



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

MAYCON MAGALHÃES CASTRO

EXPERIMENTO EM ESCALA DE EMISSÃO DE POEIRA NO PROCESSO DE EMPILHAMENTO

Tucuruí, Pará

2022

MAYCON MAGALHÃES CASTRO

**EXPERIMENTO EM ESCALA DE EMISSÃO DE POEIRA NO PROCESSO DE
EMPILHAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Desenvolvimento Energético.

Orientador: Prof. Dr. Luis Paulo Silveira Machado
Coorientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Tucuruí, Pará

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

C355e Castro, Maycon Magalhães.
EXPERIMENTO EM ESCALA DE EMISSÃO DE POEIRA
NO PROCESSO DE EMPILHAMENTO / Maycon Magalhães
Castro. — 2022.
114 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Luis Paulo Silveira Machado
Coorientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2022.

1. Poeira fugitiva. 2. Supressão de poeira. 3.
Material particulado. 4. Empilhamento de minério. 5.
Sistemas de pulverização. I. Título.

CDD 620

MAYCON MAGALHÃES CASTRO

**EXPERIMENTO EM ESCALA DE EMISSÃO DE POEIRA NO PROCESSO DE
EMPILHAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Desenvolvimento Energético.

Orientador: Prof. Dr. Luis Paulo Silveira Machado
Coorientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Aprovada em 25 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Doutor / Luis Paulo Silveira Machado / UFPA – Orientador



Prof. Doutor / André Luiz Amarante Mesquita / UFPA – Coorientador



Prof. Doutor / Alexandre Luiz Amarante Mesquita / UFPA – Examinador interno



Prof. Doutor / Márcio Ferreira Martins / UFES – Examinador externo

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus, à minha família, meus pais Maria Perpétua e Joselino, à minha avó Nazaré e aos meus irmãos Laíse e Madson, pelo incentivo que sempre me proporcionaram durante todos os períodos da minha vida pessoal e profissional.

Quero agradecer ao professor Luis Paulo Silveira Machado, pela orientação e André Luiz Amarante Mesquita, pela orientação, apoio e amizade durante todas as etapas que tracei até chegar aqui. Aos meus amigos Alex Lopes, Arthur Fontana, Artur Cunha, Clésio Silva, Danilo Silva, Davi Sales e Vinicius Serrão pela ajuda e compromisso que tiveram durante toda a etapa experimental deste trabalho. E em especial a Hermeson Wanzeler e Ryan Louzada a dedicação desses alunos foi primordial para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao Laboratório de Estudo Fluidodinâmico e Particulados (FluidPar), a Associação Parque De Tecnologia Do Lago De Tucuruí (TECNOLAGO), a Universidade Federal do Pará (UFPA), e ao projeto de parceria entre a Vale e o Laboratório FluidPar pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

Agradeço a todos os contribuintes do TECNOLAGO que de alguma forma me ajudou, sejam as mulheres da limpeza que mantêm o zelo do nosso local de pesquisa, como também os guardas que nos mantêm seguro. Por fim, agradeço a todos os amigos e colegas pelo carinho, respeito e apoio durante esta etapa da minha vida.

RESUMO

EXPERIMENTO EM ESCALA DE EMISSÃO DE POEIRA NO PROCESSO DE EMPILHAMENTO

A emissão de poeira pode levar a problemas de saúde, riscos de explosão, segregação de materiais e poluição ambiental. Por isso, deve-se compreender os parâmetros relacionados à geração de poeira para aprimorar técnicas de controle da emissão de particulados. A redução de poeira com base na pulverização via spray é o principal método para prevenir e controlar a emissão de poeira no empilhamento de minério. As técnicas de supressão de poeira nos pontos de transferência da correia transportadora podem ser subdivididas em aspersão do material e captura de partículas fugitivas. Para analisar os parâmetros associados à geração de poeira durante o empilhamento de minério, foi desenvolvido uma bancada de transportadores em escala para testes de supressão de poeira via spray de água. Esta instalação está equipada com bicos de pulverização, cuja localização relativa na esteira pode ser ajustada e a velocidade do transportador também pode ser controlada. O jato de pulverização é fornecido por um conjunto de módulo de spray e divisor de fluxo, permitindo a variação da pressão do sistema e com a possibilidade de utilização de supressores, que podem aumentar a eficiência da captura de partículas. O desempenho da supressão de poeira é analisado através do monitoramento em pontos estratégicos com maior emissão de poeira. Os resultados dessa investigação mostram que a geração de poeira aumentou à medida que a altura de queda aumentou, observou-se que a região próxima a pilha emite uma maior concentração de poeira, devido ao impacto do fluxo de material sobre a superfície de empilhamento, em comparação a região frontal do fluxo. Os resultados após o uso do spray sobre a correia mostraram que a maior altura de queda (1600 mm) emitia a maior concentração de partículas ($3192,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) após a aspersão, sobre o material, a concentração de poeira reduziu cerca de quase 70%, mostrando a eficiência da umidificação via spray. Observou-se também que o PF possui uma umidade crítica maior que a do SF, como também, emite uma maior concentração ($1116,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$) em comparação ao *Sínter feed* ($848,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ficando evidente que por se tratar de um material de granulometria menor o Pellet feed tende a emitir maior concentração de particulados quando manuseado.

Palavras-chave: Poeira fugitiva. Supressão de poeira. Material particulado. Empilhamento de minério. Sistemas de pulverização.

ABSTRACT

EXPERIMENT IN SCALE OF DUST EMISSION IN THE STACKING PROCESS

Dust emission can lead to health problems, explosion risk, material segregation and environmental pollution. Therefore, it is necessary to understand the parameters related to dust generation to improve particulate emission control techniques. Dust reduction based on spray spraying is the main method to prevent and control dust emission in ore stacking. Dust suppression techniques at conveyor belt transfer points can be subdivided into material spraying and trapping of fugitive particles. To analyze the parameters associated with dust generation during ore stacking, a scaled conveyor bench was developed for dust suppression tests via water spray. This installation is equipped with spray nozzles whose relative location on the belt can be adjusted and the speed of the conveyor can also be controlled. The spray jet is provided by a set of spray module and flow divider, allowing the variation of the system pressure and with the possibility of using suppressors, which can increase the efficiency of particle capture. Dust suppression performance is analyzed by monitoring strategic points with the highest dust emission. The results of this investigation show that dust generation increased as the drop height increased, it was observed that the region close to the pile emits a higher concentration of dust, due to the impact of the material flow on the stacking surface, in compared to the front region of the flow. The results after using the spray on the belt showed that the highest drop height (1600 mm) emitted the highest concentration of particles (3192.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) after spraying, on the material, the dust concentration reduced by about almost 70%, showing the efficiency of spray humidification. It was also observed that PF has a higher critical humidity than that of SF, as well as that it emits a higher concentration (1116.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) compared to Sinter feed (848.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), making it evident that by as it is a material with a smaller granulometry, the pellet feed tends to emit a higher concentration of particulates when handled.

Keywords: Dust generation. Dust suppression. Particulate matter. Ore stacking. Spray systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação esquemática das principais regiões do trato respiratório e sua correspondência com as frações inalável, torácica e respirável.	18
Figura 2.2 – A cadeia de suprimentos do minério de ferro no Sistema Sudeste.	21
Figura 2.3 – Equipamento utilizado para empilhamento de minério.	22
Figura 2.4 – Emissão de poeira no processo de transferência de material em queda livre.	23
Figura 2.6 – Indução de ar à medida que o material entra em queda.	24
Figura 2.7 – Interação entre tamanho de gota e partícula de poeira.	25
Figura 2.8 – Desempenho da supressão de poeira em função do tipo de bico.	27
Figura 3.1 – Bancada de transportadores para ensaios em chutes de transferência.	35
Figura 3.2 – Laboratório de transportadores de correia.	36
Figura 3.3 – Transportador de correia modificado.	38
Figura 3.4 – Moega de alimentação com comporta regulável.	39
Figura 3.5 – Mesa de empilhamento de minério.	40
Figura 3.6 – Sistema de aspersão via spray.	40
Figura 3.7 – Esquema de posições do spray para contenção da poeira.	41
Figura 3.8 – Fluxograma do sistema de abastecimento dos sprays.	41
Figura 3.9 – Sistema de abastecimento de spray.	42
Figura 3.10 – Contador de partículas Particles Plus 8506.	43
Figura 4.1 – Materiais a serem ensaiados: a) <i>Pellet Feed-A</i> , b) <i>Pellet Feed-B</i> , c) <i>Sínter Feed-A</i> , d) <i>Sínter Feed-B</i>	45
Figura 4.2 – Peneira vibratória utilizada.	46
Figura 4.3 – Granulometria dos materiais utilizados nos ensaios.	47
Figura 4.4 – Fotomicrografia obtida ao MEV com aumento de 86X do <i>Pellet Feed-A</i>	49
Figura 4.5 – Fotomicrografia do PF-A: 1760x (esquerda) e 12700x (direita).	50
Figura 4.6 – Fotomicrografia do PF-B: 3460x (esquerda) e 11500x (direita).	50
Figura 4.7 – Fotomicrografia do SF-B: 2670x (esquerda) e 11500x (direita).	51
Figura 4.8 – Picnômetro de 100 ml: a) Sem material, b) Com material.	52
Figura 4.9 – Recipiente utilizado para medição da massa específica aparente: a) Sem material, b) Com material.	54

Figura 5.1 – Desenho esquemático da bancada de empilhamento.	56
Figura 5.2 – Bico de spray de pulverização fina.	56
Figura 5.3 – Bico de spray padrão cone oco.	57
Figura 5.4 – Diagrama de experimentos dos materiais sem/com supressão, variando a altura de empilhamento.	60
Figura 5.5 - Configuração para o ensaio de queda livre de material no tubo.	62
Figura 5.6 – Exemplo de procedimento para determinação de humidade crítica. Onde $F(x)$ é a função de potência e $G(x)$ a função linear.	63
Figura 5.7 – Configuração das alturas dos contadores em relação a mesa de empilhamento (vista frontal).	64
Figura 5.8 – Concentração de partículas de tamanho PM10, medidas por um contador Frontal à descarga do material particulado. Para $h=900$ mm tem-se a maior emissão.	65
Figura 5.9 – Concentração de partículas de tamanho PM10, medidas por um contador Lateral à descarga do material particulado. Para $h=900$ mm tem-se a maior emissão.	66
Figura 5.11 – Concentração de partículas de MP10, medidas por um contador frontal e outro lateral. Para ensaios com spray e correia funcionando sem material.	67
Figura 5.12 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Frontal a descarga do material particulado. Para $h=800$ mm tem-se a maior emissão.	68
Figura 5.13 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Lateral a descarga do material particulado. Para $h=1600$ mm tem-se a maior.	69
Figura 6.1 – Concentração máxima de partículas (MP10), medida no teste de queda para as amostras de <i>Pellet feed</i> - A com o teor de umidade crescente. O teor da umidade crítica foi de 4,7%.	71
Figura 6.2 – Concentração máxima de partículas (MP10), medida no teste de queda para as amostras de <i>Sínter feed</i> - A com o teor de umidade crescente. O teor da umidade crítica foi de 2%.	71
Figura 6.3 – Concentração máxima de partículas (PM10), medida no teste de queda para as amostras de <i>Sínter feed</i> - B com o teor de umidade crescente. O teor da umidade crítica foi de 3%.	72
Figura 6.4 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Frontal a descarga do material particulado. Para $h=1600$ mm tem-se a maior emissão.	73

Figura 6.5 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Lateral a descarga do material particulado. Para h=1600 mm tem-se a maior emissão.....	74
Figura 6.6 – Concentração de partículas MP10, medidas por um contador Frontal a descarga de material. Com spray. Para h=1600 mm tem-se a maior emissão.....	75
Figura 6.7 – Concentração de partículas MP10, medidas por um contador Lateral a descarga de material. Com spray. Para h=1600 mm tem-se a maior emissão.....	76
Figura 6.8 – Concentração de partículas MP10, sem e com spray, medidas por um contador Frontal a descarga do material. Material Sínter feed com 1,69% de umidade.	78
Figura 6.9 – Concentração de partículas MP10, sem e com spray, medidas por um contador Lateral a descarga do material. Material Sínter feed com 1,69% de umidade.	80
Figura 6.10 – Concentração máxima de partículas de tamanho MP10, medida no Teste de Queda para as amostras de <i>Pellet feed</i> e <i>Sínter feed</i> com o teor de umidade crescente. O material <i>Pellet feed</i> apresentou um teor de umidade maior.....	81
Figura 6.11 – Concentração de partículas MP 10, medidas por um contador frontal (painel superior) e um contador lateral (painel inferior).....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Padrões nacionais e estaduais de qualidade do ar.....	20
Tabela 4.1 – Informações iniciais dos materiais recebidos para estudos.	44
Tabela 4.2 – Dados obtidos do ensaio de massa específica real (g/cm ³).	53
Tabela 4.3 – Dados obtidos do ensaio de massa específica aparente (g/cm ³).	55
Tabela 5.1 – Medições de vazão para as pressões de 4, 5 e 6 bar.....	57
Tabela 5.2 – Informações de uma empilhadeira real.....	58
Tabela 5.3 – Resumo das informações do protótipo e modelo da empilhadeira.	59
Tabela 5.4 – Altura dos contadores (1 e 2), em relação a mesa de empilhamento, para cada altura de queda.	66

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	<i>Considerações gerais</i>	12
1.2.	<i>Justificativa.....</i>	13
1.3.	<i>Objetivos</i>	14
1.3.1.	Objetivo Geral	14
1.3.2.	Objetivos Específicos	14
1.4.	<i>Estrutura do Trabalho</i>	14
2.	FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1.	<i>Impacto da emissão de poeira na qualidade do ar.....</i>	16
2.2.	<i>Emissão de poeira em processo de empilhamento</i>	20
2.3.	<i>Abatimento de poeira via spray em empilhamento.....</i>	24
2.3.1.	Eficiência dos bicos de aspersão (sprays)	25
2.4.	<i>Análise dimensional e similaridade</i>	28
2.4.1.	Condições de similaridade.....	28
2.4.2.	Teorema de vaschy-buckingham.....	29
2.4.3.	Similaridade para correias de transferência	31
3.	LABORATÓRIO DE ESTUDO EM TRANSPORTADORES.....	35
3.1.	<i>Descrição do Laboratório</i>	35
3.1.1.	Sistema de transportadores de correia	36
3.1.2.	Sistema de alimentação da correia	38
3.1.3.	Sistema de variação da altura de empilhamento.....	39
3.1.4.	Sistema de aspersão via sprays	40
3.1.5.	Sistema de medição de particulados	42
4.	DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	44
4.1.	<i>Caracterização dos Materiais</i>	44
4.1.1.	Granulometria	45
4.1.2.	Microscopia Eletrônica de Varredura.....	48
4.1.3.	Massa Específica Real	51
4.1.4.	Massa Específica Aparente	53
5.	MÉTODOS DE ENSAIOS DE EMPILHAMENTO EM ESCALA 1:6,45	56
5.1.1.	Descrição.....	56
5.1.2.	Estudo de Similaridade.....	57
5.1.3.	Metodologia de ensaios para empilhamento	59
5.1.4.	Metodologia de ensaio de queda de material em tubo	61

5.2. Testes para validação da bancada	64
5.2.1. Definição do posicionamento da medição de partículas	64
5.2.2. Verificação da influência dos sprays no ponto de transbordo.....	66
5.2.3. Testes iniciais para ajuste de metodologia utilizando PF-B	67
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	70
6.1. <i>Ensaios de queda em tubo</i>	<i>70</i>
6.2. <i>Ensaios variando a altura de empilhamento sem spray (SF-A)</i>	<i>72</i>
6.3. <i>Ensaios variando a altura de empilhamento com spray (SF-B)</i>	<i>74</i>
6.4. <i>Avaliação do uso de spray na contenção da poeira</i>	<i>76</i>
6.5. <i>Influência da granulometria na emissão de poeira</i>	<i>81</i>
7. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE A – MEMORIAL DE CÁLCULO.....	88
APÊNDICE B – PROJETO DO SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO DOS BICOS DE SPRAY	92
APÊNDICE C – PROJETO DA BANDEJA DE EMPILHAMENTO	97
APÊNDICE D – PROJETO DO DIVISOR DE FLUXO DE ÁGUA	98
APÊNDICE E – PROJETO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DA CORREIA	99
ANEXO A – CÂMERA FOTOGRÁFICA CANON EOS REBEL T5.....	103
ANEXO B – MESA HIDRÁULICA PANTOGRÁFICA 500 KG WORKER	104
ANEXO C – BICO DE SPRAY ATOMIZAÇÃO FINA.....	105
ANEXO D – BICO DE SPRAY CONE OCO	106
ANEXO E – TRANSPORTADOR SUPERIOR	107
ANEXO F – TRANSPORTADOR INFERIOR.....	108
ANEXO G – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA EMPILHADEIRA (PROTÓTIPO)	

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações gerais

Os processos como o manuseio, transporte e estocagem de materiais a granel têm se tornado uma das maiores preocupações, em relação a saúde, para a indústria e a comunidade devido a emissão de poeiras oriunda dessas atividades (WANGCHAI; HASTIE; WYPYCH, 2013).

As operações de manuseio de sólidos a granel envolvendo a queda de material são comuns na indústria da mineração. Em tais operações, o descarregar do minério da tremonha ou da correia transportadora, faz com que o material particulado (MP) fino se separa do fluxo principal e se misture com o ar circundante causando a suspensão de poeira no ar (AZHAR; RANI, 2019).

Em função do risco associado à inalação de poeira, a regulamentação da qualidade do ar tem estabelecido padrões cada vez mais rigorosos. Em 2006 e em 2012, a Agência de Proteção Ambiental norte-americana (EPA) alterou os padrões de emissão de material particulado, devido ao crescente efeito adverso para a saúde devido à inalação de poeira (EPA, 2022).

Esses problemas estão relacionados à quantidade de material e os métodos de controle implementados durante o seu manuseio. Os métodos de controle de poeira são definidos de acordo com as condições do ambiente, disposição operacional, características físico-químicas do material particulado e o processo de produção. As técnicas de controle comumente utilizadas em plantas de processamento de minerais são do tipo via seca, que utilizam o princípio de ventilação para capturar a poeira da corrente de ar, afastando da fonte geradora e conduzindo até equipamentos coletores (filtros) para destinação adequada. As técnicas de controle via úmida utilizam água e supressores químicos como forma de umidificar o material e/ou suprimir a poeira nos pontos de emissão (CECALA *et al.*, 2012).

Tais problemas custam bilhões de dólares por ano para as indústrias que trabalham com manuseio de materiais a granel em todo mundo. Como a dispersão de partículas de poeira é um estudo complexo, devido os parâmetros e características do pó, é necessário entender como o pó é gerado, quais são suas consequências, como

ele é medido e quais são os métodos disponíveis para combatê-lo. Se houver controle da emissão de poeira, a operação será mais limpa, segura e produtiva.

Portanto o presente estudo, tem por objetivo o desenvolvimento de equipamentos e técnicas para a realização de experimentos de caracterização da geração de poeira e de controle da emissão de particulados nos processos de empilhamento de minério.

1.2. Justificativa

Nos processos de extração, o efeito sobre as comunidades é menos acentuado, uma vez que esse tipo de empreendimento se localiza, geralmente, longe das cidades vizinhas. Contudo, nas operações em portos de estocagem de minérios, esse efeito é acentuado. Por exemplo, em 2016 o porto de Tubarão localizado em Vitória (ES) teve suas atividades suspensas devido à grande quantidade de poeira emitida pelo porto, causando grandes prejuízos econômicos. Em 2021, a poluição ambiental causada pelas micropartículas de poeira, chamada popularmente de “pó preto”, ao invés de reduzir teve um aumento mesmo com a pandemia do novo coronavírus (Covid-19) na Grande Vitória.

Diversos métodos de supressão de poeira são utilizados pelas indústrias. A utilização de aspersão via sprays de água ainda é um método bastante utilizado, embora o uso dessas técnicas não seja utilizado da forma mais eficiente. Grande parte do problema pode estar relacionado à escassez de normas, que possam avaliar as características que contribuem para a emissão de poeira do minério, e o método mais eficaz de suprimir a poeira gerada em cada caso.

Diante disso, em 2018, a Vale firmou uma parceria com a Universidade Federal do Pará (UFPA), através do projeto “Estudos de Controle de Poeira durante o Manuseio”, com o intuito de estudar os mecanismos de geração de poeira e desenvolver instrumentos e metodologias confiáveis para testes de novas soluções para o controle de poeira oriundos das atividades com minério. Alguns resultados obtidos dessa parceria (LIMA, 2021; FONTANA, 2021; SILVA, 2021; LEÃO, 2021). Portanto, este trabalho é fruto das pesquisas desenvolvidas entre a Vale e UFPA, o qual justifica-se a necessidade de se elaborar técnicas confiáveis para caracterizar a

geração de particulados e formas de supressão de poeira durante o empilhamento de minérios.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver um laboratório de transportador de correia em escala e metodologias de ensaios que serão utilizados para experimentos técnicos e científicos no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FLUIDPAR) no Campus Tucuruí da Universidade Federal do Pará (UFPA), para a realização de experimentos de caracterização e supressão via spray da poeira gerada durante o empilhamento de minério.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver uma bancada de transportadores de correia para estudos relacionados ao mecanismo de emissão de poeira de materiais particulados;
- Desenvolver metodologias para realização de experimentos de caracterização da poeira gerada durante o empilhamento de minério;
- Avaliar a influência da altura de empilhamento de minério associados a geração de poeira;
- Avaliar a influência da distribuição granulométrica do minério na emissão de poeira;
- Avaliar a eficiência da aspensão via spray no controle da poeira emitida durante o empilhamento de minério.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo introduz o assunto do trabalho e apresenta os objetivos da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que, inicialmente realiza uma revisão do impacto da emissão de particulados, das normas regulamentadoras para esse tipo de poluente, das classificações do tamanho do material particulado, dos riscos à saúde humana associado a inalação deste poluente, da avaliação das formas

da geração de poeira durante o empilhamento de minério de ferro, das técnicas de controle da emissão de poeira e os parâmetros associados a supressão da emissão de particulados utilizando spray de água no controle da emissão de materiais particulados.

