultados desses ensaios estão ilustrados na Figura 48 e na Figura 49.

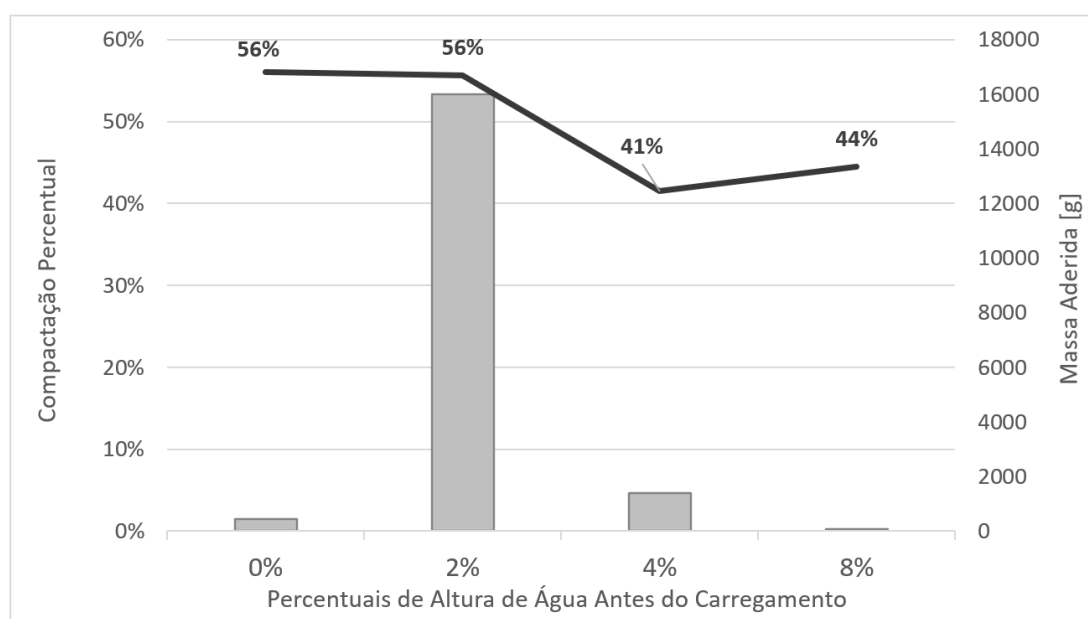


Figura 48 – Massa aderida e compactação percentual do *pellet feed* no vagão em acrílico de diferentes condições de carregamento.

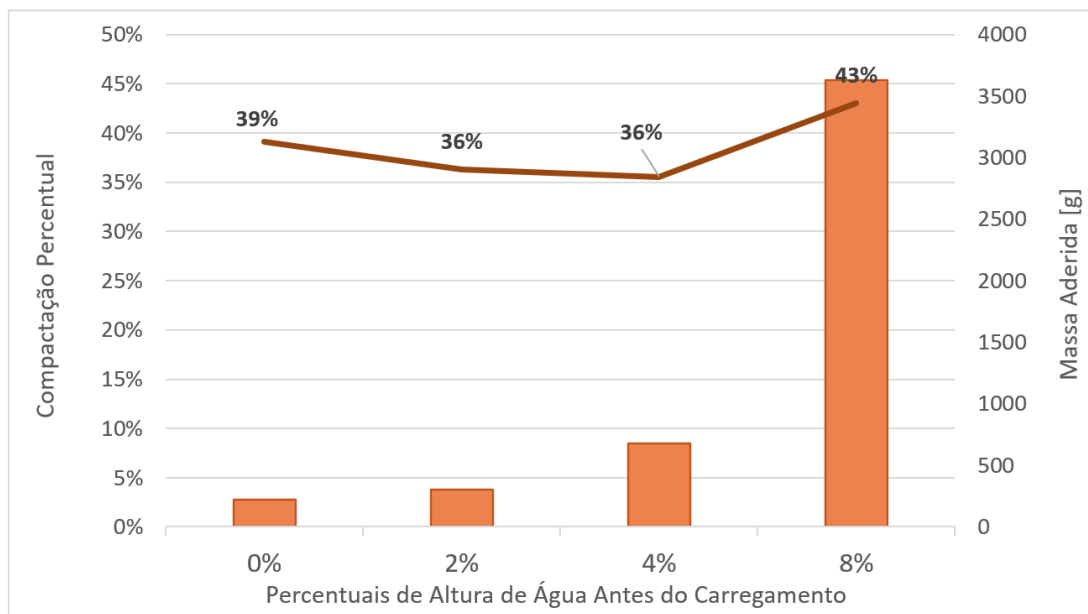


Figura 49 - Massa aderida e compactação percentual do *sinter feed* no vagão de acrílico em diferentes condições de carregamento.