No capítulo 3 é feita a descrição do desenvolvimento do laboratório de transportadores em escala, a metodologia utilizada nos ensaios de empilhamento, a similaridade de uma empilhadeira real para um modelo em escala e os procedimentos metodológicos utilizados para a caracterização das amostras de materiais, destacando-se os ensaios de granulometria, MEV, massa específica real e massa específica aparente em função da umidade do material.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões resultantes dos ensaios variando a altura de empilhamento de minério, influência da supressão via spray e a influência da poeira gerada em função da granulometria do minério de ferro.

Finalmente, o capítulo 5 é a conclusão do trabalho, são apresentados também algumas propostas futuras, que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho.

2. FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Impacto da emissão de poeira na qualidade do ar

As operações de armazenamento, manuseio e transporte de sólidos a granel envolvendo a queda de material em fluxo livre são comuns na indústria da mineração. Em tais operações, o descarregar do material a granel da tremonha ou da correia transportadora em queda livre, o material particulado (MP) fino se separa do fluxo principal e se mistura com o ar circundante emitindo poeira no ar (AZHAR; RANI, 2019).

Segundo Cooper e Arnold (1995), nos últimos anos, houve uma crescente preocupação com o controle da emissão de poeira em decorrência ao limite de exposição do trabalhador terem se tornado mais rigorosos. A recuperação do produto, anteriormente perdido em poeira fugitiva, também ter se tornado economicamente importante. Além da legislação mais rigorosa, Wypych *et al.* (2005) mencionam outros motivos que levaram ao controle da emissão de poeira:

- Risco de explosões (poeira é considerada um sólido combustível);
- Redução dos níveis de emissão permitidos;
- Perda de material;
- Custo de manutenção e limpeza;
- Danos aos equipamentos de processo;
- Falhas prematuras dos sistemas de controle de poeira;
- Estética;
- Aumento da pressão do governo / comunidade;
- Sociedade ambientalmente mais consciente.

O risco da emissão de particulado, que gera a poluição do ar, está relacionada diretamente ao manuseio de minérios. O particulado de minério é fino e pode deslocar distâncias consideráveis pela ação do vento, podendo gerar graves riscos à saúde, como problemas respiratórios, tanto para os trabalhadores quanto para as comunidades que vivem próximo às instalações industriais. Além disso, ocorre os impactos de menor efeito como baixa visibilidade e precipitação de poeira nas superfícies das casas, veículos e estruturas em geral (PLANNER, 2011).

Segundo a ISO 7708 (1995) existem alguns termos para classificar materiais particulados (MP), tais como:

- Material particulado em suspensão (MPS): conjunto de partículas sólidas e/ou líquidas dispersas no ar que compreende uma faixa de tamanho de partículas de algumas dezenas de nanômetros (nm) até algumas centenas de micrômetros (μm).
- Aerossol: conjunto de partículas sólidas e/ou líquidas suspensas em um meio gasoso. Normalmente, o tamanho das partículas de aerossóis compreende uma faixa de 0.001 à 100 μm .
- Partículas Totais em Suspensão (PTS): estimativa da massa de partículas totais em suspensão, obtidas por um amostrador de grande volume.

Loureiro (2005), afirma que o MP pode ser classificado também por seu diâmetro aerodinâmico, que é definido como o diâmetro de uma esfera de densidade unitária que pode ter velocidade de sedimentação idêntica à da partícula. O material particulado, dentre os vários poluidores atmosféricos, se destaca por apresentar um grande potencial poluidor à saúde devido estar associado à quase todas as atividades de mineração, sendo constituído de poeiras, fumaças e qualquer outro tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso no ar devido seu pequeno tamanho. As partículas com um diâmetro aerodinâmico de 10 μm ou menor (MP_{10}), denominam-se como material particulado suspenso respirável, que permanece na atmosfera por longos períodos, pois possui baixa velocidade de deposição. Já as partículas inaláveis são aquelas com diâmetro menor que 2,5 μm ($\text{MP}_{2,5}$).

Alguns outros pesquisadores definem que um diâmetro entre 2,5 e 10 μm ($\text{MP}_{2,5-10}$) como “grosso”, menor que 2,5 μm como “fino” e menor que 0,1 μm como partículas “ultrafinas”. É importante entender que MP_{10} contém frações ultrafinas ($\text{MP}_{0,1}$), finas ($\text{MP}_{0,1-2,5}$) e grosseiras ($\text{MP}_{2,5-10}$). O primeiro grande esforço regulatório americano com o objetivo de estudar e estabelecer limites para as emissões e poluição do ar foi o *Clean Air Act (CAA)* em 1970, que definiu os *National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)*. Esses padrões estabelecem limites para seis poluentes primários encontrados na atmosfera, são eles: material particulado, monóxido de carbono, chumbo, dióxido de nitrogênio, ozônio e dióxido de enxofre (ANDERSON *et al.*, 2012).

Em 1971 a EPA implementou a padronização dos níveis de particulados no ar atmosférico. Em decorrência de indícios em que a exposição humana ao material particulado em suspensão ocasiona significativos malefícios à saúde (EPA, 2022).

Os primeiros padrões instituídos pela EPA, em 1971, regulamentaram as concentrações de PTS, os quais estabeleceram limitações sobre a quantidade de poeira suspensa na atmosfera. Contudo, estudos mais avançados indicaram que esses padrões não limitavam as emissões de particulados específicos no ar, os quais eram os prováveis causadores de distúrbios pulmonares. Sendo assim, as normas de emissão de poeira atmosférica foram alteradas para incluir uma classe de partículas de tamanho específico, o MP_{10} . Em 1987, resultados de pesquisas mais avançadas levaram a mais alterações nos padrões de emissão, os quais afirmaram que partículas de MP_{10} apresentam maior tendência a serem transmitidas aos pulmões.

Em 1997, pesquisas posteriores concluíram que os maiores riscos à saúde não vêm somente das partículas que são facilmente inaláveis, mas sim daquelas que se fixam no tecido pulmonar, ou mesmo adentram a corrente sanguínea ($MP_{2,5}$), podendo causar danos permanente no tecido pulmonar como irritação/necrose, conforme mostrado na Figura 2.1. Assim foi implementado os padrões para esse tamanho de partículas (COPELAND; KAWATRA, 2011).

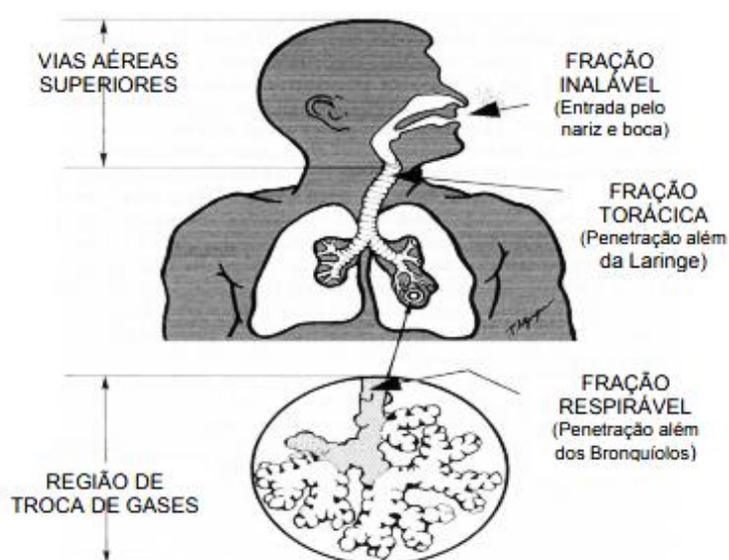


Figura 2.1 – Representação esquemática das principais regiões do trato respiratório e sua correspondência com as frações inalável, torácica e respirável.

Fonte: DOS ANJOS SANTOS, 2001.

Segundo Anderson *et al.* (2012), estudos mostram um aumento na morbimortalidade relacionada à exposição ao MP. Mesmo que os riscos diários decorrentes da exposição à material particulado não sejam tão significativos para um indivíduo, porém quando se aplica a população mundial os custos da carga de saúde são surpreendentes. A Organização Mundial da Saúde (OMS) realizou um estudo com a concentração de MP_{2,5} e estimou que a mesma contribui para aproximadamente 800.000 mortes prematuras anualmente, classificando-a como a 13^a causa de mortalidade mundial.

Em função do risco associado à inalação de poeira, a regulamentação da qualidade do ar tem estabelecido padrões cada vez mais rigorosos. Em 2006 e em 2012, a EPA alterou novamente os padrões de emissão de material particulado, para refletir a compreensão crescente de efeitos adversos para a saúde devido à inalação de poeira (DOS SANTOS JR, 2020).

Segundo o Relatório do Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) (2020), no Brasil, os padrões de qualidade do ar foram definidos pela Resolução CONAMA nº 491/2018 publicada em novembro de 2018. Tal Resolução está estruturada tendo como referência as diretrizes da OMS. Nessa regulamentação foi previsto o conceito de Metas Intermediárias (MI), onde valores temporários serão cumpridos por etapas até o atingimento dos Padrões Finais (PF), que representam as metas de longo prazo. Para cada poluente foram previstas três metas intermediárias (PI-1- PI-2, PI-3), visando à melhoria gradativa da qualidade do ar até o alcance ao PF, estabelecido com base nas diretrizes da OMS para os poluentes de interesse.

Em nível estadual, o Governo do Estado do Espírito Santo estabeleceu os padrões estaduais de qualidade do ar. Com complemento dos parâmetros “fumaça” e “chumbo” o Decreto Estadual (nº 3.463-R, de 16/12/2013) contempla todos os parâmetros estabelecidos pela CONAMA nº 491/2018, sendo inclusive mais restritivo, além de também estabelecer padrões para poeira sedimentável (PS), também chamada de pó preto. Verifica-se que apenas o Estado de Minas Gerais, além do Espírito Santo, por meio da Deliberação Normativa COPAM nº 01 de 26 de maio de 1981, instituiu padrões para PS, sendo 10 g/m²/30 dias para áreas industriais e 5 g/m²/30 dias nas demais áreas. Observar-se na Tabela 2.1 os valores estabelecidos na legislação nacional e estadual.

Tabela 2.1 – Padrões nacionais e estaduais de qualidade do ar.

POLUENTE	Período de Referência	Padrão Nacional (CONAMA n° 491/2018)				Padrão Estadual (Decreto n° 3.463/2013)			
		PI-1 (µg/m³)	PI-2 (µg/m³)	PI-3 (µg/m³)	PF (µg/m³)	MI1-ES (µg/m³)	MI2-ES (µg/m³)	MI3-ES (µg/m³)	PF-ES (µg/m³)
MP_{2,5}	24 horas	60	50	37	25	-	50	37	25
	Anual	20	17	15	10	-	20	15	10
MP₁₀	24 horas	120	100	75	50	120	80	60	50
	Anual	40	35	30	20	45	33	25	20
PTS	24 horas	-	-	-	240	180	170	160	150
	Anual	-	-	-	80	65	63	62	60

Fonte: Adaptado IEMA, 2020.

As legislações e padrões citados anteriormente foram definidas com base nos potenciais danos significativos causados à saúde. Contudo, para o pó preto (poeira sedimentável) estão associadas ao incômodo causado às populações próximas das fontes de emissão. Sob o aspecto visual e o desconforto causado pela sujeira gerada pela deposição do PS sobre as superfícies de uso cotidiano (VALLACK; SHILLITO, 1998; FARFEL *et al.*, 2005). Segundo o relatório da qualidade do ar publicado pelo IEMA, houve um aumento significativo entre 2018 e 2019 do tipo de particulado suspenso mais perigoso à saúde, as chamadas partículas finas, que prejudicam o sistema respiratório e são absorvidas pelo organismo (TEMPO NOVO, 2020).

2.2. Emissão de poeira em processo de empilhamento

As indústrias da mineração buscam sempre por maior produtividade, qualidade e redução de custos em seus processos. As principais questões que levam em consideração nos debates são em relação ao transporte. No entanto, outras etapas devem ser levadas em consideração, como manuseio e principalmente estocagem de minérios (FORTES; PEREIRA, 2013). O minério de ferro passa por uma série de etapas de manuseio e estocagem desde o momento de extração até a saída do porto, conforme mostrado na Figura 2.2.

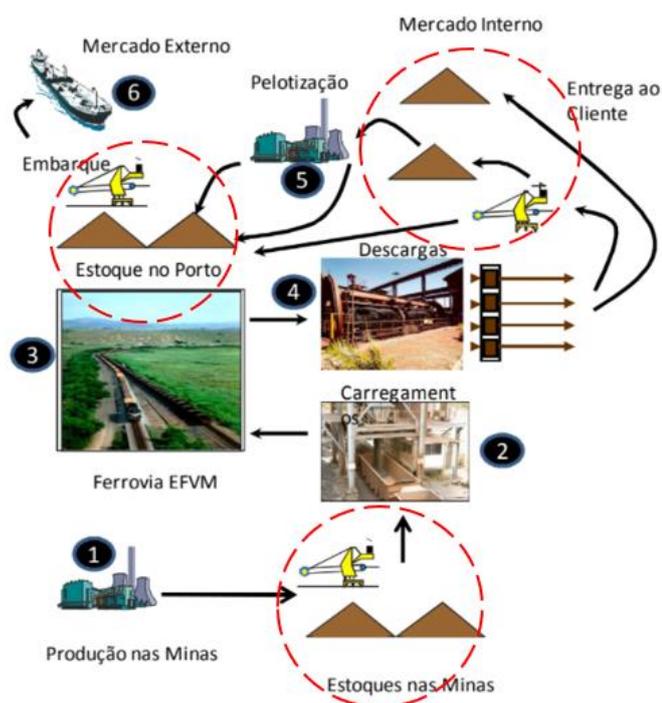


Figura 2.2 – A cadeia de suprimentos do minério de ferro no Sistema Sudeste.
Fonte: Adaptado MEIRELES, 2010.

Segundo Meireles (2010), as minas de extração de minério normalmente são localizadas distantes dos portos para exportação, por isso existe uma logística de processo, conforme mostrado na Figura 2.2, onde o minério após ser realizado a sua extração e beneficiamento é então estocado em pilhas. Em seguida, é carregado em vagões de trem para ser transportado aos portos. Ao chegar nos portos, normalmente, os vagões não descarregam diretamente nos navios, pois o fluxo de trens chegando aos portos é mais acelerado quando comparado ao fluxo das embarcações de exportação, por isso são necessários os trens serem direcionados para o descarregamento nos pátios de estocagem e posteriormente serem transportadas, através de um sistema de transportadores de correia até os píeres para carregamento de navios.

Todo segmento de indústria necessita controlar seus estoques, tanto de matérias-primas, produto em fase de processo, como também produtos acabados. A estocagem de materiais é um processo especializado. Consiste em armazenar adequadamente matéria-prima de tal forma que a sua recuperação seja fácil, e possua manutenção dos níveis de qualidade para que a entrega dos materiais seja de qualidade. Além de que, um armazenamento de minerais bem executado permite

reduzir custos de produção, frete, uma melhor otimização do espaço de estocagem e uma facilidade maior na rastreabilidade do produto (CARLI, 2018).

Segundo Guarany *et al.* (2013), a estocagem em pilhas é o método utilizado na mineração, permitindo a estocagem de grandes quantidades de minério, por longos períodos de tempo e a custo relativamente baixos. Além disso, as pilhas também possuem a finalidade de homogeneizar o material que chegará em uma determinada unidade, para evitar flutuações das características da alimentação visando garantir uma alimentação mais homogênea e controlada.

Contudo, nem sempre o objetivo dos processos de empilhamento é a homogeneização. Alguns métodos de empilhamento são utilizados simplesmente para estocagem. Os métodos de empilhamento variam em função do material que será armazenado, e parâmetros como homogeneização, segregação granulométrica e rápida recuperação, devem ser levados em consideração. (CHAVES, 2011).

Segundo Juliá (2010), o processo de empilhamento de materiais pode ser realizado utilizando diversos equipamentos que se movimentam sobre trilhos ou sobre esteiras. Para o manuseio em pátios de estocagem, utiliza-se empilhadeiras e retomadora que se apoiam sobre trilhos. Entretanto, essas máquinas são mais lentas e pesadas. A seguir na Figura 2.3, mostra-se alguns tipos desses equipamentos.



Figura 2.3 – Equipamento utilizado para empilhamento de minério.
Fonte: OCHERI *et al.*, 2020.

Carli (2018), apresenta alguns problemas ocorrentes na estocagem em pilhas que podem acontecer durante o processo de empilhamento ou após a pilha ser formada, tais problemas podem ser: geração/desprendimento de poeira, segregação

granulométrica, compactação, variação de umidade, e pilhas formadas sem o devido controle de distribuição de teores e de características textuais/estruturais. A Figura 2.4 mostra a emissão de poeira gerada durante a queda de material.



Figura 2.4 – Emissão de poeira no processo de transferência de material em queda livre.

Fonte: XIAOCHUAN *et al.*, 2016.

De acordo com Cooper e Arnold (1995), existem dois principais aspectos físicos pelos quais a poeira se desprende do material a granel e é carregada por correntes de ventos para fora do fluxo de empilhamento: a) a poeira é liberada *durante* a queda livre do material original; b) o impacto do fluxo de material sobre a superfície da pilha em formação, liberando o ar aprisionado causando a emissão de poeira.

Durante essas operações de queda de material, o ar circundante é induzido pela corrente de material à medida que os particulados contidos no granel se desprendem do fluxo principal e se envolvem com o ar ambiente, gerando poeira em suspensão (AZAR; RANI, 2019).

Em decorrência ao movimento turbulento de ar em torno do fluxo de material, pequenas partículas se misturam com o ar induzido, formando uma “camada limite” carregada de poeira em torno do material em queda. À medida que a distância de queda de material aumenta, o fluxo turbulento do ar circundante faz com que o material particulado invada a camada limite do fluxo de material e o raio da camada limite de poeira aumente com o aumento da altura de empilhamento (ANSART, 2009; LEÃO, 2020). conforme mostrado na Figura 2.5.

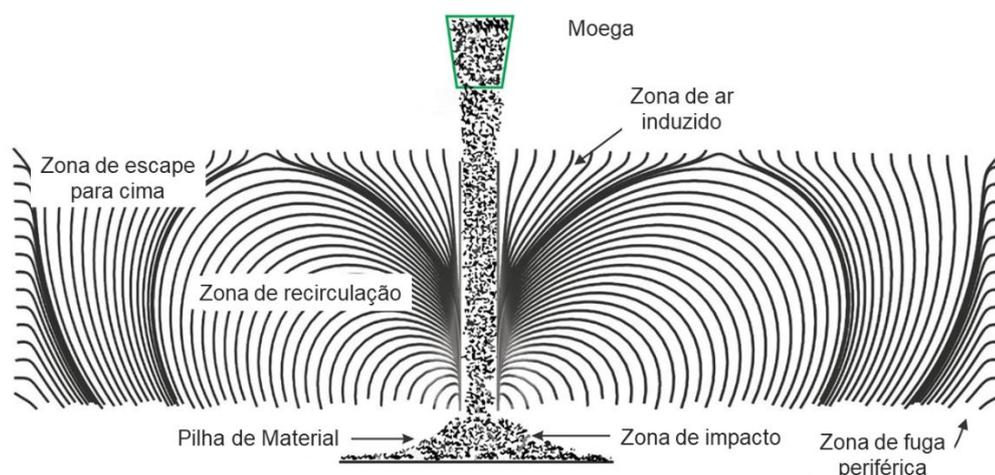


Figura 2.5 – Indução de ar à medida que o material entra em queda.
Fonte: Adaptado de LEÃO et al., 2020.

O estudo desse fenômeno é complexo e importante para o desenvolvimento de qualquer projeto de sistema de controle de poeira. Os parâmetros relevantes para o entendimento desse fenômeno incluem o volume de ar induzido (caso seja possível a extração do ar empoeirado), a concentração de poeira no ar contaminado e os pontos de geração de poeira (principalmente para os sistemas de controle de poeira através da supressão via sprays).

2.3. Abatimento de poeira via spray em empilhamento

Conforme apresentado anteriormente, muitos problemas associados às emissões excessivas de poeira geram complicações para a saúde e meio ambiente, além de perda de material e deterioração do equipamento devido ao ambiente operacional inadequado.

O sistema de aspersão de água via sprays é um dos principais métodos utilizados devido à sua facilidade de operação e eficiência econômica de controlar a emissão e principalmente a dispersão de poeira em processos de mineração (LIU *et al.*, 2019).

A aspersão via sprays pode ser caracterizada por prevenção e supressão de material particulado. A prevenção acontece quando o material manuseado é umidificado, agregando as partículas menores nas partículas maiores, aumentando

seu peso específico e, conseqüentemente, minimizando a geração do material particulado em suspensão. Já a supressão de poeira acontece quando os jatos de spray são direcionados para a nuvem de poeira fazendo com que as gotículas de água englobem completamente as partículas em suspensão e sedimentando em função do aumento do seu peso específico (MOHAL, 1988; SPRAYING SYSTEMS, 2020).

2.3.1. Eficiência dos bicos de aspersão (sprays)

Para um sistema de pulverização eficiente de captura de poeira, deve-se compreender que o bico de aspersão é o coração do sistema. Conseqüentemente, as características físicas do bico são críticas e parâmetros como tamanho de gota, penetração do spray, ângulo de jato de pulverização, velocidade da gota, vazão e pressão de água, dependem tipo de bico selecionado (MOHAL, 1988; SPRAYING SYSTEMS, 2020; ROBERTS; WYPYCH, 2017).

Segundo Roberts e Wypych (2017), o parâmetro mais importante relacionado ao desempenho de um bico spray para sua eficácia em captura de poeira é o tamanho da gota. A razão para isso está relacionada com a Lei de Stokes, que descreve a relação entre as forças de arrasto, que são exercidas sobre um corpo esférico que se move em um líquido (fluido) e outras grandezas (velocidade da partícula e tamanho da partícula). À medida que uma gota e uma partícula de poeira viajam pelo ar, ambas transmitem uma força ao ar, ao qual altera seus movimentos. Tien e Kim (1997) afirmam também que, para que ocorra a captura de poeira algumas etapas devem ser cumpridas, são elas: colisão entre a partícula de poeira e gota de água, adesão das partículas a gotículas, absorção de partículas de poeira pelas gotículas de água e aglomeração de partículas molhadas, conforme mostrado na Figura 2.6.

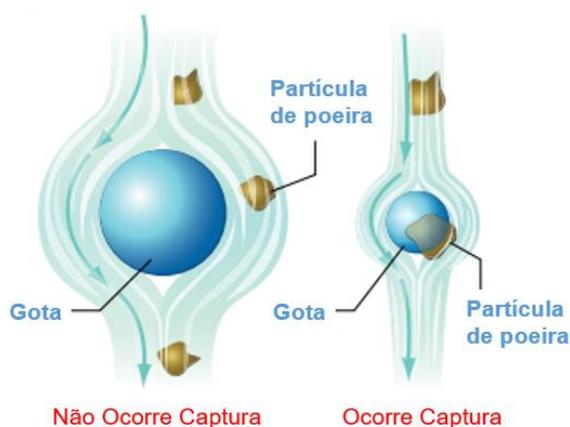


Figura 2.6 – Interação entre tamanho de gota e partícula de poeira.
Fonte: Adaptado SPRAYING SYSTEMS, 2020.

Uma partícula de poeira muito pequena, viajando em direção a uma gota muito maior, irá experimentar uma força transmitida pelo ar em torno da gota. A gota é arrastada pelo ar perturbado e viaja ao redor da gota, em vez de ocorrer o choque entre gota e partícula (KLENK *et al.*, 2012).

Para maximizar o potencial de aglomeração, os tamanhos de partículas e das gotas de água devem ser semelhantes. A probabilidade de colisão também aumenta de acordo que o tamanho das gotículas de pulverização diminui, porque conforme o tamanho das gotas diminui, a quantidade de gotas aumenta (ROBERTS; WYPYCH, 2017; CECALA *et al.*, 2019).

Para que o sistema de pulverização de spray seja mais eficiente, deve-se controlar o tamanho de gotículas de água. Para isso o método de atomização é o mais utilizado. Cecala *et al.* (2019) definem que, a atomização é o processo onde o fluido é forçado através do orifício de um bico que promove a geração de gotículas de água. Os métodos de atomização mais utilizados são de dois tipos:

- Atomização Hidráulica: força o fluido através de um diâmetro de orifício, a uma determinada pressão, e sem a utilização de ar comprimido. O custo operacional é mais baixo. Este método utiliza altas pressões, produz gotas de tamanho pequeno a médio. Os padrões de spray são uniformemente distribuídos em leque, cone cheio ou cone oco. Normalmente, quanto maior a pressão utilizada, menor é o tamanho da gota e maior a vazão de fluido.
- Atomização a Ar: força o fluido através do orifício do bico a pressões mais baixas quando comparado ao método de atomização hidráulica. Utiliza ar comprimido para diminuir ainda mais as pequenas gotículas. A utilização de ar comprimido no sistema faz com que o custo operacional aumente. Por outro lado, esse método produz gotas muito pequenas e distribuição mais uniforme.

A distribuição de pulverização do bico de spray é determinada pela característica do jato do bico, que também influencia no tamanho da gota de pulverização, os jatos normalmente utilizados são do tipo: sólido, cone cheio, cone oco, leque, cone cheio e atomizadores. Para o projeto de um sistema de pulverização via spray, o conhecimento da distribuição é essencial. Com o ângulo de pulverização, que também é característico do bico, determina-se a área de cobertura e a quantidade de bicos utilizados (SPRAYING SYSTEMS, 2020).

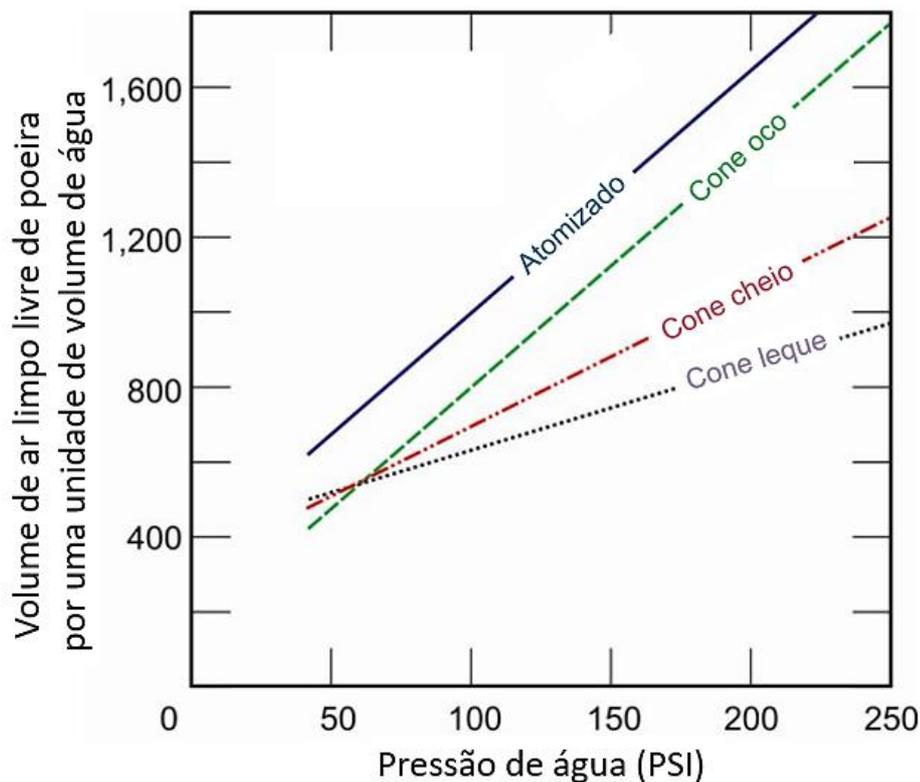


Figura 2.7 – Desempenho da supressão de poeira em função do tipo de bico.
 Fonte: Adaptado NIOSH, 2021.

Segundo NIOSH (2021), os sprays de atomização a ar possuem um desempenho melhor na captura de poeira quando comparado com outros tipos de bicos de sprays de atomização hidráulica, conforme mostrado na Figura 2.7. Em contrapartida, estão mais propensos a entupimento. Sua utilização é mais complexa devido a utilização de linhas de ar comprimido para cada bicos de spray.

Os sprays de cone oco possuem uma melhor eficiência em relação aos sprays de atomização hidráulica. Eles são indicados quando a operação necessita ser de baixo custo e são aplicados em processos que ocorre o umedecimento do minério. Os sprays de cone cheio são recomendados nas fases iniciais do processo, devido à grande quantidade de umidade que ele adiciona no minério e em processos em que a fonte geradora de poeira é mais distante. Os do tipo leque plano são normalmente utilizados em processos de cobertura da camada de minério e em sistemas de prevenção de poeira úmida (CECALA *et al.*, 2019).

Independentemente do tipo de distribuição do spray, à medida que a pressão da água do sistema aumenta, a eficácia da captura de poeira também aumenta, devido a diminuição das gotículas de água e o aumento da sua velocidade.

Consequentemente, com o aumento da pressão a vazão de água aumenta (NIOSH, 2021).

2.4. Análise dimensional e similaridade

Em muitos casos na engenharia, a análise dimensional é indispensável quando as equações do problema são conhecidas. Muitas das vezes, porém não se tem conhecimento das equações, ou são difíceis devido à alta quantidade de variáveis envolvidas. Por isso, o campo da experimentação, que consiste em elaborar modelos de um referido protótipo (real), é o único método de obtenção de informações confiáveis.

Segundo Çengel (2008), na maioria dos experimentos, é mais eficaz utilizar a análise dimensional utilizando modelos em escala geométrica ao invés do protótipo em escala real. Entende-se que assim resultados experimentais podem ser melhor aproveitados e, dessa forma, racionalizar a pesquisa. Isso permite a redução dos custos e otimização do tempo.

Çengel (2008), alerta também sobre o cuidado que deve ser tomado ao dimensionar a escala dos resultados adequadamente. Por isso, muitos engenheiros utilizam a ferramenta técnica chamada análise dimensional, que é útil na resolução de problemas relacionados a projetos e experimentos de estudos em escala. Para iniciar os estudos, existem três principais premissas da análise dimensional que devem ser conhecidas, são elas:

- Gerar parâmetros adimensionais que auxiliam no projeto dos experimentos, tanto físicos ou numéricos, e na apresentação do relatório dos resultados;
- Obter as leis de escala para que o desempenho do projeto real possa ser previsto com o desempenho do projeto do modelo;
- Prever (às vezes) as tendências das relações entre os parâmetros.

2.4.1. Condições de similaridade

Condição de similaridade é o conceito implícito de análise dimensional, sendo, importante ser explicado para a compreensão da técnica da análise dimensional. O conceito de similaridade é, em termo geral, uma indicação de que dois fenômenos têm

um mesmo comportamento e por isso é a principal especificação a ser obedecida na implementação de um modelo físico. Portanto, a similaridade consiste em obedecer a um escalonamento entre as grandezas e relações correspondentes ao desenvolver e implementar uma representação física em correspondência associada ao sistema real que se quer estudar.

Há três condições necessárias para semelhança completa entre um modelo e um protótipo. A primeira condição é a semelhança geométrica, o modelo deve ter a mesma forma que o protótipo, mas pode ser dimensionado por um fator de escala constante.

A segunda condição é a semelhança cinemática, o que significa que a velocidade em qualquer ponto no fluxo do modelo deve ser proporcional (por um fator de escala constante) para a velocidade no ponto correspondente do fluxo de protótipo. Especificamente, por similaridade cinemática a velocidade em pontos correspondentes deve escalar em magnitude e deve apontar na mesma direção relativa. Semelhança geométrica é um pré-requisito para similaridade cinemática.

A terceira, e mais restritiva condição de semelhança, é a de similaridade dinâmica, que é alcançada quando todas as forças no modelo de escoamento escalam por um fator constante para corresponder às forças no fluxo do protótipo. Tal como acontece com semelhança geométrica e cinemática, o fator de escala para as forças pode ser menor que, igual a, ou maior do que um. Similaridade cinemática é uma condição necessária, mas insuficiente para semelhança dinâmica.

Assim, é possível para um fluxo real e um modelo de fluxo do protótipo obtenham simultaneamente similaridade cinemática e geométrica, ainda não semelhança dinâmica. Devem então existir as três condições de similaridade para semelhança completa ser assegurada.

2.4.2. Teorema de vaschy-buckingham

Seja Π (π) a denotação para um parâmetro adimensional. Em um problema de análise dimensional geral, há um π que se chama de dependente π , dando-lhe a notação π_1 . O parâmetro π_1 é em geral uma função de vários outros π'_s , que se denota

de independente π'_s . A relação funcional é $0 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_k)$ onde k é o total de π'_s .

Para se determinar os π da equação e verificar se os modelos estão em escala o método mais utilizado é do teorema π de Vaschy-Buckingham. Ele estabelece que, se em uma equação física envolvendo certo número n de variáveis físicas dimensionais, sendo que estas variáveis são representadas por j dimensões físicas fundamentais independentes, a equação do processo ou sistema físico pode ser reescrita como uma equação de $p = n - j$ variáveis adimensionais (parâmetros π), construídas a partir das variáveis originais. Isso provê um método para calcular conjuntos de parâmetros adimensionais a partir das variáveis dimensionais dadas, mesmo se a forma da equação do sistema ou processo físico ainda é desconhecida.

Encontrar parâmetros adimensionais em um problema pode simplificá-lo e até mesmo resolvê-lo. O método pode ser descrito em seis passos:

1. Listar os parâmetros (variáveis dimensionais, variáveis adimensionais, e constantes dimensionais) e contá-los. Seja n o número total de parâmetros no problema, incluindo a variável dependente. Certifique-se de que qualquer parâmetro independente listado é de fato independente dos outros, ou seja, ele não pode ser expresso em termos deles.
2. Liste as dimensões primárias para cada um dos parâmetros n .
3. Adivinhe a redução j . Como primeira hipótese, definido j igual ao número de dimensões principais representadas no problema. O número esperado de π'_s é igual a n menos j , de acordo com o teorema de Buckingham Pi.
4. Escolha j parâmetros de repetição que serão utilizados para a construção de cada π . Uma vez que os parâmetros de repetição têm o potencial de aparecer em cada π , certifique-se de escolhê-los cuidadosamente.
5. Gerar um π de cada vez pelo agrupamento do j repetindo parâmetros com um dos parâmetros restantes, obrigando o produto a ser adimensional. Por convenção, o primeiro π , designado como um, é o π dependente. Manipular π'_s como necessário para atingir os grupos adimensionais estabelecidos.
6. Verifique se todos os π'_s são de fato sem dimensão. Escrever a relação funcional na forma de equação.

Dessa forma, definem-se os π para as propriedades independentes utilizadas, e encontram-se os valores do modelo em escala utilizando o fator de escala. Observando a forma que cada parâmetro é alterado com a escala.

2.4.3. Similaridade para correias de transferência

Faz-se a aplicação do teorema π de Buckingham para analisar um escoamento de partículas em uma correia de transferência para empilhamento de minério. Sabe-se que as forças do escoamento dependem das seguintes grandezas e que possuem as dimensões primárias (M=massa, L=comprimento e T=tempo) a seguir:

- Taxa de fluxo de massa (\dot{m}) – $[M^1L^0T^{-1}]$
- Massa específica aparente (ρ_a) – $[M^1L^{-3}T^0]$
- Aceleração da gravidade (g) – $[M^0L^1T^{-2}]$
- Diâmetro da partícula (D) – $[M^0L^1T^0]$
- Comprimento característico da correia (l) – $[M^0L^1T^0]$
- Velocidade da correia (v) – $[M^0L^1T^{-1}]$
- Ângulo de repouso (α) – $[M^0L^0T^0]$
- Fator de forma da partícula (S_f) – $[M^0L^0T^0]$

Assim, tem-se:

$$F = f(\rho_a, g, D, l, v, S_f, \dot{m}, \alpha) \quad n = 8. \quad (2.1)$$

Observando-se as dimensões das variáveis, define-se o sistema de grandezas fundamentais. Assim, $j = 3$, que é o número de dimensões principais que descrevem o sistema. Reescreve-se a Equação (2.1) para encontrarmos a relação funcional entre as variáveis do sistema:

$$\mathbf{0} = f(\rho_a, g, D, l, v, S_f, \dot{m}, \alpha). \quad (2.2)$$

Escolhe-se a massa específica aparente (ρ_a), comprimento característico (l) e a velocidade da correia (v) como grupo de parâmetros de repetição. Essa escolha deve-se a cada um desses parâmetros terem o potencial de descrever as dimensões

principais do sistema. Como o fator de forma (S_f) e o ângulo de repouso (α) já são grandezas adimensionais, esses já são um número π por si mesmos. Chama-se π_1 e π_2 , S_f e α , respectivamente. Logo, se definem três grupos π para análise.

Pela aplicação da teoria de Buckingham Pi, faz-se a análise dimensional do conjunto de variáveis anteriores, chegando aos grupos adimensionais a seguir:

$$\pi_1 = S_f, \quad (2.3)$$

$$\pi_2 = \alpha, \quad (2.4)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{l}, \quad (2.5)$$

$$\pi_4 = \frac{lg}{v^2} = \left(\frac{lg}{v^2}\right)^{(-\frac{1}{2})} = \frac{v}{\sqrt{lg}}, \text{ Número de Froude.} \quad (2.6)$$

O número de Froude, expressa a relação entre as forças inerciais e gravitacionais. Observa-se que contém apenas dimensões de comprimento e tempo, e sendo assim, um parâmetro cinemático pois representa uma relação entre essas dimensões (comprimento e tempo).

$$\pi_5 = \frac{\dot{m}}{\rho_a v l^2}. \quad (2.7)$$

Sabe-se a relação da vazão volumétrica que é dada por:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho_a}. \quad (2.8)$$

Assim, com a Equação (2.7), pode-se introduzir a seguinte constante adimensional, chamada Número de capacidade:

$$C = \frac{Q}{v l^2}. \quad (2.9)$$

O Número da capacidade expressa o fato que a capacidade volumétrica da correia varia com a velocidade e a área da seção transversal. Nota-se que nenhum dos grupos π contém um termo de massa específica. Logo, o fluxo é independente da massa específica. Isso tem sentido físico, pois a adimensionalização das variáveis do

sistema reflete a descrição qualitativa do sistema ser a mesma para qualquer material. Ou seja, espera-se por exemplo que, o fluxo possa ser mais rápido ou lento dependendo do material, mas seu comportamento qualitativo será o mesmo. Essa é uma das grandes vantagens da adimensionalização do sistema, o potencial de generalizar os resultados.

Para escoamento de material à similaridade recai no emprego do número de Froude, e considerando que para o empilhamento de um material granular a uma altura de queda (l), tem-se que:

$$v = \sqrt{2gl}. \quad (2.10)$$

Substituindo esta expressão na Equação (2.6), tem-se

$$\frac{l_P}{l_M} = \lambda. \quad (2.11)$$

Os índices P e M são relacionados ao protótipo e modelo, respectivamente. Em específico, protótipo (P) diz respeito ao cenário real, como as estruturas encontradas nas indústrias. Por sua vez, modelo (M) refere-se ao sistema que será estudado em escala menor, em laboratório. Então, a Equação (2.11) descreve a relação de escala e proporcionalidade entre o aparato real da indústria e o laboratório.

Assim, em escoamento granulares, temos que o diâmetro da partícula e a largura da correia são escaladas geometricamente, na mesma razão que a escala dimensional.

Com as análises acima, pode-se usar as duas equações adimensionais, o Número de Froude Equação (2.6) e o Número Capacidade Equação (2.9), fazendo a devida igualdade do protótipo para o modelo em escala. Assim, pode-se encontrar informações para similaridade do escoamento real com relação ao modelo em escala. Por exemplo, apenas com manipulação matemática pode-se determinar a velocidade do modelo (v_M), que é a velocidade do aparato experimental no laboratório. Supondo que tanto no modelo quanto no protótipo o material está em queda livre, usa-se a Equação (2.10) para encontrar:

$$v_M = v_P \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} = v_P \sqrt{\frac{1}{\lambda}}. \quad (2.12)$$

Fazendo o mesmo com a Equação (2.9) do Número Capacidade e substituindo na equação anterior, determina-se a vazão volumétrica do modelo (Q_M) Equação (2.14).

$$C = \left(\frac{Q}{vl^2} \right)_M = \left(\frac{Q}{vl^2} \right)_P, \quad (2.13)$$

$$Q_M = Q_P \cdot \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{5/2} = \frac{Q_P}{\lambda^{5/2}}. \quad (2.14)$$

De conhecimento desses fatores adimensionais, pode-se fazer a verificação com a comparação dos fatores da correia em tamanho real (protótipo) com a correia em escala (modelo).

3. LABORATÓRIO DE ESTUDO EM TRANSPORTADORES

A bancada existente do transportador de correia foi utilizada em alguns estudos anteriores para análise de chutes de transferência de transportadores de correia, visando análise do escoamento de materiais granulados como fonte de informações para projetos industriais, conforme mostrado na Figura 3.1. Esse estudo também foi utilizado como base para o desenvolvimento do laboratório.



Figura 3.1 – Bancada de transportadores para ensaios em chutes de transferência.
Fonte: Adaptado de PIQUET (2015).

3.1. Descrição do Laboratório

Para o desenvolvimento do laboratório de transportadores de correia, para avaliação da emissão de particulados durante o empilhamento de minério, utilizou-se uma bancada do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar), conforme mostrado na Figura 3.2.

O laboratório de transportadores consiste de dois transportadores de correia em escala, que permite variar a sua velocidade de transporte ($V_{M\acute{a}x} = 4,0$ m/s) com o auxílio de dois inversores de frequência, um para cada correia, instalados em um painel elétrico. A alimentação de minério no transportador é realizada por uma moega em forma de cunha com volume de $0,21$ m³. Para a variação da altura de empilhamento foi desenvolvido uma mesa de empilhamento que permite elevar ou

diminuir a altura de queda do material. O sistema de spray desenvolvido atua em dois pontos de aspersão, primeiro ponto sobre a correia para a umidificação do minério e contenção da poeira, e o segundo localizado na saída do material da correia utilizado para a supressão da poeira fugitiva. Para a medição da concentração de material particulado foi utilizado dois contadores de partículas localizados em pontos estratégicos que variam de acordo com a altura de empilhamento, conforme mostrado na Figura 3.2 a seguir.