O estudo revelou que o pellet feed apresentou maior compactação nos dois primeiros cenários (0% e 2% de altura de água adicionada antes do carregamento), com valores próximos de 56%. Nos cenários 3 e 4 (4% e 8%), a compactação foi menor, variando entre 41% e 44%. Quanto à massa aderida, observou-se um aumento significativo no cenário com 2% de água, seguido de uma queda acentuada no cenário de 4%, e praticamente nenhuma aderência quando o minério foi descarregado com 8% de água adicionada, conforme ilustrada a diferença de adesão na Figura 50. Tal comportamento de aderência está relacionado à geometria do vagão em acrílico e à granulometria do material particulado, que favoreceu o desprendimento do minério em bloco. À medida que a altura de água aumentou, o minério se desprende com maior facilidade do fundo do vagão, resultando em uma quantidade cada vez menor de material residual aderido.

Já com o *sinter feed*, a quantidade de minério aderido às paredes internas do vagão aumentou proporcionalmente à adição de água antes do carregamento, conforme a Figura 51. Por outro lado, a compactação do minério girou em torno de 36% a 39% até 4% de altura de água adicionada inicialmente. No último cenário de carregamento, a compactação foi maior, por volta de 43%. O aumento na compactação está associado a granulometria mais fina do minério, que, com o auxílio da água, preencheu de forma mais eficiente os

espaços intersticiais, reduzindo o volume ocupado neste caso específico. A geometria do vagão, por sua vez, também favoreceu esse comportamento ao facilitar o escoamento do ar durante o carregamento devido à maior área superficial, comportamento dissemelhante quando comparado com a proveta de 114mm de diâmetro, que possui uma área superficial substancialmente menor.