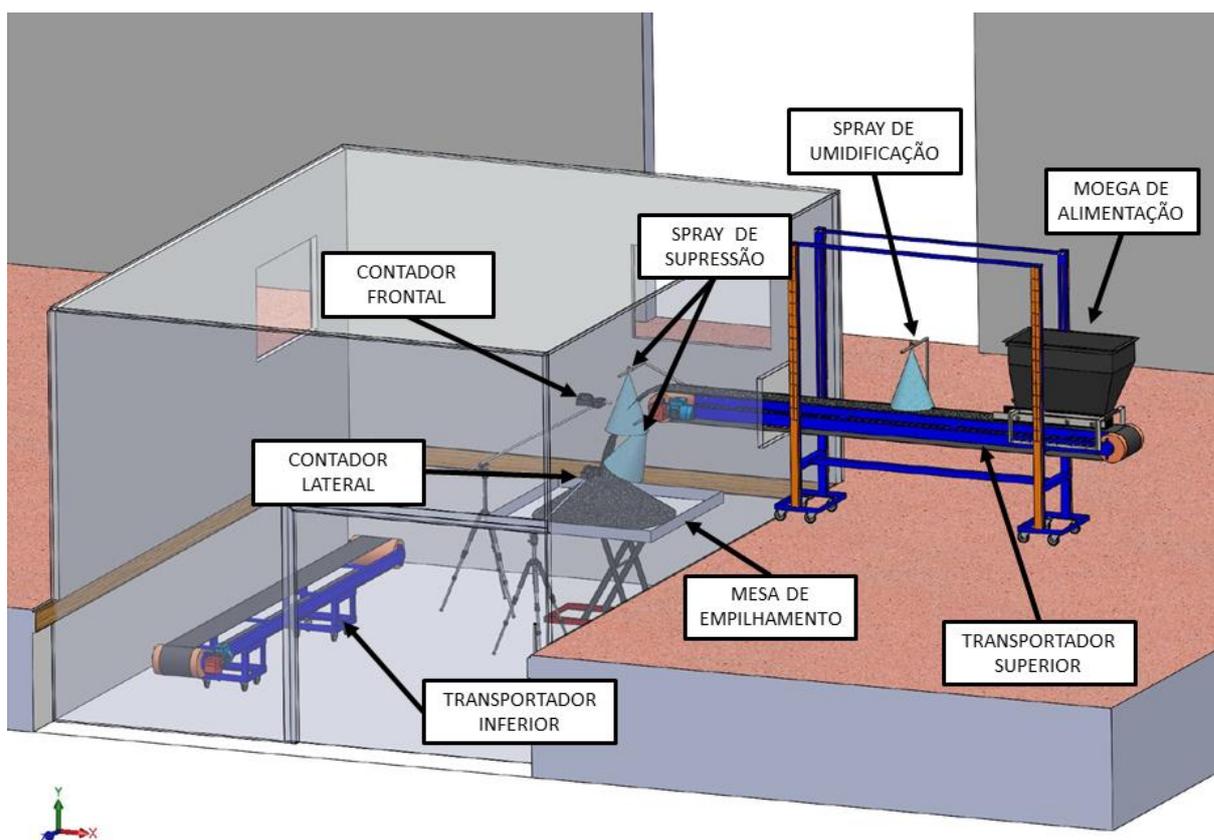


Figura 3.2 – Laboratório de transportadores de correia.

3.1.1. Sistema de transportadores de correia

Os transportadores de correia (superior e inferior), foram utilizados para experimentos em chutes de transferência, na oportunidade utilizou-se serragem como material a ser transportado (PIQUET, 2015). Os transportadores possuem 4000 mm de comprimento (eixo a eixo do tambor), correia PVC 279 x 4450 x 1,30 mm, inclinação dos roletes de 20° (transportador superior), inclinação dos roletes de 45° (transportador inferior) e moto-redutor 15:1 com motor de 1 cv.

O transportador de correia inferior não precisou sofrer alterações, ele será utilizado para futuros estudos relacionados a análise de chutes de transferência e transporte de materiais granulares.

Para o desenvolvimento do laboratório algumas modificações foram realizadas no transportador de correia de altura variável (superior). Alterou-se o sistema de acionamento, anteriormente era utilizado um motoredutor (redução 15:1) trifásico de 1 cv. Realizou-se a troca do motor antigo para um motor trifásico de 4 cv mantendo a mesma redução, porém aumentando a velocidade de transporte e, conseqüentemente, o torque do transportador. A partir da modificação do motor, foi possível realizar o transporte de materiais mais densos. Para saber a velocidade de transporte de material utilizou-se um tacômetro para medir a rotação no tambor de saída do transportador variando a frequência no inversor. Com os resultados obtidos, foi possível calcular a velocidade e relacionar com a frequência mostrada no inversor.

Também, desenvolveu-se um painel elétrico com dois inversores de frequência, um para cada transportador de correia. Isso permite variar a velocidade de transporte de material, para cada transportador de correia.

Os transportadores que anteriormente só conseguiam transportar materiais “leves”, no caso pó de serragem, após as modificações, a bancada permite manusear materiais mais densos, como carvão, minério de ferro e pelotas. Com as modificações, os transportadores podem ser utilizados em conjunto para análise de chutes de transferência, como era utilizado anteriormente, e/ou separados para estudos de empilhamento de minério. Além da modificação do motor, também se fez necessário projetar um sistema de alimentação para o transportador e um sistema de aspersão via spray que atuasse na prevenção e supressão de poeira, conforme mostrado na Figura 3.3 a seguir.

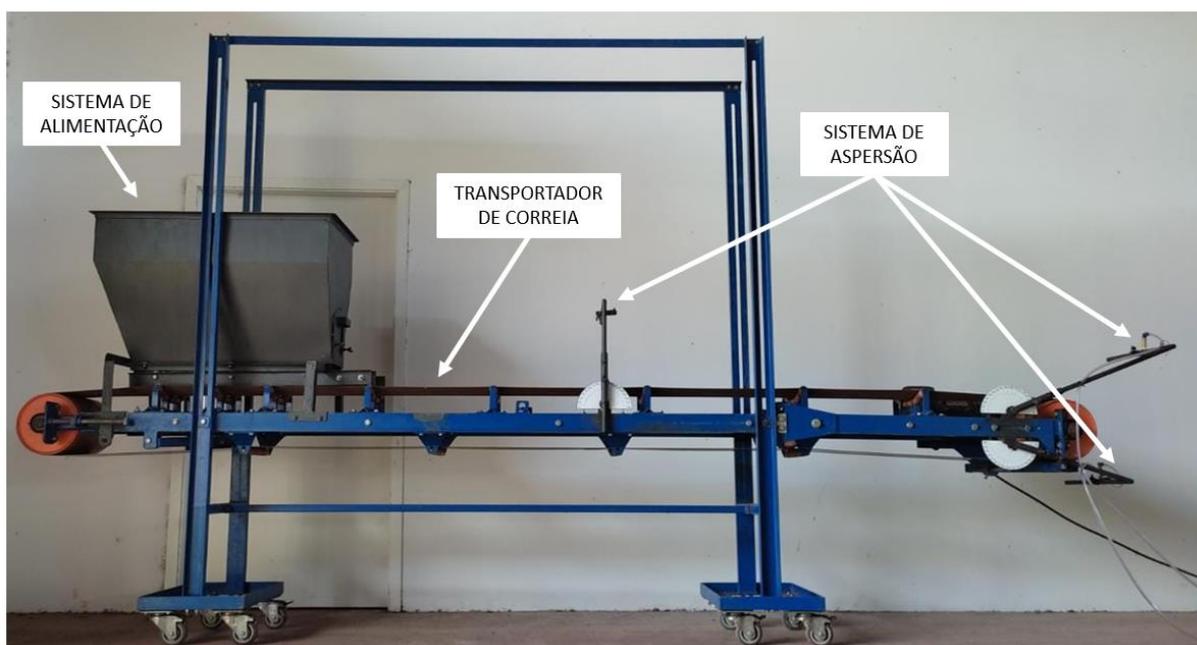


Figura 3.3 – Transportador de correia modificado.

3.1.2. Sistema de alimentação da correia

A bancada de transportadores de correia existente, não possuía um sistema eficiente que permitisse um fluxo uniforme de material. Para isso, foi necessário desenvolver uma moega de alimentação que permitisse uma descarga uniforme e o controle da vazão de material, levando em consideração a área disponível para a construção da moega.

Portanto, foi desenvolvido uma moega em forma de cunha. Como a função da bancada é realizar estudos com variados tipos de materiais a granel, utilizou-se um ângulo de inclinação $72,5^\circ$. Essa escolha deve-se a alguns autores recomendarem utilizar entre 70° e 75° para que se possa obter um livre escoamento de material (. A moega de alimentação desenvolvida possui o volume de $0,21 \text{ m}^3$, possui guias laterais e uma comporta regulável que permite aumentar ou diminuir a vazão de material, conforme mostrado na Figura 3.4.

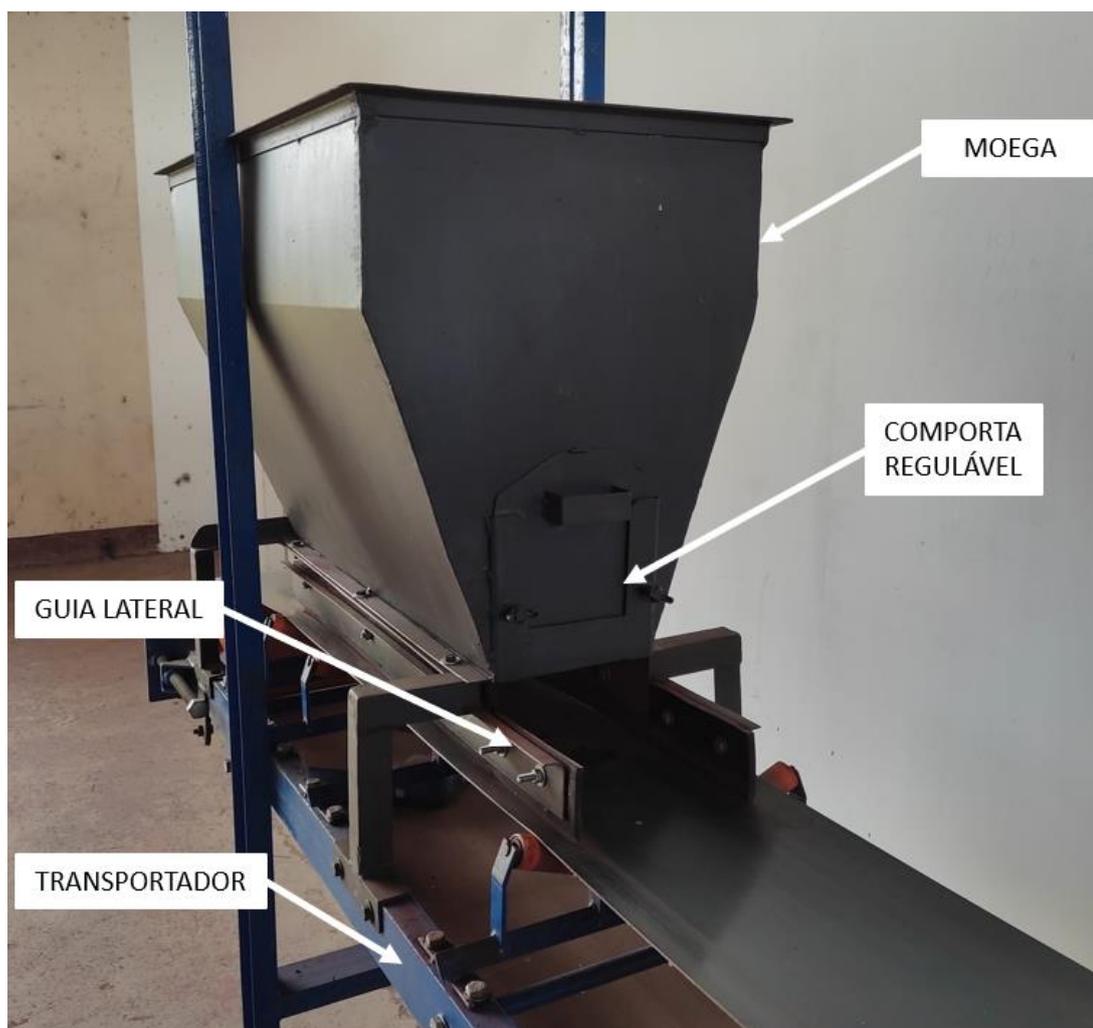


Figura 3.4 – Moega de alimentação com comporta regulável.

3.1.3. Sistema de variação da altura de empilhamento

Para a realização deste estudo foi necessário desenvolver uma forma de variar a altura de empilhamento. Para isso, desenvolveu-se uma mesa de empilhamento, composta por uma mesa hidráulica pantográfica com capacidade de 500 kg, altura mínima de 300 mm, máxima de 1600 mm e uma bandeja quadrada de 1500x1500x200 mm, conforme mostrado na Figura 3.5.

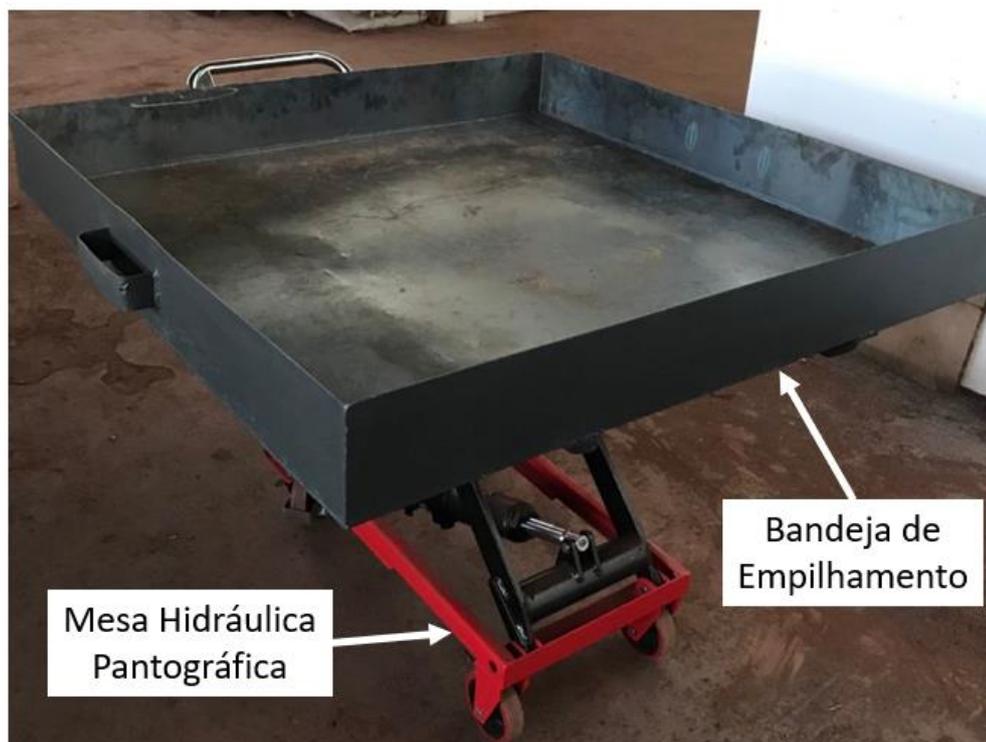


Figura 3.5 – Mesa de empilhamento de minério.

3.1.4. Sistema de aspersão via sprays

Para a realização do estudo de aspersão via spray, desenvolveu-se um mecanismo que permite estudar a influência da inclinação de ataque do jato no material, e as formas de prevenção e supressão de poeira, conforme mostrado na Figura 3.6.

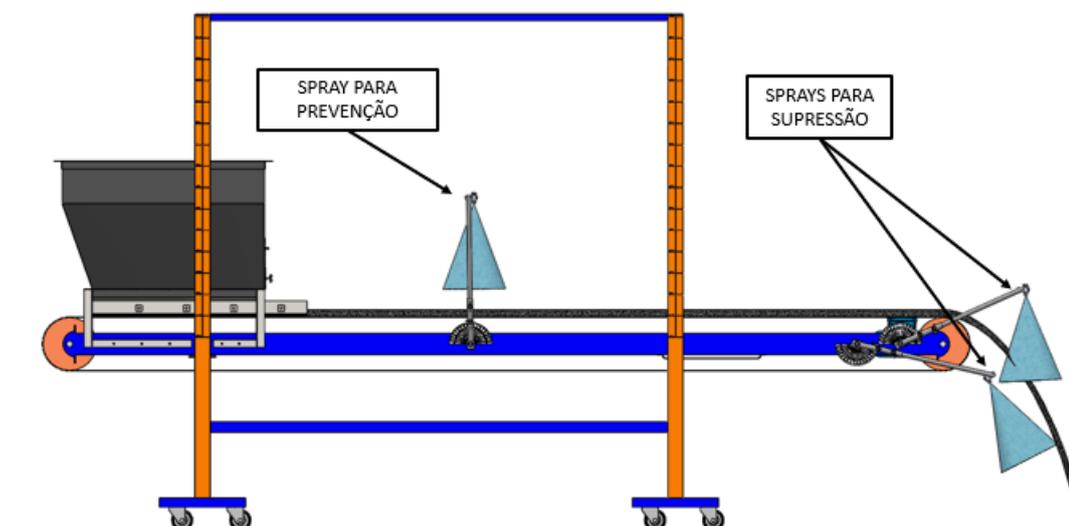


Figura 3.6 – Sistema de aspersão via spray.

O mecanismo desenvolvido permite variar o ângulo de ataque do spray, como também permite variar a distância do jato sobre o material ou sobre o ponto de geração de poeira, conforme mostrado na Figura 3.7.

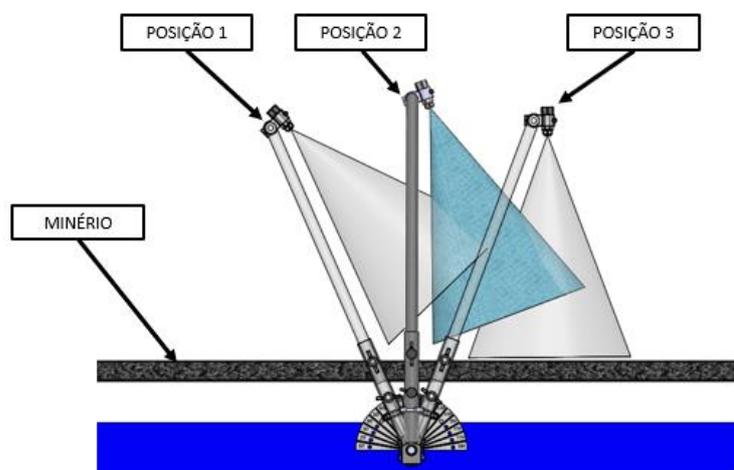


Figura 3.7 – Esquema de posições do spray para contenção da poeira.

Foi desenvolvido também um sistema para alimentar os bicos de sprays de tal forma que possa variar a pressão de água e utilizar no máximo seis bicos de aspersão ao mesmo tempo. Para isso o sistema é composto por: módulo de spray, reservatório de água de 50 litros, compressor de ar comprimido, divisor de fluxo e bicos de sprays, conforme mostrado na Figura 3.8.

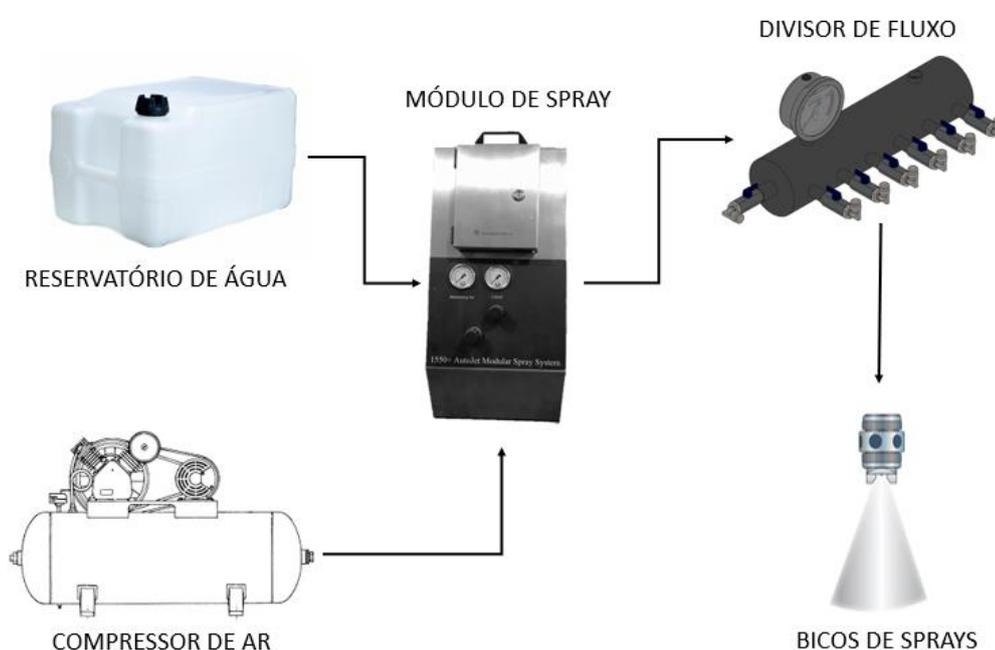


Figura 3.8 – Fluxograma do sistema de abastecimento dos sprays.

O módulo de spray modelo 1550+ da Spraying Systems Co, é basicamente uma unidade autônoma que pode fornecer o bombeamento (contínuo ou intermitente) de fluídos e o controle de pulverização de forma fácil e acessível. O módulo é constituído de uma bomba pneumática duplo-diafragma, com pressão de trabalho mínima de 1,4 bar e máxima de 7 bar, sucção máxima de 3 m, consumo de ar de 250 l/min e volume por pulso de 74 cm³.

Foi projetado também um divisor de fluxo, para que a pressão de água na entrada possa ser a mesma pressão de saída em todos os bicos de sprays. Isso permite que não ocorra a diminuição da eficiência de supressão de cada spray utilizado. O divisor é constituído de sete válvulas esferas, sete conexões de engate rápido e um manômetro. O sistema todo é ligado por mangueiras de poliuretano de diâmetro externo de 10 mm, diâmetro interno de 8 mm e que suportam uma pressão máxima de 10 bar. A Figura 3.9, a seguir, mostra como ficou o sistema de abastecimento de sprays na bancada.



Figura 3.9 – Sistema de abastecimento de spray.

3.1.5. Sistema de medição de particulados

Para a medição da emissão de particulados, foram utilizados dois contadores de partículas portáteis da série *Particles Plus 8506*, conforme mostrado na Figura 3.10. Estes contadores fornecem uma faixa dinâmica de medição de tamanho de

particulados de 0,5 μm à 20 μm (6 canais), sendo o tempo de amostragem podendo ser ajustado entre 1 segundo e 4500 segundos. O contador possui o modo de concentração de massa, que permite monitorar a massa de partículas de um ambiente para fins regulatórios de segurança e saúde industrial. A unidade de concentração de captura de partículas utilizada é $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figura 3.10 – Contador de partículas Particles Plus 8506.

4. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1. Caracterização dos Materiais

A avaliação das características físico-química do material é fundamental que seja realizada neste estudo, para que se possa entender os parâmetros que influenciam a geração de material particulado durante o manuseio de cada material. Neste trabalho as metodologias de ensaios de caracterização serão: granulometria (peneiramento), massa específica real (picnometria), massa específica aparente (em função da umidade) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

A caracterização dos materiais é fundamental para que ocorra a validação da metodologia de ensaio e o comissionamento do laboratório de estudo, sendo assim foram utilizados quatro tipos de minérios de ferro, sendo dois *Pellet Feeds* e dois *Sínter Feed*, fornecidos de dois locais diferentes (locais A e B). As amostras de minério de ferro foram transportadas em tambores de 200 litros, mantendo-os totalmente herméticos sem que ocorra contato com o ambiente externo durante seu transporte e mantendo a mesma umidade na qual foram coletadas em campo. Na Tabela 4.1 estão as informações dos materiais recebidos.

Tabela 4.1 – Informações iniciais dos materiais recebidos para estudos.

MATERIAL	QUANTIDADE (kg)	UMIDADE MÉDIA
<i>Pellet Feed - A</i>	412,69	7,5 %
<i>Pellet Feed - B</i>	407,24	7,0 %
<i>Sínter Feed - A</i>	405,84	5,3 %
<i>Sínter Feed - B</i>	415,82	6,9 %

Para iniciar a caracterização dos materiais, e posteriormente realizar os ensaios, os materiais recebidos são quarteados e levados a estufas (por no mínimo 24h) para serem secos a temperaturas de 105 °C aproximadamente. Na Figura 4.1 são mostrados os materiais secos. Percebe-se inicialmente a diferença granulométrica entre o *Pellet feed* (mina A e B) e o *Sínter feed* (mina A e B), diferenças que serão bem mais evidentes após o resultado da caracterização.

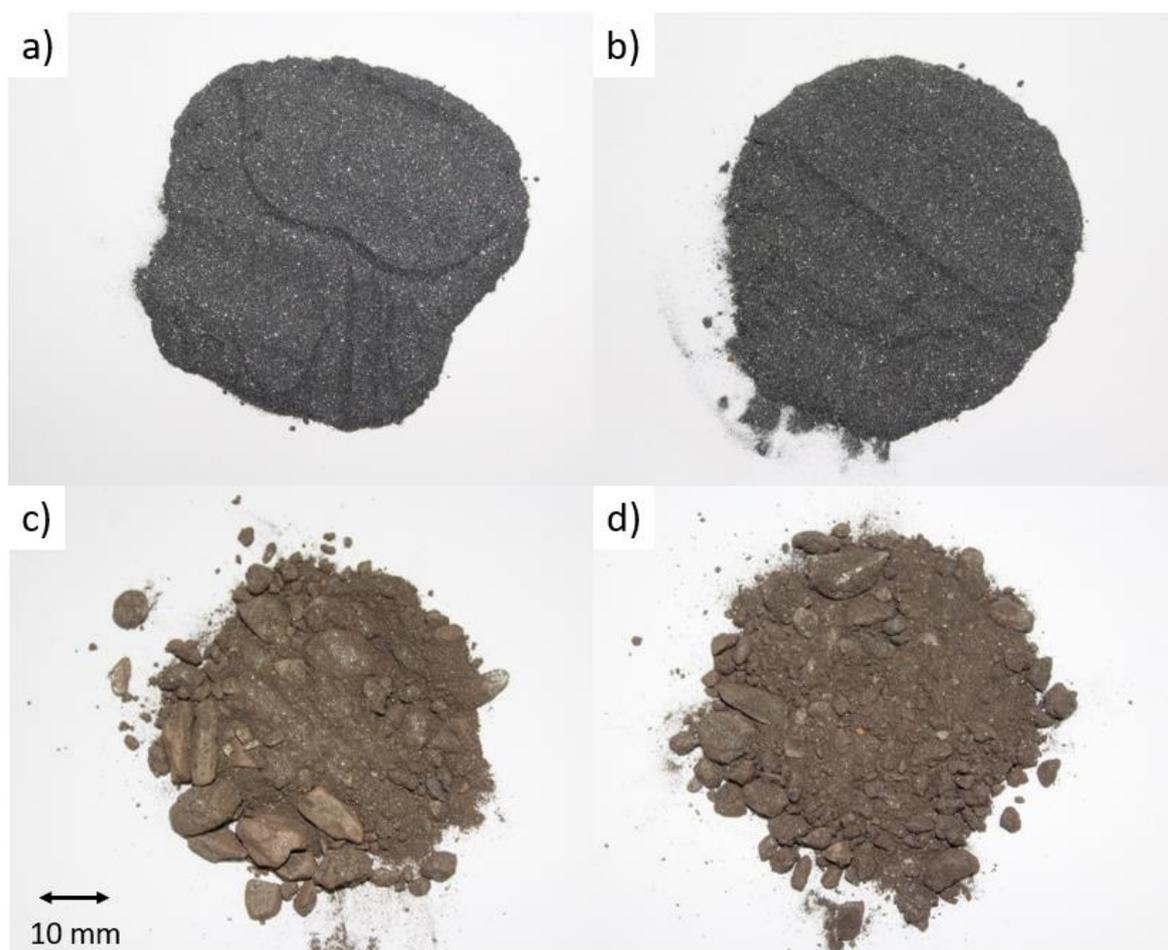


Figura 4.1 – Materiais a serem ensaiados: a) *Pellet Feed-A*, b) *Pellet Feed-B*, c) *Sínter Feed-A*, d) *Sínter Feed-B*.

4.1.1. Granulometria

4.1.1.1. Peneiramento

A determinação da distribuição granulométrica das amostras é realizada através de peneiramento do material seco, conforme procedimentos descritos na norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio inicia-se pela avaliação visual das maiores partículas contidas nas amostras, no intuito de se estabelecer a massa mínima de amostra necessária para realização do ensaio.

Após a escolha da massa mínima da amostra (*Pellet feed* = 1kg e *Sínter feed* = 2kg), o material é separado em bandejas e levado ao forno para secagem a temperatura de 105 °C, por no mínimo 24 h. Com o material seco e à temperatura ambiente, inicia-se o peneiramento. O peneiramento é feito por meio de uma peneira vibratória (Figura 4.2), com uma amplitude de vibração de 1 mm. O ensaio dura cerca de 15 min. Os produtos retidos nas peneiras são pesados utilizando uma balança

BK5000 com capacidade máxima de 5000 g e resolução de 0,01 g. Determinando-se então sua porcentagem em relação à massa inicial. Considerando que nenhuma das amostras avaliadas nesse trabalho possuem granulometria maior que 50 mm, e que o intuito do trabalho é caracterizar a faixa de granulometria associada à emissão de particulado, a qual encontra-se abaixo do menor valor da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, definiu-se que a maior dimensão da peneira seria 50 mm. As peneiras de menor dimensão consistiam de furos abaixo de 4,75 mm.



Figura 4.2 – Peneira vibratória utilizada.

Após a avaliação da quantidade de material que será utilizado para cada material, conforme a maior partícula observada na amostra, iniciou-se os ensaios. Para uma melhor eficiência na caracterização dos resultados, os ensaios foram feitos em triplicata para todos os quatros materiais utilizados nos estudos. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 4.3, a seguir.

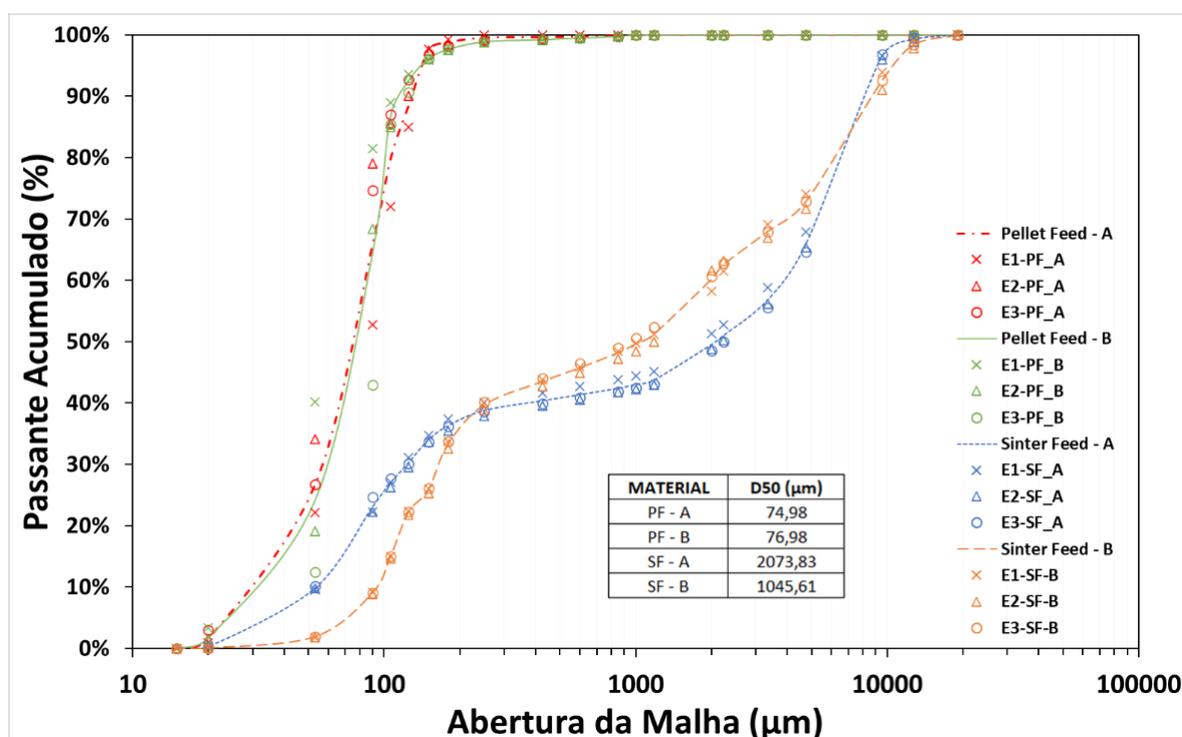


Figura 4.3 – Granulometria dos materiais utilizados nos ensaios.

O parâmetro chamado de passante acumulado significa o quanto do material passou por aquela abertura de malha. Para a medição de D50, significa que 50% do material passou por aquela abertura de malha da peneira. Onde, o D50 é o tamanho de partícula correspondente quando a porcentagem acumulada chega a 50% ou ainda é também chamado de diâmetro mediano de partícula ou tamanho médio de partícula. Comparando os resultados obtidos para os dois pellets feed, observa-se que a distribuição de tamanho de partículas passante acumulado deles são similares, e que o diâmetro médio equivalente (D50) do *Pellet feed-A* e *Pellet feed-B* são bem próximos, ou seja, 50% da distribuição de partículas para ambos os materiais são quase iguais. O fato dos dois *Pellet Feeds* possuírem granulometrias parecidas permite que possam ser considerados materiais similares, apesar de serem extraído de minas diferentes.

Os resultados dos *Sínter feed* na mina A e B também são apresentados na Figura 4.3, e mostram a diferença da distribuição granulométrica em relação ao *Pellet feed*. Enquanto, o D50 do *Pellet feed* ficam em torno de 75 μm (PF – A: 74,98 μm; PF – B: 76,98 μm) o D50 dos *Sínters feed* é acima de 1000 μm (SF – A: 2073,83 μm; SF – B: 1045,61 μm), ou seja, o *Pellet feed* possui um tamanho de partícula menor que o material *Sínter feed*. Vale ressaltar que, apesar do *Sínter feed-A* (D50=2073,83 μm)

possuir um D50 um pouco maior que do *Sínter feed-B* (D50=1045,61 μm), percebe-se pela curva da distribuição granulométrica que mesmo assim podem ser considerados materiais similares.

As curvas dos materiais apresentados na Figura 4.3, mostra que o *Pellet feed* por possuir um tamanho de partícula menor, espera-se que, possua uma maior emissão de particulados do que o material *Sínter feed* (maior granulometria). Este será um dos questionamentos a ser respondido ao final do estudo.

Devido a limitação de tamanho de peneira disponível no laboratório, o menor diâmetro de partícula avaliado no peneiramento dos materiais é de 20 μm . No entanto, como os ensaios de empilhamento avaliaram a geração de partículas menores que 10 μm , será necessário obter resultados da distribuição de tamanho das partículas ultrafinas pela análise de difração a laser, que serão utilizados para garantir maior confiabilidade nas análises.

4.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica importante para o estudo de materiais particulados. Essa ferramenta permite realizar a contagem de partículas, medição de tamanho de partículas de aproximadamente até 0,001 μm e a observação com clareza, profundidade de foco e alta magnificação. A profundidade de foco do MEV é cerca 300 vezes a do microscópio ótico. Assim, o MEV é capaz de fornecer informações sobre a textura da superfície e geometria da partícula.

De modo geral, a preparação de amostras para análise por microscopia eletrônica de varredura não é complexa. Deve-se primeiramente selecionar um suporte de tamanho adequado e montá-lo diretamente nas porta-amostras do equipamento MEV. Dependendo do tipo de amostra, se o material for não condutível, o material deve ser recoberto com uma fina camada de material não condutor, normalmente carbono ou metal adequado. Esse procedimento evita o acúmulo de carga negativa geradas pelo feixe de elétrons. As partículas metálicas, são utilizadas secas e quando preparadas de maneira que fiquem expostas à umidade atmosféricas, são oxidadas rapidamente.

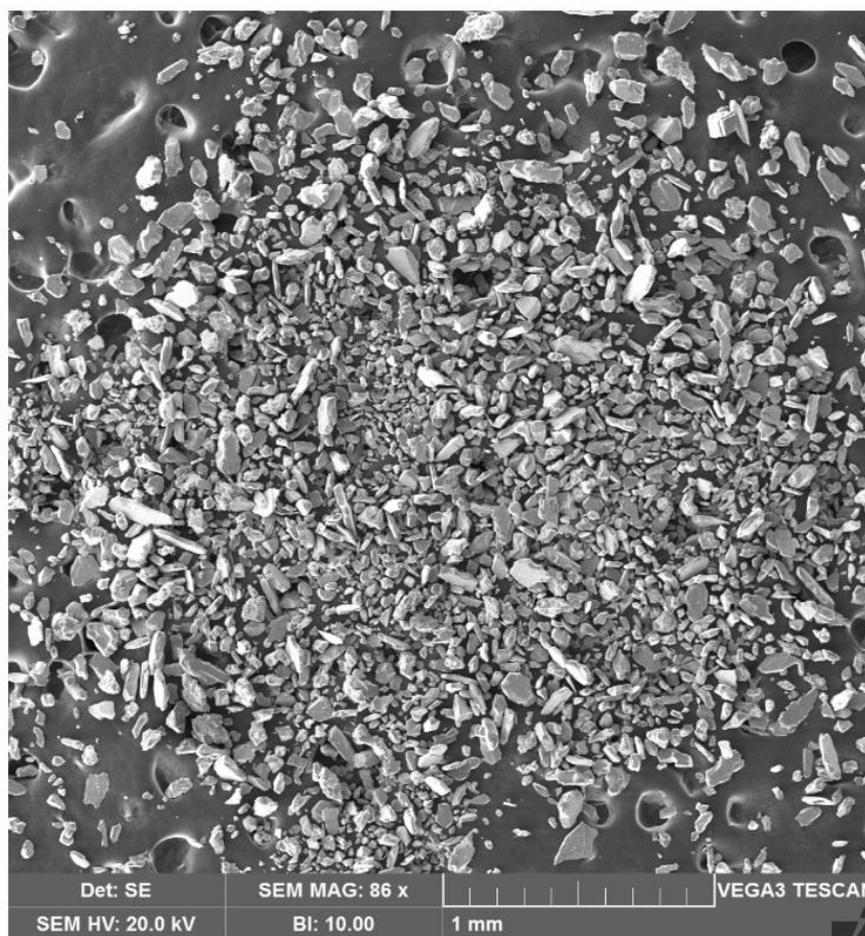


Figura 4.4 – Fotomicrografia obtida ao MEV com aumento de 86X do *Pellet Feed-A*.

A Figura 4.4 apresenta uma amostra de partículas de *Pellet feed-A*, coletada do material que será ensaiado e passante da peneira de 100 μm . A amostra inicialmente seca é colocada em uma fita dupla face de carbono e fixada em um substrato de tamanho adequado ao suporte de amostras do equipamento do MEV. Em seguida, a amostra é banhada (metalizada) por uma liga de ouro que permitirá uma melhor visualização pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Foram feitas as análises de MEV para todos os materiais seguindo a mesma metodologia apresentada anteriormente. A Figura 4.5, mostra as fotomicrografias da amostra de *Pellet feed-A* (PF-A), percebe-se que as partículas possuem formas e tamanhos irregulares, e que partículas menores que 5 μm ficam agregadas em partículas maiores, mesmo que as amostras sejam secas previamente.

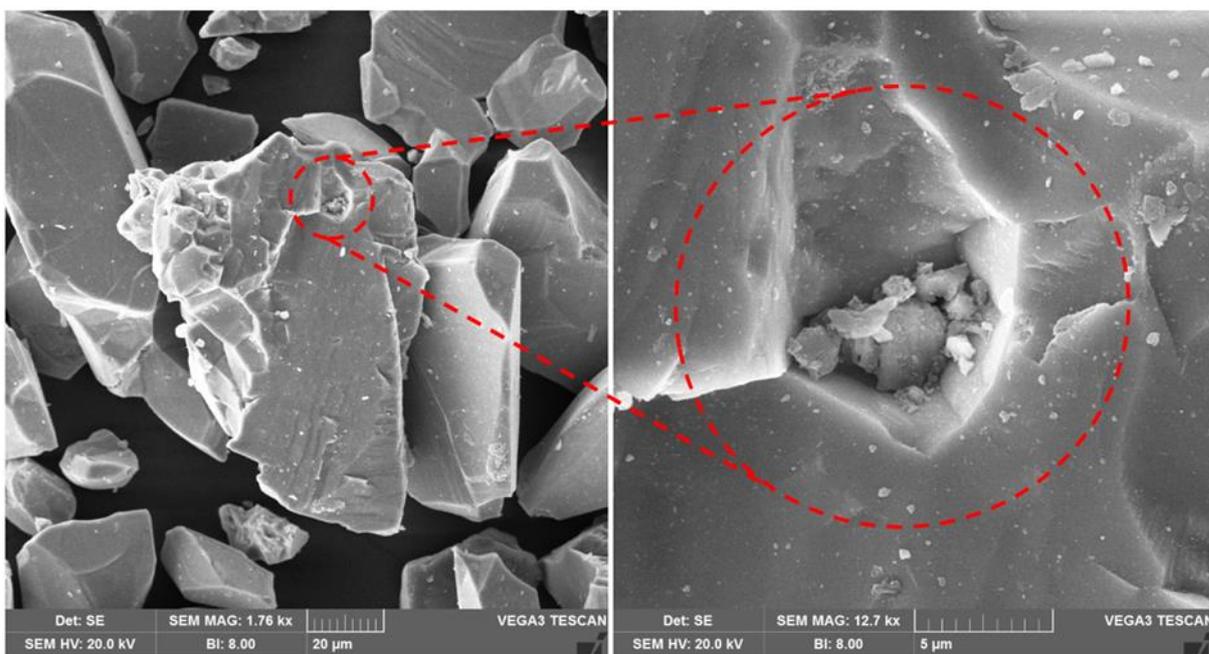


Figura 4.5 – Fotomicrografia do PF-A: 1760x (esquerda) e 12700x (direita).

Na fotomicrografia da amostra de *Pellet feed*-B (PF-B) observa-se que possui características similares percebidas na amostra de PF-A, conforme mostrado na Figura 4.6.