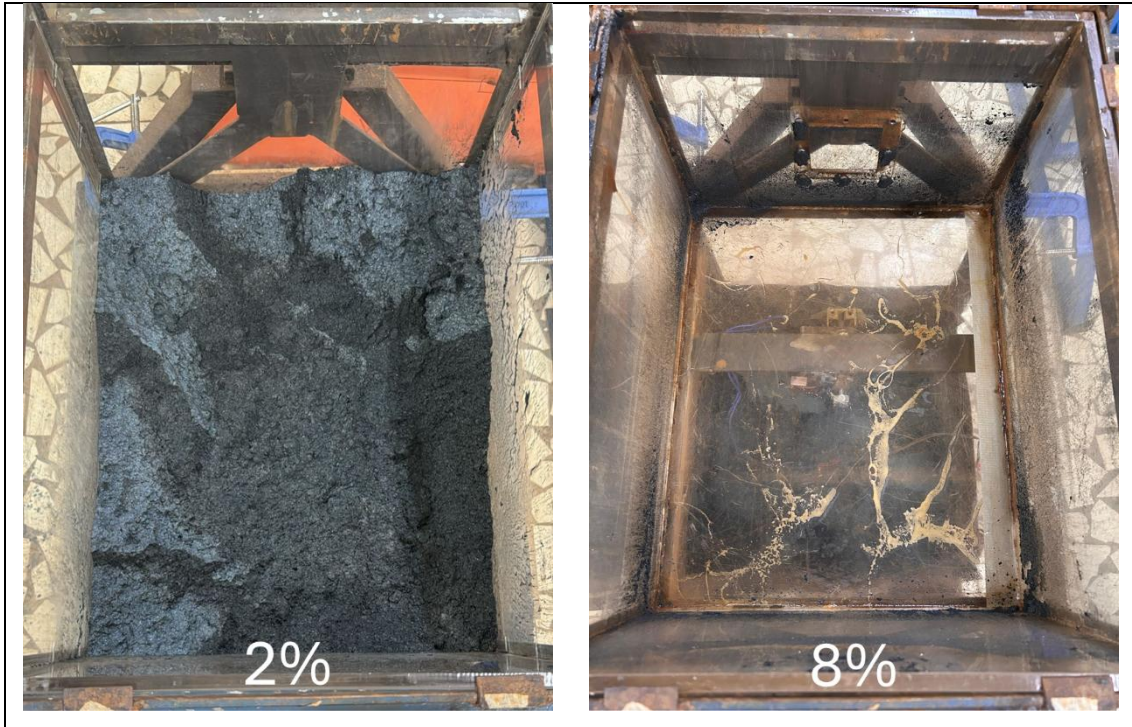


Figura 50 - Comparação de adesão do minério no vagão com 2% e 8% de água carregada antes do *pellet feed*.

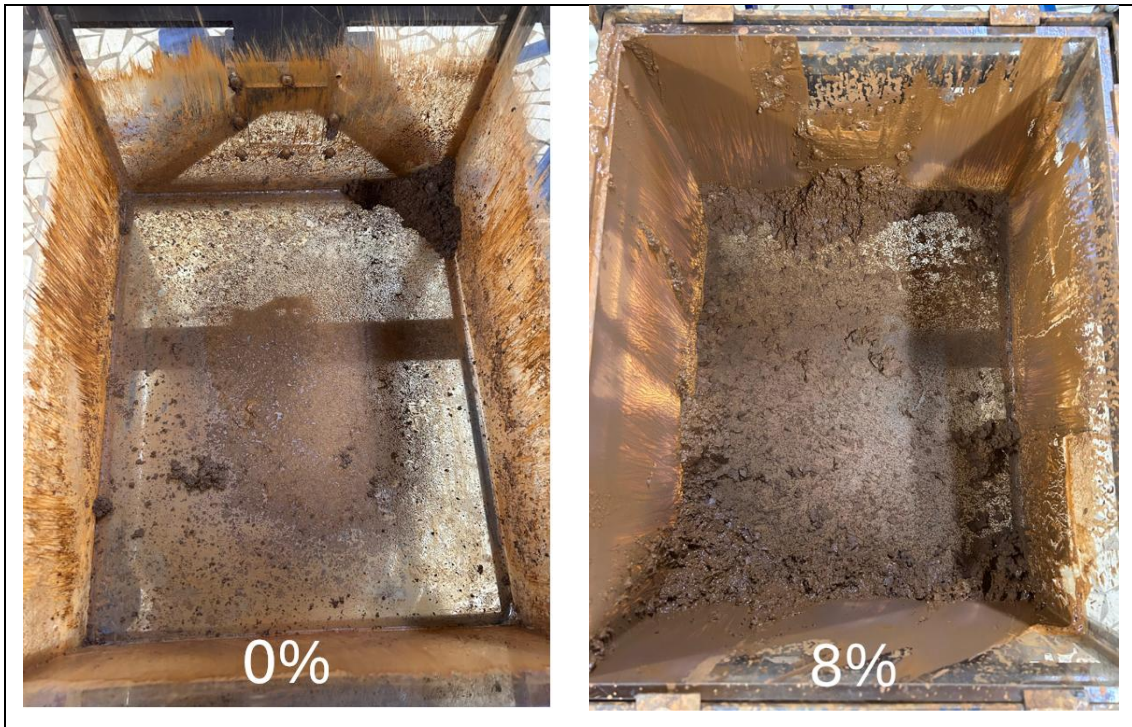


Figura 51 – Comparação de adesão do minério no vagão com 0% e 8% de água carregada antes do *sinter feed*.

4. CONCLUSÕES

Através deste trabalho foi possível avaliar o comportamento de aderência do minério em diferentes geometrias e condições de saturação e concluiu-se que:

- a) Diferenças nas Propriedades dos Minérios: Os ensaios realizados evidenciaram diferenças significativas entre os dois tipos de minério analisados: *pellet feed* e *sinter feed*. O *pellet feed* apresenta partículas menores e mais uniformes, o que favorece uma maior aderência, especialmente em condições de baixa saturação. Já o *sinter feed*, devido à sua maior variabilidade granulométrica, mostrou-se menos sensível à variação nos níveis de saturação, resultando em menor aderência geral.
- b) Influência da água na compactação: A presença de água no fundo do vagão influenciou de maneira distinta a compactação de cada tipo de minério. Para o *pellet feed*, observou-se um aumento na compactação à medida que a altura da lâmina d'água aumentava, indicando que a água contribuiu para o adensamento do material. Em contraste, o *sinter feed* apresentou comportamento oposto, com redução na compactação conforme se elevava a altura de água no fundo, provavelmente devido à granulometria mais heterogênea que dificultou o preenchimento eficiente dos espaços intersticiais.
- c) Implicações Operacionais: As diferenças no comportamento entre os minérios também geram implicações operacionais relevantes. O *pellet feed* apresentou alta aderência nas condições mais saturadas, atingindo cerca de 87% de material aderido nas superfícies em saturações superiores a 8% e 15%. Por outro lado, o *sinter feed* demonstrou baixa aderência, com valores inferiores a 10% em uma ampla faixa de saturação (de 0% a 130%), com exceção dos casos em que foram utilizadas chapas soldadas perpendicularmente, que influenciaram diretamente na retenção do material.

5. REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11691:2024 – **Vagão ferroviário – Classificação, identificação e marcação**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2024.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO 3852:2009 – **Minérios de ferro como insumo para alto-forno e redução direta – Determinação da densidade a granel**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

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

ALENCAR, J. P. S. G.; CARMO, G. S. do; SILVA, N. L. A. et al. **Avaliação da influência da tipologia do minério em testes de sticking**. ABM – Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 18, 2021.

ANM – Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas 2023**. Ministério de Minas e Energia, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ANTT – Agência Nacional de Transportes Terrestres. **Relatório Anual de Acompanhamento das Concessões Ferroviárias Ano 2008**. 29 jun. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/relatorios-e-plano-trienal-de-investimentos-pti-1/2008>. Acesso em: 20 dez 2024.

ANTT – Agência Nacional dos Transportes Terrestres. **Panorama do Setor 2023 – 2024 Boletim de Informações Gerais**. Informações Estratégicas, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/informacoes-estrategicas>. Acesso em 20 dez. 2024.

ATKINS, P.; PAULA, J. D. **Físico-Química Volume 2**. 10. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2018, 598p.

AZEVEDO, J. M. C. B. **Absorção por Capilaridade de Soluções Aquosas Salinas em Materiais Porosos**. Porto: FEUP, 2013. 92p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia do Porto, Porto, Portugal, 2013.

BROWN, T. L.; JUNIOR, H. E. L.; BURSTEN, B. E. et al. **Química: A Ciência Central** 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016, 1216p.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N.; RODRIGUES, J. M. A. **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações, Volume 1: Fundamentos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2015, 234p.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios: Bombeamento de Polpa e Classificação**. 5. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2022, 304p.

ClimaTempo. **Climatologia em Barão de Cocais, BR.** 2024. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/3599/baraodecocais-mg>. Acesso em: 20 dez. 2024.

ClimaTempo. **Climatologia em Canaã dos Carajás, BR.** 2024. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/6439/canaadoscarajas-br>. Acesso em: 20 dez. 2024.

COSENTINO, P. G. de S. **Viragem de Vagões de *Pellet Feed* de Minério de Ferro: Dispositivo de Ensaio e Modelagem.** Rio de Janeiro: Politécnica UFRJ, 2018. 50p. Projeto de Graduação - Bacharelado em Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos.** 1. ed. São Paulo: Blucher, 2012, 423p.

DAIHAO, S.; MIN, W.; YANJUN, L. et al. **Research Progress of Non-destructive Testing Techniques in Moisture Content Determination.** Smart Agricultural Technology. 2025.

FERREIRA, R. F.; LIMA, R. M. F. **Relationship Between Particle Size Distribution and the PFD80 Transportable Moisture Limit of Iron Ore Fines.** Powder Technology, v. 414. janeiro de 2023.

FLORENCE, J. B. C.; TABATÁ, G. A.; ALVES, L. de S et al. **Determinação Do Ângulo Máximo De Carregamento Em Correia Transportadora Para Minério De Ferro Do Tipo *Sinter Feed* Em Condições Seco E Úmido.** ENPG 2023, v. 7 nº. 1. setembro de 2023.