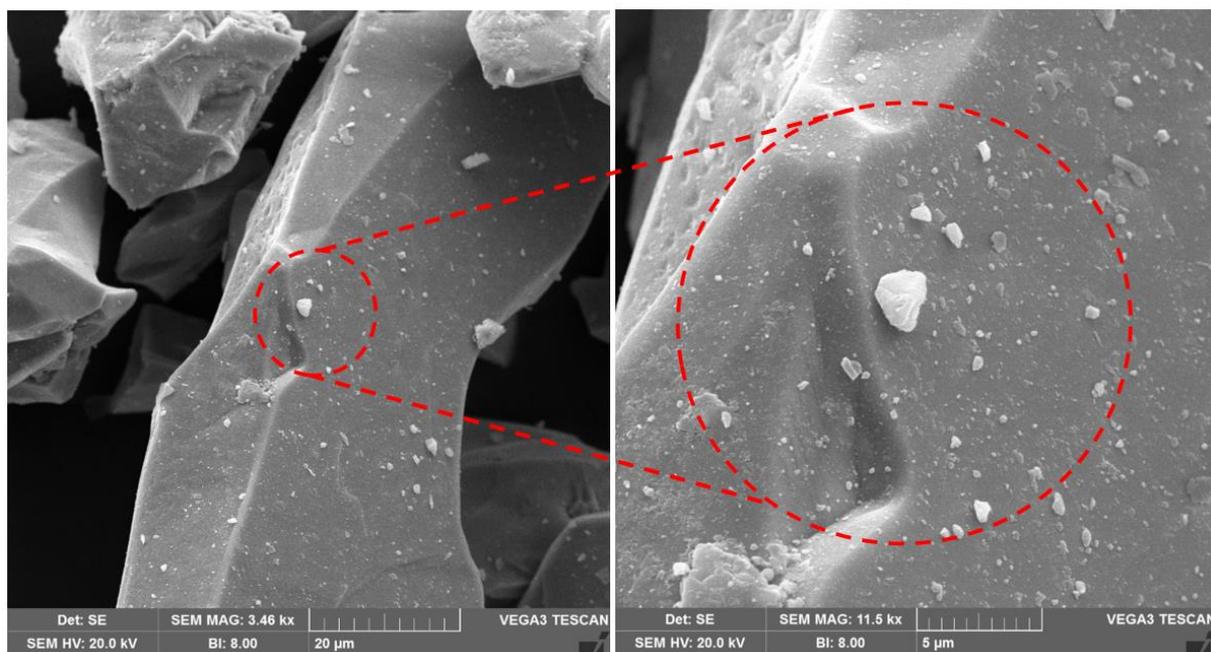


Figura 4.6 – Fotomicrografia do PF-B: 3460x (esquerda) e 11500x (direita).

Na Figura 4.7, a seguir, é mostrado a fotomicrografia da amostra de *Sínter feed*-B (SF-B), e observa-se que além dos tamanhos e formas irregulares das partículas, nota-se que a amostra possui partículas menores de 5 μm agregadas nas partículas maiores em maior quantidade quando comparada com *Pellet feed* A e B. Portanto, percebe-se que as micropartículas (menores que 5 μm) ficam “coladas” nas partículas maiores, por forças de van der Waals que são forças mais fracas quando comparadas com as forças capilares de partículas umedificadas, os resultados irão fornecer com mais evidencias quais materiais emitirá maior concentração de partículas.

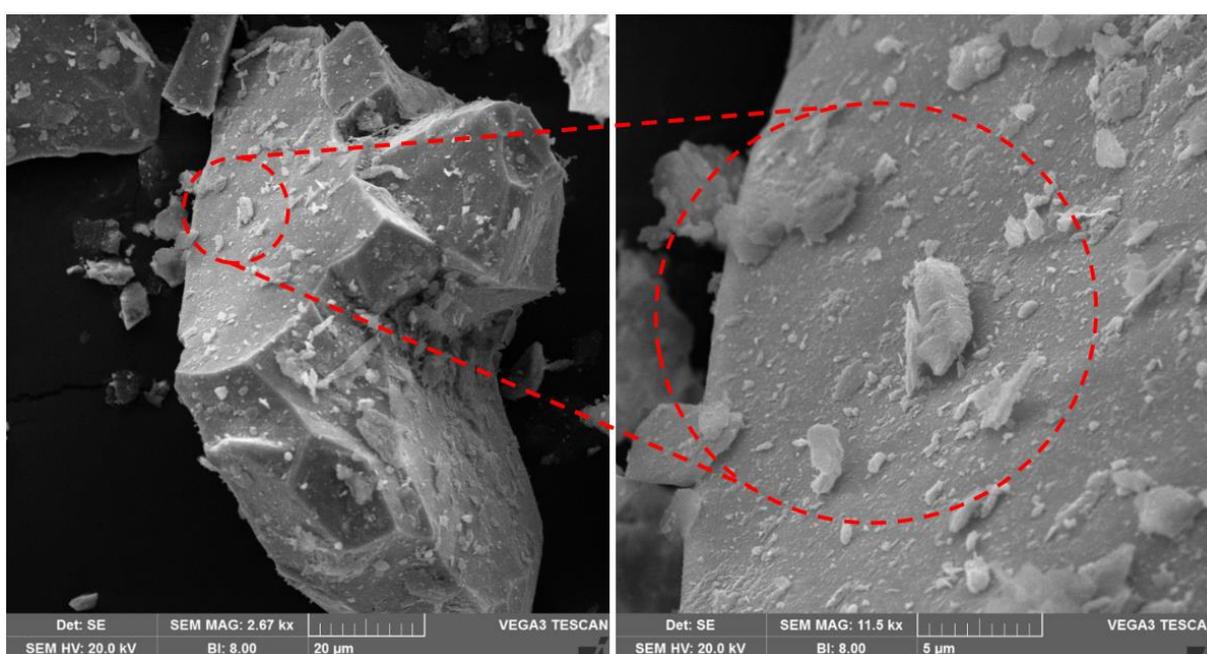


Figura 4.7 – Fotomicrografia do SF-B: 2670x (esquerda) e 11500x (direita).

4.1.3. Massa Específica Real

Os ensaios de massa específica real (ρ_s) das amostras de minério de ferro foram feitas no Laboratório FluidPar, por meio do método de picnometria, onde o picnômetro é uma vidraria laboratorial que consiste, basicamente, num balão de vidro com fundo chato, com volume variando de 25 a 250 ml, dependendo da sua aplicação pode ser até maior, equipado com uma rolha de vidro, através da qual passa um canal capilar.

Os dados de massa específica real serão importantes para colocar na interface do contador de partículas durante a realização dos ensaios. Para este ensaio foi utilizado um picnômetro de 100 ml, conforme mostrado na Figura 4.8.

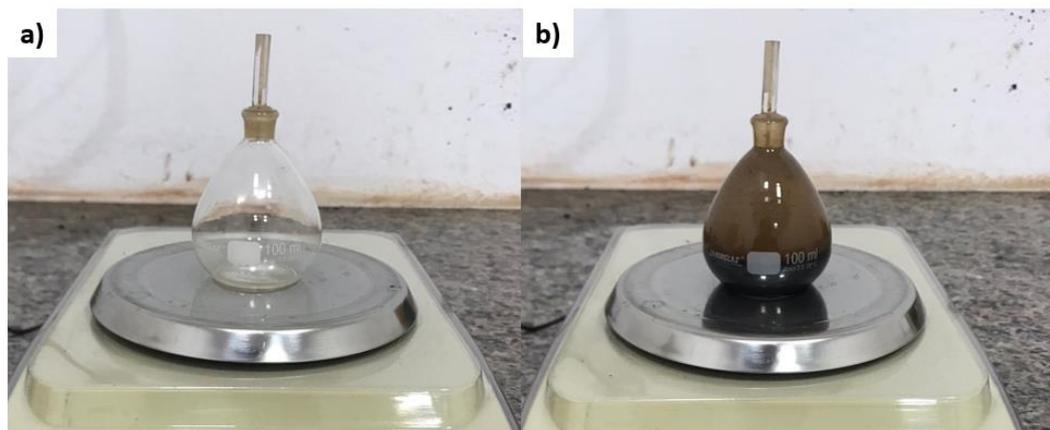


Figura 4.8 – Picnômetro de 100 ml: a) Sem material, b) Com material.

Os passos a seguir apresentam as etapas da metodologia utilizada nos ensaios:

1. Pesar o picnômetro vazio (P_1), previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e resfriado em dessecador;
2. O picnômetro é preenchido com água até transbordar, seca-se a água da superfície externa do mesmo e, em seguida, pesa-se o picnômetro com a água (P_4);
3. A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa de água utilizada. Sabendo o volume de água colocada no picnômetro pode determinar a massa específica da água ou de outro líquido utilizado;
4. Adiciona-se a amostra de sólido no picnômetro e, em seguida, pesa-se todo o conjunto (vidro+água+sólido), obtendo-se o valor de (P_2);
5. A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra é determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com a amostra e água (P_3) e a massa do picnômetro com a amostra (P_2);
6. O volume de água adicionado é obtido pela relação entre a massa específica da água (obtida na etapa 3) e a massa de água adicionada no picnômetro (obtida na etapa 5);

7. O volume do sólido é determinado pela diferença entre o volume total do picnômetro e o volume de água adicionada (obtida na etapa 6);
8. A massa específica da amostra é obtida pela relação entre a massa de sólido (obtida na etapa 4) e o volume do sólido (obtido na etapa 7);
9. Para assegurar uma melhor precisão no cálculo de massa de específica real todos os ensaios dos materiais foram realizados em triplicata.
10. Anota-se os dados obtidos e realiza-se os cálculos da massa específica do material utilizando a Equação (4.1).

$$\rho_s = \frac{(P_2 - P_1)}{(P_4 - P_1) - (P_3 - P_2)} \quad (4.1)$$

P_1 = Peso do picnômetro vazio (g);

P_2 = Peso do picnômetro + amostra (g);

P_3 = Peso do picnômetro + amostra + água (g);

P_4 = Peso do picnômetro + água (g).

Utilizando a metodologia apresentada, e realizando os cálculos, foram obtidos os valores de massa específica real para cada amostra de minério de ferro utilizada neste estudo, conforme mostrado na Tabela 4.2. Reforça-se que esses resultados serão utilizados na interface do aparato, utilizado para medição da concentração de partículas. Onde, para cada ensaio de empilhamento será utilizado a massa específica real do devido minério a ser ensaiado.

Tabela 4.2 – Dados obtidos do ensaio de massa específica real (g/cm³).

MATERIAL	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3	MÉDIA
<i>Pellet Feed - A</i>	4,53	4,73	4,80	4,69
<i>Pellet Feed - B</i>	4,84	4,85	4,89	4,86
<i>Sinter Feed - A</i>	4,02	4,24	4,17	4,14
<i>Sinter Feed - B</i>	4,47	4,44	4,43	4,44

4.1.4. Massa Específica Aparente

No intuito de avaliar a influência da umidade nas amostras de minério. A determinação da massa específica aparente (ρ_a) em função da umidade do material

(U) é realizada por meio do preenchimento de um cilindro cerâmico. Onde o cilindro possui o volume (V_c) de $1000 \text{ cm}^3 \pm 0,3 \text{ cm}^3$, e será preenchido com material a uma determinada umidade, conforme mostrado na Figura 4.9.

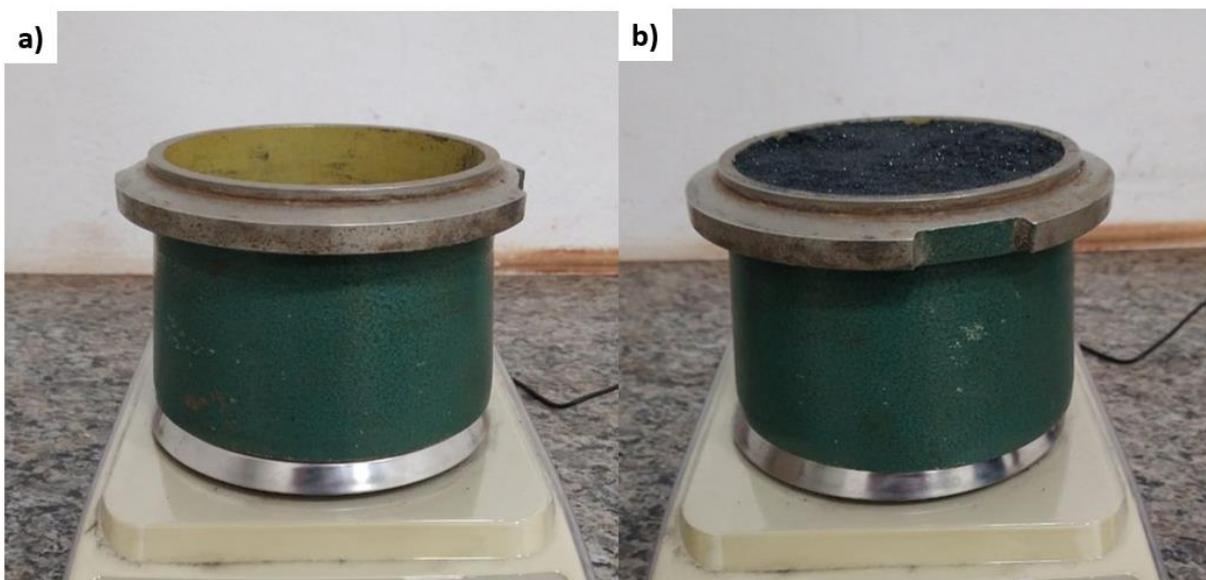


Figura 4.9 – Recipiente utilizado para medição da massa específica aparente: a) Sem material, b) Com material.

Os passos a seguir apresentam a metodologia utilizada nos ensaios:

1. Pesagem da massa do cilindro vazio (tara);
2. Preparo da amostra de material úmido, a uma determinada umidade – Mistura da massa de material seco e massa de água, conforme mostra-se na Equação (4.2) abaixo;
3. Coleta de uma amostra para verificação/validação da umidade ensaiada;
4. Preenchimento do cilindro por camadas com material úmido (M_u), para evitar pontos de vazios no interior do cilindro;
5. Com o auxílio de um raspador, o material em excesso ao volume do cilindro é removido;
6. Pesagem do cilindro + material úmido;
7. O material é então retirado do cilindro, o qual é limpo para retirar material remanescente;
8. Uma nova amostra é então preparada a uma umidade de 7% e o processo de 1-7, é repetido;
9. O ensaio é realizado com a amostra de 0% e 7%;

10. Com os valores das massas obtidos em cada unidade e com o volume conhecido, determina-se a massa específica aparente do material, através da Equação (4.2).

$$\rho_a = \frac{\text{Massa de material úmido}}{\text{Volume do cilindro}} = \frac{M_u}{V_c} = \frac{g}{cm^3} \quad (4.2)$$

Utilizando a metodologia acima e realizando os ensaios em triplicata para uma melhor confiabilidade de resultados, obteve-se os valores da massa específica aparente, conforme mostrado na Tabela 4.3. Notou-se que a massa específica aparente dos minérios *Pellet feeds* são próximas e o mesmo foi percebido para os minérios *Sínter feed*, comprovando que os materiais são similares.

Tabela 4.3 – Dados obtidos do ensaio de massa específica aparente (g/cm³).

MATERIAL	ENSAIO 1	ENSAIO 2	ENSAIO 3	MÉDIA
<i>Pellet Feed - A</i>	1,54	1,60	1,61	1,58
<i>Pellet Feed - B</i>	1,47	1,47	1,45	1,47
<i>Sínter Feed - A</i>	2,22	2,19	2,22	2,21
<i>Sínter Feed - B</i>	2,58	2,53	2,54	2,55

5. MÉTODOS DE ENSAIOS DE EMPILHAMENTO EM ESCALA

1:6,45

5.1.1. Descrição

Afim de estudar a emissão de poeira gerada durante o empilhamento de minério de ferro em um pátio de estocagem, utilizou-se como protótipo uma empilhadeira/recuperadora com capacidade nominal de empilhamento de 8000 t/h e velocidade da correia de 4,2 m/s (demais dados em anexo). Para a realização do estudo em escala será utilizado como modelo um transportador de correia, a supressão (spray 1 e 2) no ponto de transbordo de material e a aspensão (spray 3) sobre a correia, conforme mostrado na Figura 5.1 a seguir.

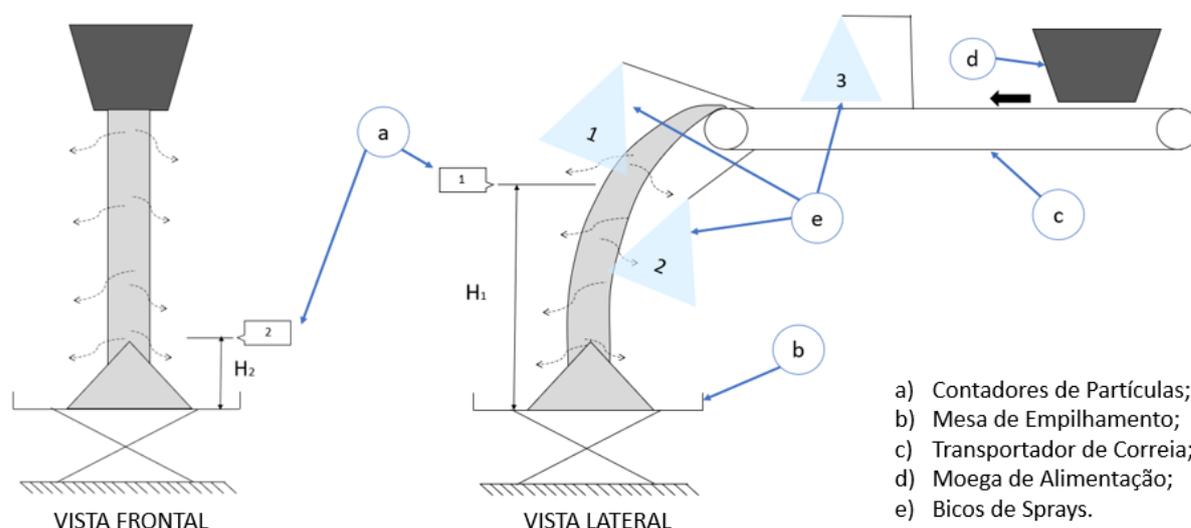


Figura 5.1 – Desenho esquemático da bancada de empilhamento.

Para a supressão (sprays 1 e 2) no ponto de transbordo, utilizou-se o bico de spray de pulverização fina, com tamanho de gota entre 29 e 40 μm , conforme mostrado na Figura 5.2 a seguir.



Figura 5.2 – Bico de spray de pulverização fina.

Para a aspersão (spray 3) sobre a correia, utilizou-se o bico de spray de pulverização do tipo cone oco, ângulo do spray de 80° (5 bar) com tamanho de gota entre 200 e 3600 µm, conforme mostrado na Figura 5.3, a seguir.

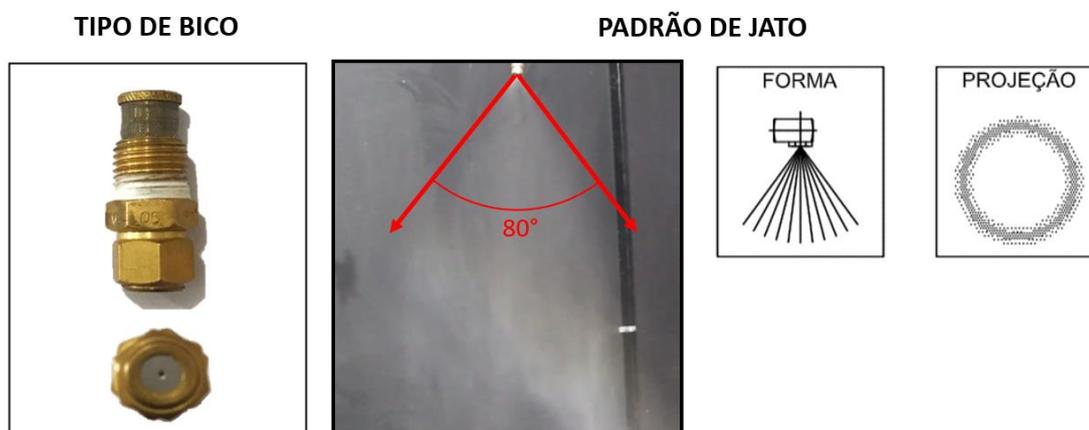


Figura 5.3 – Bico de spray padrão cone oco.

Tabela 5.1 A Tabela 5.1 apresenta os dados calculados de vazão para as pressões de 4, 5 e 6 bar. As medições foram feitas cronometrando o tempo que leva para preencher um Becker de vidro de 500 ml, variando a pressão. A partir dos resultados, calculou-se a vazão para as 3 pressões. Será utilizado nos ensaios, de spray sobre a correia (contenção), a pressão de 5 bar pois é mais comumente encontrada na mineração.

Tabela 5.1 – Medições de vazão para as pressões de 4, 5 e 6 bar.

MEDIÇÕES	4 bar	5 bar	6 bar
1	144	180	180
2	120	180	240
3	144	144	240
Vazão Média (l/h)	136	168	220

5.1.2. Estudo de Similaridade

Com base nos parâmetros adimensionais determinados na Seção 2.4, sobre Análise Dimensional e Similaridade, um modelo experimental que pode determinar a vazão volumétrica do protótipo de uma empilhadeira pode ser montado. Aplicando a teoria da similitude neste estudo, e levando em consideração que a similaridade

geométrica, cinemática e dinâmica entre o modelo (M) e o protótipo (P) foi satisfeita, é dado continuidade ao estudo em escala com segurança.

Utilizando os dados e informações reais de uma empilhadeira/recuperadora (protótipo), conforme mostrado na Tabela 5.2, e utilizando os parâmetros que foram obtidos usando o teorema de Pi determina-se o dimensionamento em escala para o modelo (M). Os cálculos mais detalhados encontram-se em anexo.

Tabela 5.2 – Informações de uma empilhadeira real.

PROTÓTIPO	EMPILHADEIRA
Material Manuseado	Minério de Ferro
Capacidade Nominal (t/h)	8.000
Velocidade da Correia (m/s)	4,2
Largura da Correia (mm)	1.800
Massa Específica do Minério (g/cm ³)	2,55

Para iniciar o dimensionamento da empilhadeira em escala determina-se o fator de escala (λ), utilizando a Equação (2.11). Levando em consideração a largura da correia como comprimento característico, tem-se:

$$\lambda = \frac{l_P}{l_M} = \frac{1800 \text{ mm}}{279 \text{ mm}} = 6 \frac{4}{9} = 6,45.$$

Onde, l_P é a largura da correia do protótipo (empilhadeira real) e l_M é a largura da correia do modelo (transportador do laboratório). Com essas informações, a velocidade do protótipo (v_P) e utilizando a Equação 2.13 pode-se determinar a velocidade do modelo (v_M).

$$v_M = v_P \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda}} = \left(4,2 \frac{m}{s}\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{6,45}} = 1,65 \frac{m}{s}.$$

O passo seguinte consiste em determinar a vazão volumétrica do modelo (Q_M). Primeiro, transforma-se a vazão mássica do protótipo (\dot{m}_P) em vazão volumétrica (Q_P). Para isso, divide-se a vazão volumétrica do modelo (M) pela massa específica aparente do minério de ferro. Procede-se da seguinte forma:

$$\text{Vazão Volumétrica Protótipo} = \frac{\text{Vazão Mássica Protótipo}}{\text{Massa Específica Aparente}}$$

$$\text{Vazão Volumétrica} = \frac{8000 \text{ t/h}}{2,55 \text{ t/m}^3} = 3137,25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Tendo a vazão volumétrica do protótipo (Q_P) e utilizando a Equação (2.15) determina-se a vazão volumétrica do modelo (Q_M).

$$Q_M = Q_P \cdot \frac{1}{\lambda^{5/2}} = 3137,25 \cdot \frac{1}{(6,45)^{5/2}} = 29,67 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

A seguir, na Tabela 5.3, apresenta-se um resumo dos dados e os resultados calculados anteriormente para a empilhadeira do protótipo (real) e do modelo (escala).

Tabela 5.3 – Resumo das informações do protótipo e modelo da empilhadeira.

PARÂMETRO	PROTÓTIPO (Real)	MODELO (Experimento)
Largura da Correia da Empilhadeira (mm)	1.800	279
Fator de Escala (-)	1	6,45
Velocidade da Correia (m/s)	4,2	1,65
Vazão Mássica (t/h)	8.000	75,67
Massa Específica Aparente (t/m ³)	2,55	2,55
Vazão Volumétrica (m ³ /h)	3.137	29,67

5.1.3. Metodologia de ensaios para empilhamento

A seguir, serão apresentados os procedimentos experimentais utilizados nos ensaios, para a realização dos estudos da geração de poeira durante o empilhamento de minério. A metodologia de ensaios em transportadores de correia, inicia-se com a preparação da amostra de material para uma determinada umidade (U), conforme a Equação 5.1, abaixo. Após definido a umidade de ensaio do material e a quantidade de material úmido (M_u), o processo de preparação inicia-se com a pesagem do material seco (M_s) e da massa de água (M_a), os quais são suficientes para se obter uma massa de material úmido necessária para a realização do experimento. Neste trabalho, a massa de material úmido de 70 kg é suficiente para a realização do ensaio.

$$U = \frac{M_a}{(M_a + M_s)} = \frac{(M_u - M_s)}{M_u} \quad (5.1)$$

O material seco (M_s) é então colocado em uma betoneira industrial e a água é borrifada gradualmente, proporcionando uma melhor eficiência na mistura. O tempo de mistura foi padronizado em 2 min. Após a mistura do material, três amostras devem ser coletadas e levadas ao forno para secagem a 105°C , durante 24h, para verificação da umidade inicial da mistura.

Após retirada da amostra é pesado 70 kg de material e preenche-se a moega de alimentação. Em seguida, ajusta-se a mesa de empilhamento para a determinada altura de ensaio e posiciona-se os contadores de partículas.

Em seguida, a câmera é posicionada e os contadores são acionados por 15 s, com uma taxa de amostragem de 1 s, para medir a concentração de partículas no ambiente e estabelecer uma linha de referência.

Passado o tempo de estabilização, o transportador de correia é ligado com o auxílio do inversor de frequência, o transportador permanece acionado até esvaziar a moega de alimentação (para os ensaios com spray sobre a correia, liga-se o spray junto o transportador de correia). Ao finalizar o experimento, os contadores permanecem ligados por mais 30 s.

Ao fim do experimento são retiradas três amostras da pilha formada para a verificação da umidade final. Em seguida, a mesa de empilhamento é limpa e inicia-se os experimentos para as demais alturas de empilhamento, conforme mostrado na Figura 5.4. Após a realização dos ensaios analisa-se os dados coletados. Para os ensaios com spray sobre a correia.

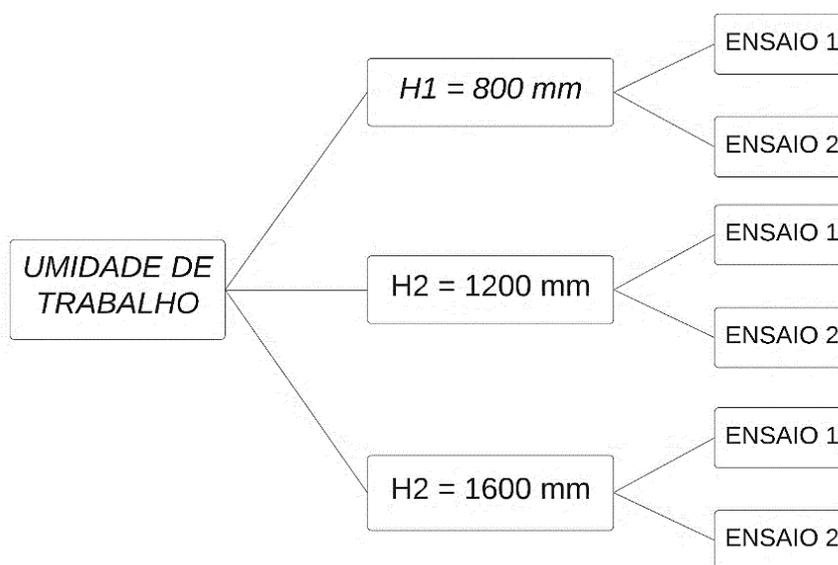


Figura 5.4 – Diagrama de experimentos dos materiais sem/com supressão, variando a altura de empilhamento.

5.1.4. Metodologia de ensaio de queda de material em tubo

Segundo Macaringue (2019), para realizar avaliação do efeito da umidade na geração de poeira, a metodologia de ensaio em queda livre no tubo mostrou ser confiável e vantajoso devido a quantidade de material utilizada nos ensaios ser reduzida. Essa metodologia desenvolvida por, permite determinar uma umidade crítica, para cada material granular, realizando experimentos de queda de material para diversas umidades.

A umidade crítica segundo, pode ser definida como um parâmetro para a determinação de um teor limite de umidade, acima do qual a emissão de poeira tende a um valor constante. Como analogia, no campo da fluidização de particulados, a velocidade mínima de fluidização permite a determinação de velocidade de fluidização para transportadores fluidizados, tipicamente da ordem de 2 a 3 vezes o seu valor (MACARINGUE, 2019).

Para determinação da umidade crítica serão executados experimentos para teores crescentes de umidade do material, medindo-se o número máximo de partículas emitido no experimento de queda livre no tubo. Será realizado ensaios de geração de poeira em queda livre, utilizando um dispositivo cilíndrico com um reservatório no topo. O reservatório é preenchido com uma massa padronizada do minério a ser testado e, ao abrir a guilhotina ocorre a queda do material no interior do cilindro (tubo).

Na lateral do cilindro está inserido um bocal, para realizar a medição da poeira suspensa devido o processo de queda do minério. Um contador de partículas registrará o número e a concentração de partículas no ar. A comparação entre diferentes condições se fará pelo pico de concentração, medido pelo número de partículas. A Figura 5.5 apresenta a configuração de teste de queda livre de material.

A metodologia aplicada nos ensaios, conforme foi mencionado, será a mesma utilizada por Macaringue (2019). Contudo, será proposto uma nova metodologia de avaliação dos resultados, devido a função sigmoidal não se adaptar com os dados coletados.

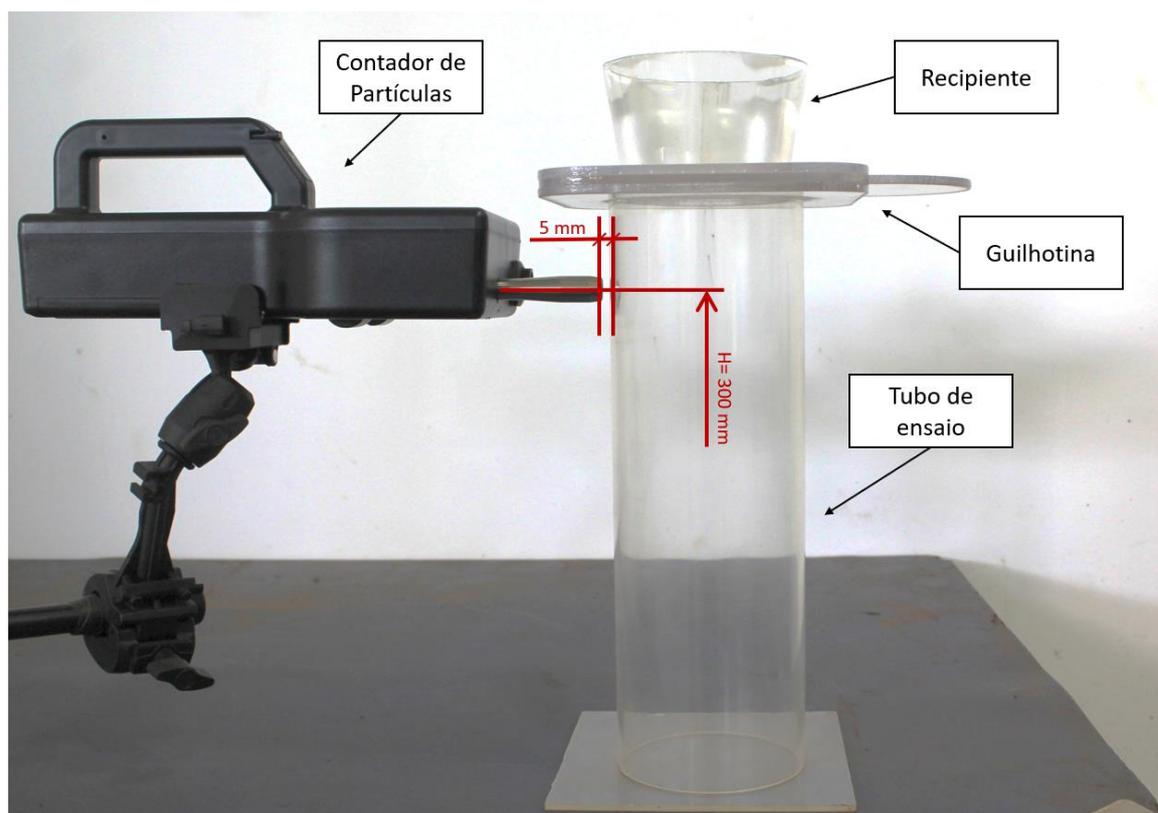


Figura 5.5 - Configuração para o ensaio de queda livre de material no tubo.

Portanto, após a coleta dos dados do máximo de concentração, calcula-se a emissão da poeira para cada teor de umidade em relação ao anterior. Após vários testes, percebe-se que a partir da medição onde a redução seja menor que 15% a concentração de particulados permanece quase que constante. Sendo assim, utilizou-se da lei de potência para análise da diferença das concentrações maiores que 15%, e para as medições onde a concentração de poeira quase não varia se utilizou da linearidade. Portanto, definiu-se o ponto de encontro da curva de potência e a tendência linear (reta) como umidade crítica do material. A Figura 5.6 demonstra a definição da umidade crítica para os ensaios de queda livre de material no tubo.

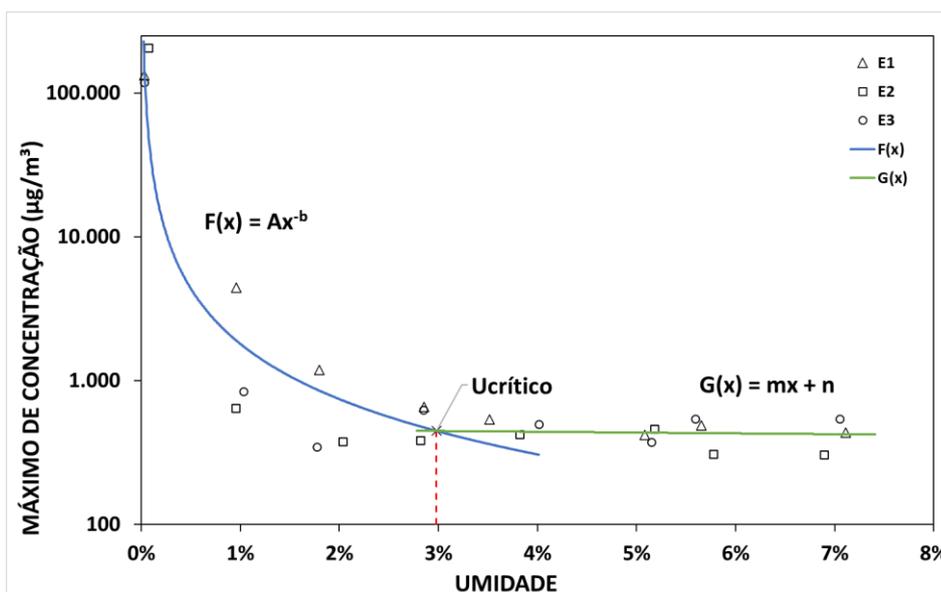


Figura 5.6 – Exemplo de procedimento para determinação de umidade crítica. Onde $F(x)$ é a função de potência e $G(x)$ a função linear.

O procedimento de ensaio utilizado nos ensaios de queda livre no tubo, para os materiais caracterizados, segue conforme apresentado a seguir:

1. Selecionar uma quantidade de minério suficiente para o ensaio;
2. Preparar as amostras de 1000g de material usando a metodologia descrita para definição de umidade utilizando a Equação (5.1);
3. Ajustar o contador de partículas na altura de 300 mm e afastamento de 5 mm, conforme mostrado na Figura 5.5;
4. Pesar 200 g da amostra e colocar no recipiente com a guilhotina fechada;
5. Ligar o contador de partícula para medição da concentração de partículas ambiente;
6. Abrir a guilhotina para que o material possa cair em queda livre;
7. Parar a contagem de partículas após 15s da guilhotina ser aberta;
8. Registrar as leituras efetuadas;
9. Retirar amostra do material ensaiado para verificação da umidade;
10. Repetir o ensaio mais duas vezes (triplicata);
11. Repetir a metodologia com teor de umidade crescente;
12. Gravar os dados em Excel;
13. Processamento de dados;
14. Ensaiar os restantes materiais seguindo os mesmos passos.

5.2. Testes para validação da bancada

5.2.1. Definição do posicionamento da medição de partículas

Durante a queda do material particulado, poeiras são emitidas ao longo de todo o fluxo de descarga de material em queda e em várias direções. Precisa-se determinar quais posições emitem maior concentração de poeira, para posteriormente se verificar a eficiência do controle de emissão de poeira. Assim, traçou-se o perfil dos pontos de coleta, tanto para o contador 1 (frontal ao transportador de correia) como para o contador 2 (lateral ao transportador de correia), conforme mostrado na Figura 5.7.

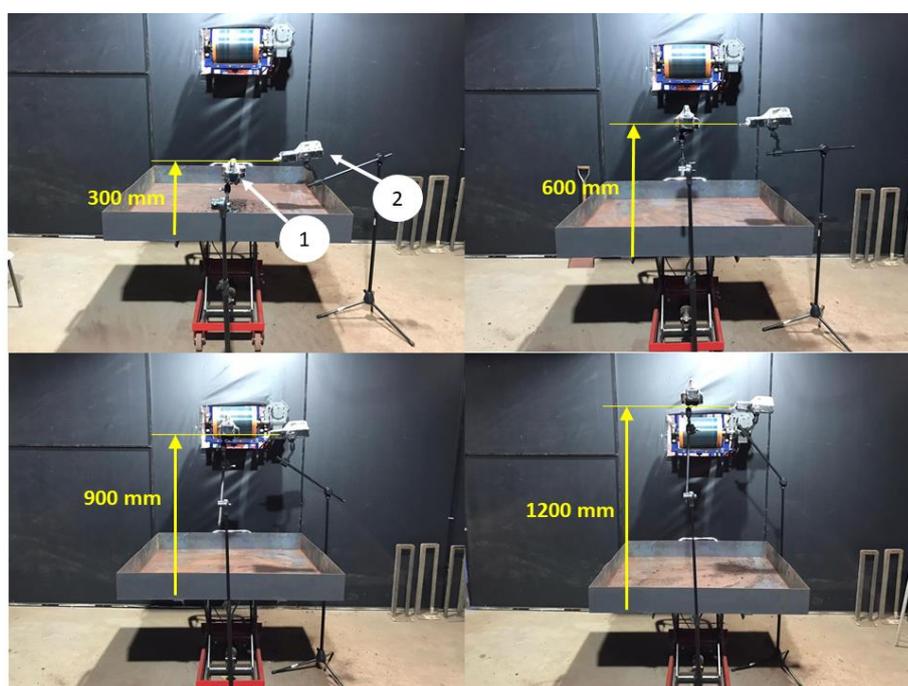


Figura 5.7 – Configuração das alturas dos contadores em relação a mesa de empilhamento (vista frontal).

Realizou-se ensaios variando apenas a altura dos contadores, em relação a mesa de empilhamento ($h=300\text{mm}$, $h=600\text{mm}$, $h=900\text{mm}$ e $h=1200\text{mm}$), e mantivemos a altura de empilhamento fixa de 1200 mm (altura do transportador de correia em relação a mesa de empilhamento). Os ensaios foram realizados com o material *Sínter feed* e com um teor de umidade de 3%. Essas medições permitem determinar quais posições da descarga de material particulado emitem maior concentração de poeira.

A Figura 5.8 apresenta os resultados para o contador 1 (frontal), na altura $h=900$ mm mediu a maior emissão de particulados ($9.810,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$). As demais alturas mediram concentrações abaixo de $4.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Os resultados mostram que na região frontal na altura de 900 mm, é onde há maior concentração de partículas que se desprendem do fluxo principal quando comparado com as outras alturas medidas.

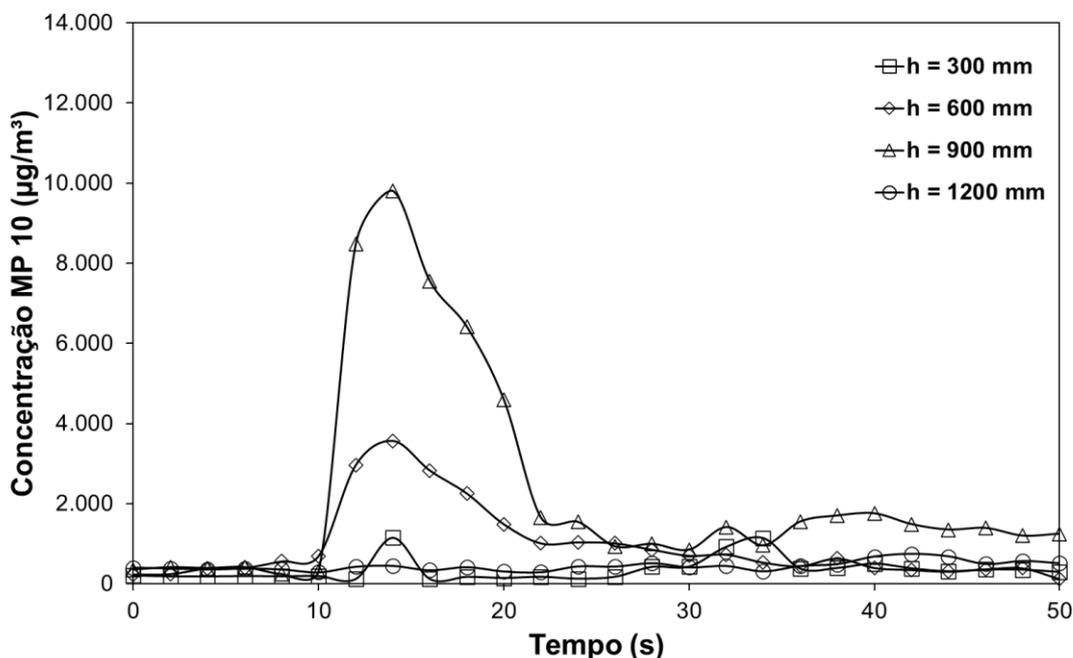


Figura 5.8 – Concentração de partículas de tamanho PM10, medidas por um contador Frontal à descarga do material particulado. Para $h=900$ mm tem-se a maior emissão.