FURAT, O.; LEISSNER, T.; DITSCHERLEIN, R. et al. **Description of Ore Particles from XMT Images, Supported by SEM-based Image Analysis.** arXiv preprint arXiv: 1806.03239. junho de 2018.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física – Volume 3: Eletromagnetismo.** 10. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2016, 408p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Em 2022, minério de ferro perde posição e petróleo bruto se torna o principal produto industrial do país.** Agência IBGE de Notícias, 27 jun. 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/40486-em-2022-minerio-de-ferro-perde-posicao-e-petroleo-bruto-se-torna-o-principal-produto-industrial-do-pais>. Acesso em: 20 dez. 2024.

KAN, H.; NAKAMURA, H.; WATANO, S. **Effect of Particle Wettability on Particle-particle Adhesion of Colliding Particles Through Droplet.** Powder Technology, v. 302, p. 406-413. novembro de 2016.

KOWALCZUK, P. B.; DRZYMALA, J. **Physical Meaning of the Sauter Mean Diameter of Spherical Particulate Matter.** Particulate Science and Technology, v. 34, n. 6, p. 645–647. janeiro de 2016.

LI, M. Z.; HE, Y. P.; LIU, Y. D. et al. **Effect of Interaction of Particles with Different Sizes on Particle Kinetics in Multi-sized Slurry Transport by Pipeline**. Powder Technology, v.338, p.915–930. outubro de 2018.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAIA, D.; CAVALCANTE, F.; ANTONIALLI, F. et al. **Capacitação Mina, Ferrovia e Porto para Redução dos Impactos de Manuseio de Minério de Ferro no Sistema de Descarga do Porto de Ponta da Madeira**. 42º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas; 13º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro; 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking, v. 6, n.6, p. 2781-2792, 2012.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 7. ed. Boston: McGraw Hill, 2009, 1140p.

MITARAI, N.; NORI, F. **Wet Granular Materials**. Advances in Physics, v. 55 p. 1-45. 2006.

MT – Ministério dos Transportes. **Movimentação de carga geral atinge maior patamar dos últimos 18 anos**. 09 fev. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/noticias/2024/02/movimentacao-de-carga-geral-atinge-maior-patamar-dos-ultimos-18-anos>. Acesso em: 20 dez. 2024.

MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. **Determination of the Transportable Moisture Limit of Iron Ore Fines for the Prevention of Liquefaction in Bulk Carriers**. Marine Structures, v. 40, p. 193-224. janeiro de 2015.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica – Volume 1: Mecânica**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2013, 394p.

PASCOAL, A. D. L.; GONÇALVES, F. M.; ANDRADE, M. D. A. et al. **Estudo da Produção de Sinter Feed e Pellet Feed de Acordo com a Granulometria**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 35, n. 3, p. 151-154. dezembro de 2016.

PAYAM, A. F. **Modeling and Analysis of the Capillary Force for Interactions of Different Tip/Substrate in AFM Based on the Energy Method**. ACS Measurement Science Au, v. 3, n° 3, p. 194-199. março de 2023.

PETEAN, P. G. C.; AGUIAR, M. L. **Determining the Adhesion Force Between Particles and Rough Surfaces**. Powder Technology, v. 274, p. 67-76. abril de 2015.

PINTO, C. D. S. **Curso básico de mecânica dos solos: com exercícios resolvidos em 16 aulas**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006, 247p.

SEMYKINA, A.; ZAGORODNIY, N.; FOMENKO, Y. et al. **Problems of a transport complex of mining and processing plants**. The VI International Scientific and Practical Conference “Information Technologies and Management of Transport Systems” (ITMTS 2020), v. 334, n° 02034. janeiro de 2021.

SERWAY, R. A.; JUNIOR, J. W. J. **Princípios de Física - Volume 1: Mecânica Clássica e Relatividade**. 5. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014, 404p.

SEVERINO, R. O.; LUZ, J. A. M. **Efeito da Concentração de Sólidos no Bombeamento de Polpas**. XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. novembro de 2019.

TANG, K.; LV, X.; WU, S. et al. **Measurement for Contact Angle of Iron Ore Particles and Water**. *ISIJ International*, v. 58, n. 3, p. 379-400. 2018.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2019, 487p.

VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. 4. Ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1977, 509p.

YANG, J.; HEINICHEN, N.; VELANKAR, S. S. **The Effect of Particle Wettability on the of Rheology Particulate Suspensions with Capillary Force**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v.558, p.164-170. dezembro de 2018.

YOU, S.; WAN, M. P. **Mathematical Models for the van der Waals Force and Capillary Force Between a Rough Particle and Surface**. *Langmuir*, v. 29, n. 29, p. 9104-9117. junho de 2013.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física II, Sears e Zemansky: Termodinâmica e Ondas**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016, 374p.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física III, Sears e Zemansky: Eletromagnetismo**. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2015, 470p.

APÊNDICE A – Cálculo do Diâmetro Médio de Sauter para o *pellet feed*.

A Tabela 4 ilustra o percentual mássico de cada peneira e os diâmetros médios de abertura de peneira do *pellet feed* para cálculo do diâmetro médio de Sauter.

Tabela 4 – Granulometria do *pellet feed* para cálculo de diâmetro médio de Sauter.

Abertura da Peneira [μm]	Abertura da Peneira [mm]	D_m [mm]	Massa Retida [g]	Fração Mássica	Fração Mássica/ D_m
1180	1,18	1,590	0,00	0,000	0,000
1000	1	1,090	1,34	0,002	0,002
710	0,71	0,855	1,03	0,001	0,002
500	0,5	0,605	2,07	0,003	0,004
355	0,355	0,428	2,27	0,003	0,007
250	0,25	0,303	7,01	0,009	0,029
180	0,18	0,215	21,18	0,026	0,123
125	0,125	0,153	58,88	0,074	0,483
90	0,09	0,108	146,57	0,183	1,705
63	0,063	0,077	189,45	0,237	3,096
45	0,045	0,054	189,08	0,236	4,378
38	0,038	0,042	63,71	0,080	1,919
25	0,025	0,032	85,22	0,107	3,382
20	0,02	0,023	24,51	0,031	1,362
Bandeja		0,010	7,53	0,009	0,941
Total		-	800,00	1,000	17,432

A partir da Equação 6, foi determinado o diâmetro médio de Sauter para o *pellet feed* na Equação 11.

$$\bar{D}_S = \frac{1}{\sum_{i=1}^z \left(\frac{x_i}{D_{pi}} \right)} = \frac{1}{17,432} = 0,057\text{mm} \quad (11)$$

APÊNDICE B - Cálculo do Diâmetro Médio de Sauter para o *sinter feed*.

A Tabela 5 ilustra o percentual mássico de cada peneira e os diâmetros médios de abertura de peneira do *sinter feed* para cálculo do diâmetro médio de Sauter.

Tabela 5 - Granulometria do *sinter feed* para cálculo de diâmetro médio de Sauter.

Abertura da Peneira [μm]	Abertura da Peneira [mm]	D_m [mm]	Massa Retida [g]	Fração Mássica	Fração Mássica/ D_m
16000	16	20,500	0,00	0,000	0,000
12500	12,5	14,250	42,26	0,053	0,004
9500	9,5	11,000	35,09	0,044	0,004
8000	8	8,750	37,82	0,047	0,005
6300	6,3	7,150	24,80	0,031	0,004
5600	5,6	5,950	23,87	0,030	0,005
4750	4,75	5,175	16,93	0,021	0,004
4000	4	4,375	15,74	0,020	0,005
2800	2,8	3,400	43,68	0,055	0,016
2000	2	2,400	46,12	0,058	0,024
1700	1,7	1,850	22,43	0,028	0,015
1400	1,4	1,550	18,99	0,024	0,015
1180	1,18	1,290	17,26	0,022	0,017
1000	1	1,090	20,67	0,026	0,024
710	0,71	0,855	23,78	0,030	0,035
500	0,5	0,605	28,84	0,036	0,060
355	0,355	0,428	22,34	0,028	0,066
250	0,25	0,303	38,75	0,049	0,161
180	0,18	0,215	47,59	0,060	0,277
125	0,125	0,153	37,59	0,047	0,309
90	0,09	0,108	66,60	0,083	0,777
63	0,063	0,077	91,25	0,114	1,495
45	0,045	0,054	44,53	0,056	1,034
38	0,038	0,042	7,38	0,009	0,223
25	0,025	0,032	19,59	0,025	0,780
20	0,02	0,023	2,62	0,003	0,146
	Bandeja	0,010	1,25	0,002	0,157
	Total	-	800,00	1,000	5,660

A partir da Equação 6, foi determinado o diâmetro médio de Sauter para o *sinter feed* na Equação 12.

$$\bar{D}_S = \frac{1}{\sum_{i=1}^Z \left(\frac{x_i}{\bar{D}_{pi}} \right)} = \frac{1}{5,660} = 0,177mm \quad (12)$$

APÊNDICE C – Cálculo do Diâmetro Efetivo, Coeficiente de Uniformidade e Coeficiente de Curvatura do *pellet feed*.

A Figura 52 demonstra os valores obtidos para cálculo de parâmetros a partir da curva granulométrica do *pellet feed*.

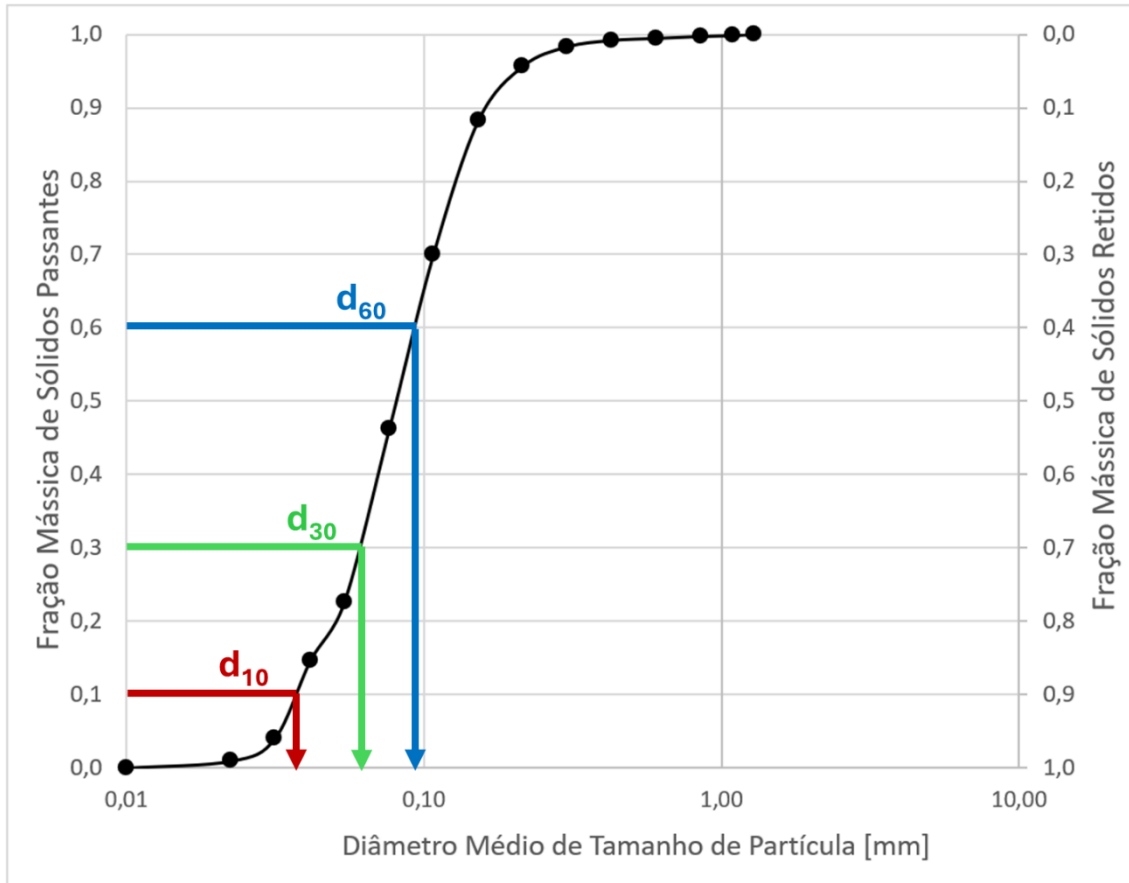


Figura 52 – Granulometria para calcular parâmetros de caracterização do *pellet feed*.

A partir do diâmetro de 10% do material passante, foi obtido o Diâmetro Efetivo de 0,037mm. De acordo com as Equações 4 e 5, o coeficiente de uniformidade e de curvatura do *pellet feed* foram calculados nas Equações 13 e 14, respectivamente.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,094 \text{ mm}}{0,037 \text{ mm}} = 2,5 \quad (13)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{(0,061 \text{ mm})^2}{0,094 \text{ mm} \cdot 0,037 \text{ mm}} = 1,1 \quad (14)$$

APÊNDICE D – Cálculo do Diâmetro Efetivo, Coeficiente de Uniformidade e Coeficiente de Curvatura do *sinter feed*.

A Figura 53 demonstra os valores obtidos para cálculo de parâmetros a partir da curva granulométrica do *sinter feed*.

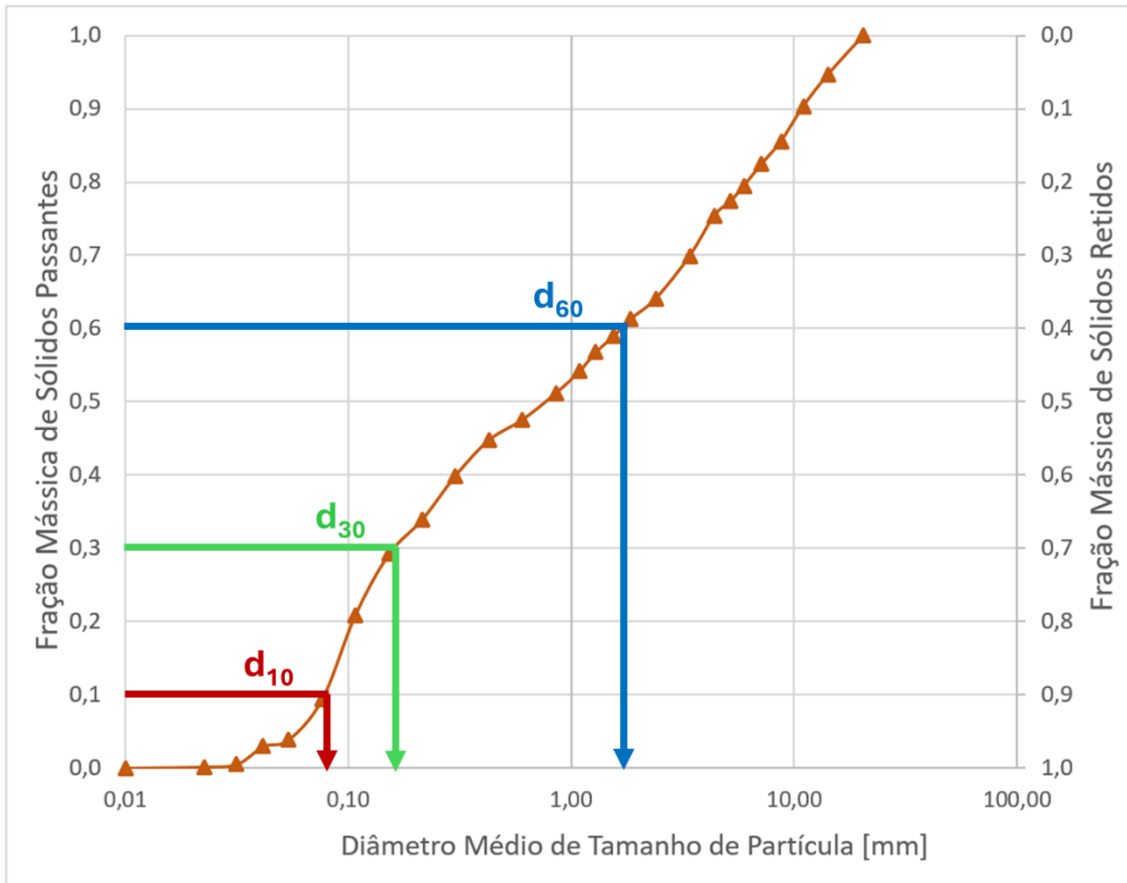


Figura 53 – Granulometria para calcular parâmetros de caracterização do *sinter feed*.

A partir do diâmetro de 10% do material passante, foi obtido o Diâmetro Efetivo de 0,078mm. De acordo com as Equações 4 e 5, o coeficiente de uniformidade e de curvatura do *sinter feed* foram calculados nas Equações 15 e 16, respectivamente.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{1,687 \text{ mm}}{0,078 \text{ mm}} = 21,6 \quad (15)$$

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} \cdot d_{10}} = \frac{(0,163 \text{ mm})^2}{1,687 \text{ mm} \cdot 0,078 \text{ mm}} = 0,2 \quad (16)$$