Para a medição de poeira do contador 2, na posição lateral, constatou-se que a altura $h=300$ mm foi que mais emitiu poeira ($12.079,02 \mu\text{g}/\text{m}^3$), conforme mostrado na Figura 5.9. Em outras alturas, as concentrações de poeira foram registradas abaixo de $5.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Comparando o maior pico de emissão de poeira capturado pelo contador frontal (Figura 5.8) e o maior pico do contador lateral (Figura 5.9), temos que cerca de 20% de poeira é emitida a mais para as laterais do que para frente.

Uma hipótese para este comportamento, é que a energia gerada durante o impacto do fluxo de material com a superfície da bandeja, seja maior que as forças que mantem as partículas finas agregadas no fluxo principal, fazendo com que se desprendem com mais facilidade e assim gerando uma maior concentração de partículas dispersa. Esse comportamento será melhor compreendido no decorrer do estudo.

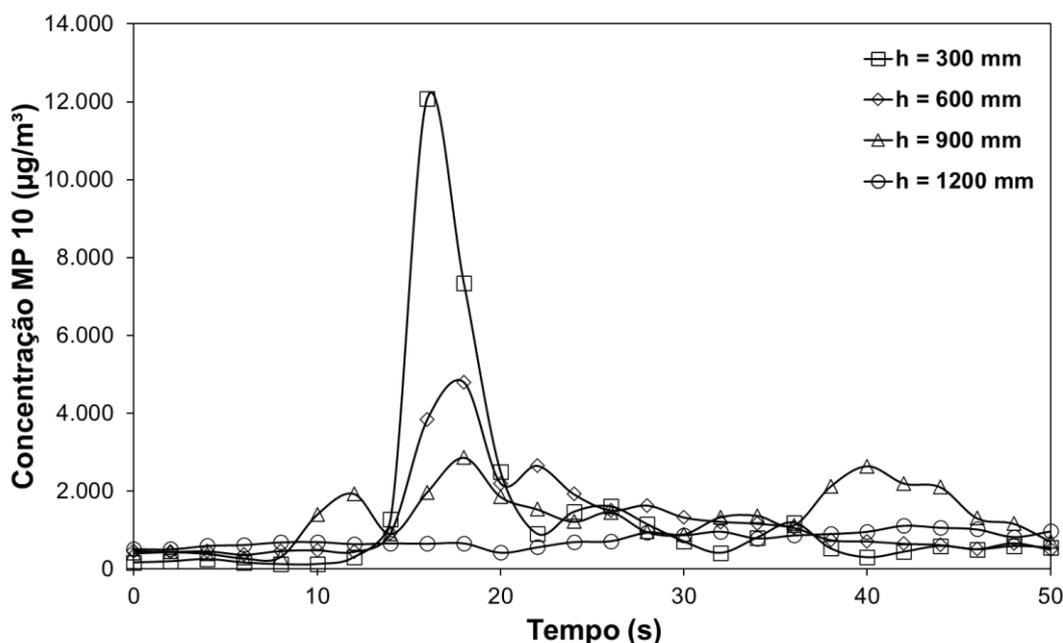


Figura 5.9 – Concentração de partículas de tamanho PM10, medidas por um contador Lateral à descarga do material particulado. Para h=900 mm tem-se a maior emissão.

As posições dos contadores que mediram as maiores concentrações de poeira no ar, para o contador 1 (frontal) e contador 2 (lateral) estão nas alturas 900 mm e 300 mm (respectivamente) em relação a mesa de empilhamento. Determinou-se também para as alturas de empilhamento mínima (800 mm) e máxima (1600 mm), os pontos que serão colocados os contadores. A Tabela 5.4 resume as alturas dos contadores, em relação a mesa de empilhamento, que serão utilizadas no decorrer dos ensaios para cada altura de queda de material durante o empilhamento de minério.

Tabela 5.4 – Altura dos contadores (1 e 2), em relação a mesa de empilhamento, para cada altura de queda.

CONTADOR	H _{mínima} (mm)	H _{média} (mm)	H _{máxima} (mm)
Frontal (1)	600	900	1200
Lateral (2)	200	300	400

5.2.2. Verificação da influência dos sprays no ponto de transbordo

Afim de propor uma forma de controle da emissão de poeira, utilizou-se a supressão via spray da poeira dispersa no ar, gerada no ponto de transbordo, sendo

um dos principais métodos utilizados devido à sua facilidade de operação e eficiência econômica.

Para avaliar a influência das gotículas do spray nas medições pelos contadores, realizou-se testes de verificação com os sprays acionados e a correia funcionando em vazio, sem a presença de minério. Os ensaios foram realizados fazendo uma medição da concentração de partículas ambiente e, em seguida, foi realizada medição com os sprays acionados. A Figura 5.10 apresenta os resultados. A partir dos resultados comprovou-se que os contadores estavam medindo as gotículas de água, sendo que o contador 2 localizado na posição lateral foi o que obteve uma maior influência dos sprays. Logo, percebe-se que este tipo de contador de partículas não é indicado para ensaios realizados com alta umidade.

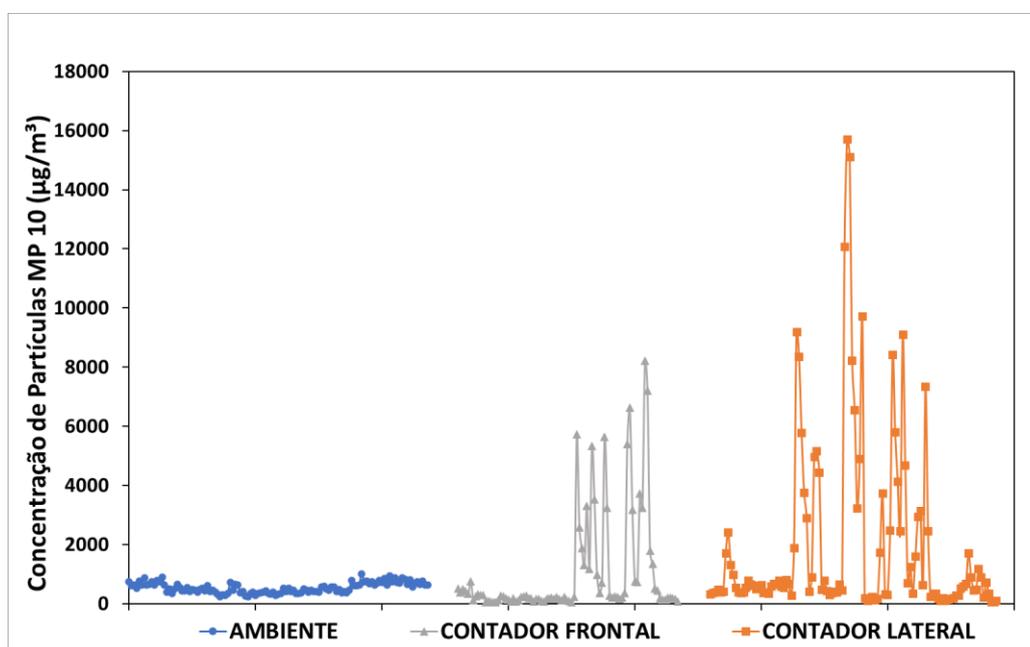


Figura 5.10 – Concentração de partículas de MP10, medidas por um contador frontal e outro lateral. Para ensaios com spray e correia funcionando sem material.

5.2.3. Testes iniciais para ajuste de metodologia utilizando PF-B

Os testes consistiram em variar a altura do empilhamento, em relação ao transportador de correia. Manteve-se as posições fixas dos contadores 1 e 2 (conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**). A Figura 5.11 apresenta os resultados para o PF-B.

Para esse teste foi utilizado o segundo material (*Pellet Feed-B*), a 7% de umidade. Nota-se o seguinte comportamento da nuvem de partículas de minério. O contador 1, localizado no ponto mais acima e na frente do fluxo, tem seu ápice de concentração quando a altura do empilhamento está em 800 mm. Essa concentração decresce na posição intermediária de 1200 mm e atinge sua menor concentração na maior altura de 1600 mm.

Esse resultado não era esperado quando se compara a estudos anteriores similares (AZHAR *et al.*, 2019). As investigações experimentais mostraram que as taxas de geração de poeira de uma corrente de partículas, em queda livre, aumentaram à medida que a altura da queda aumentou.

Isso pode ter ocorrido devido a medição ser no ponto frontal da saída do transportador logo após o desprendimento do material, não tendo influência da altura de queda. Outro fator que pode ter influenciado na medição é a umidade elevada do material causando uma imprecisão nos resultados medidos.

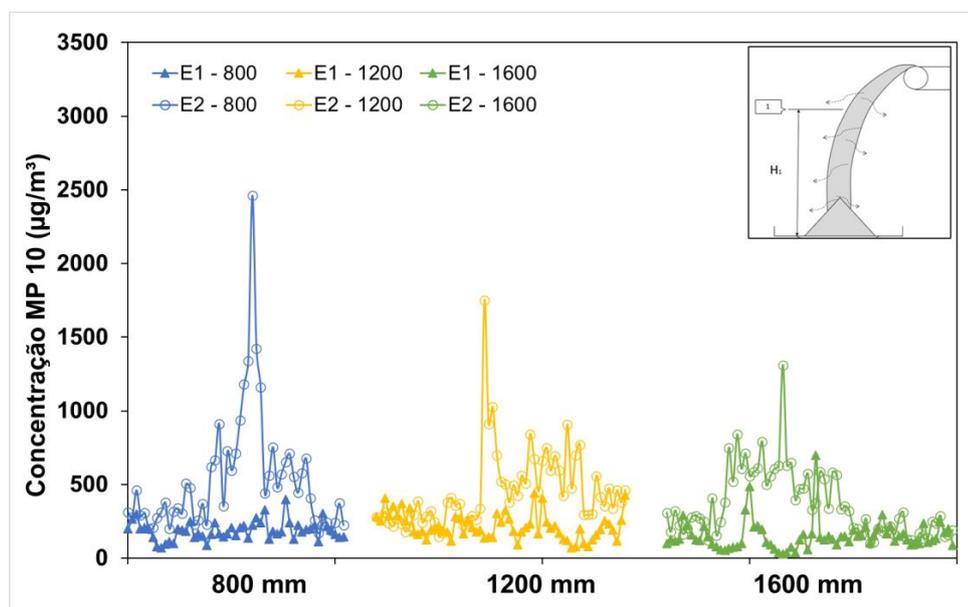


Figura 5.11 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Frontal a descarga do material particulado. Para h=800 mm tem-se a maior emissão.

O fenômeno inverte ao avaliar o contador 2, localizado no ponto mais abaixo e na lateral do fluxo, tem seu ápice de concentração na altura de 1600 mm. Essa concentração decresce e obtém concentrações semelhantes nas posições intermediárias de 1200 mm e na menor altura de 800 mm.

A Figura 5.12 mostra os resultados. Uma possível explicação para esse o comportamento se atribui ao ar induzido pelo fluxo mássico, que se espera aumentar com elevação da altura de queda. O mesmo é expulso no impacto do minério com a bandeja de recebimento. Quanto maior a altura de queda, maior é a violência da expulsão do ar retido no espaço intersticial do material em descarga. Espera-se que estudos futuros elucidem essa expansão lateral privilegiada da nuvem de poeira.

Observou-se também que, as concentrações medidas no segundo ensaio, para todas as alturas de empilhamento, foram bem maiores que as do primeiro ensaio. Uma hipótese para esse fenômeno é que os ensaios foram realizados em espaços pequenos de tempo, não permitindo que as partículas suspensas do ensaio anterior tenham sedimentado. Outro fator que pode ter influenciado é uma falha na limpeza da bandeja de empilhamento, permitindo que partículas de materiais “secos” do ensaio anterior entre em suspensão com o impacto do material do segundo ensaio.

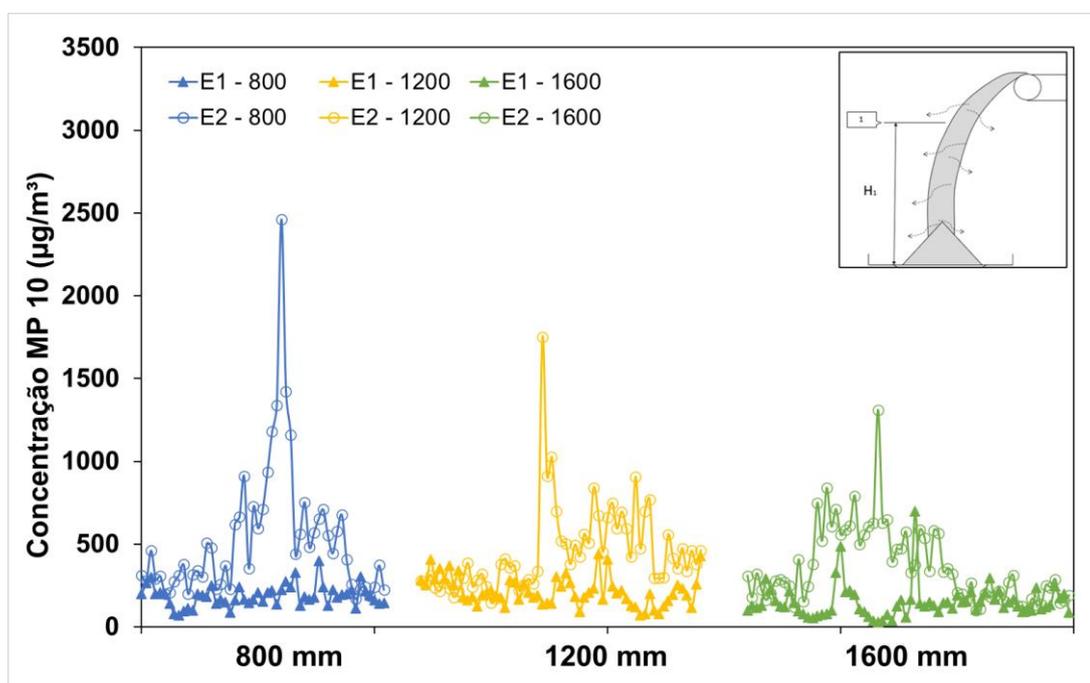


Figura 5.12 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Lateral a descarga do material particulado. Para $h=1600$ mm tem-se a maior.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Ensaio de queda em tubo

Afim de avaliar e determinar a umidade crítica (teor de umidade acima do qual o desprendimento da poeira, durante o manuseio do material, permanece praticamente constante) dos materiais a serem ensaiados. Sendo assim, utilizou-se do método de teste de queda no tubo, pelo fato da quantidade de material usada para o ensaio ser reduzida e permitindo determinar a umidade crítica através do aumento do teor de umidade, os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

A Figura 6.1 apresenta os resultados do teste de queda no tubo para o *Pellet feed-A* (PF-A). Não se realizou ensaios para *Pellet feed-B* devido a pouca quantidade de material, o qual foi toda utilizada nos testes de validação. Vale ressaltar que, devido os materiais serem bem similares a umidade crítica de ambos, devem ser próximas também.

Para os ensaios realizados com o teor de umidade crescente para o material PF-A, observou-se que até 5% de umidade a concentração de particulados variou, permitindo que a lei de potência descrevesse a curva de decaimento. A partir de 5% observou-se que a concentração permaneceu quase constante seguindo um perfil linear. Sendo assim, o ponto onde o perfil de potência e linear coincidiram foi determinado de umidade crítica. Para o *Pellet feed-A* a umidade crítica determinada foi de 4,7%. Portanto, a partir da umidade crítica determinada concluiu-se que os ensaios anteriores realizados a 7% de umidade estavam acima da umidade crítica encontrada (4,69%), o que pode ter causado a imprecisão nos resultados devido o contador não ser o indicado para testes com alta umidade.

O resultado do Teste de Queda com o teor de umidade crescente para o *Sínter feed-A* (SF-A) é apresentado na Figura 6.2. Observou-se que até o teor de umidade de 3% a concentração de particulados variou, permitindo que a lei de potência descrevesse a curva de decaimento da concentração. A partir de 3% de umidade do material, a concentração de poeira emitida permaneceu quase constante, seguindo um perfil linear. O ponto onde o perfil de potência e linear coincidiu foi de 2,07%, isso determina a umidade crítica para o *Sínter feed-A*.

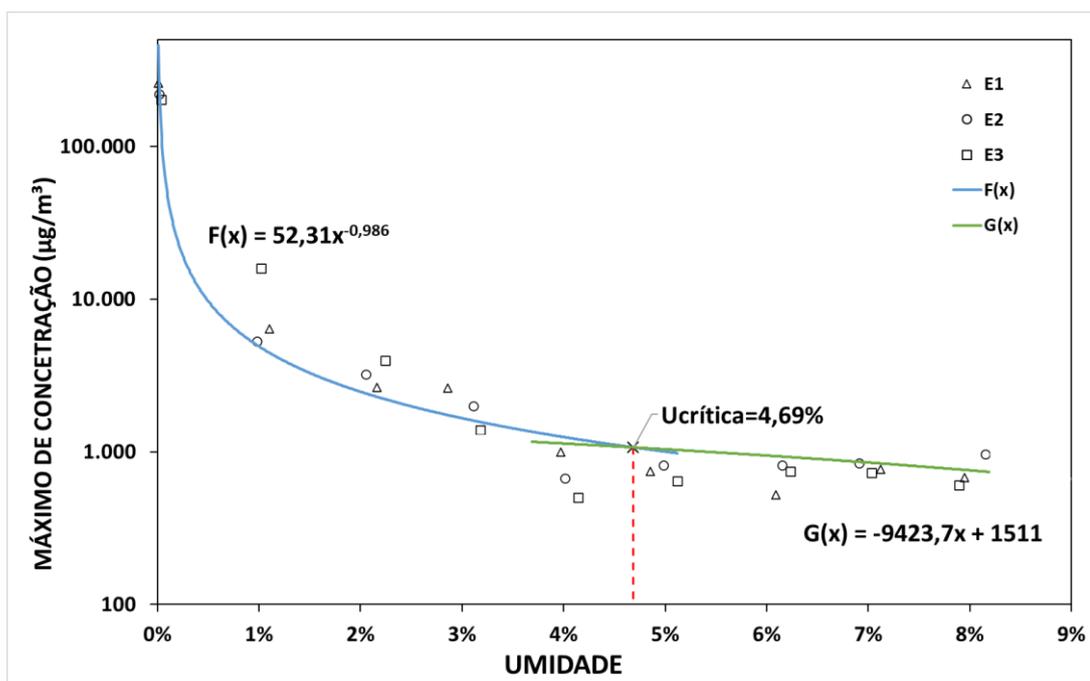


Figura 6.1 – Concentração máxima de partículas (MP10), medida no teste de queda para as amostras de *Pellet feed - A* com o teor de umidade crescente. O teor da umidade crítica foi de 4,7%.

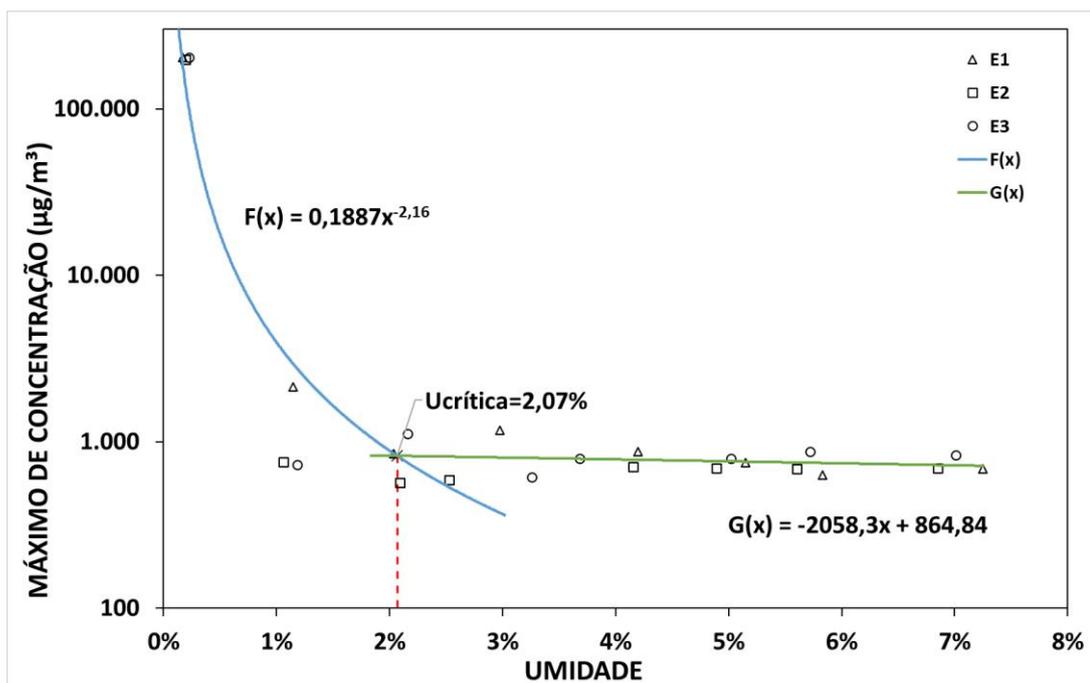


Figura 6.2 – Concentração máxima de partículas (MP10), medida no teste de queda para as amostras de *Sínter feed - A* com o teor de umidade crescente. O teor da umidade crítica foi de 2%.

Por se tratar de materiais similares, para o *Sínter feed-B* a umidade crítica determinada (2,98%) foi próxima da umidade crítica encontrada para o SF-A (2,07%),

que foi em torno de 2% e 3%, conforme mostrado na Figura 6.3. O que fortalece a metodologia proposta para materiais similares. Sendo assim, para os ensaios realizados com SF-A e SF-B, será adotado o teor de umidade 20% abaixo da menor umidade crítica encontrada para ambos materiais, ou seja, 20% abaixo da umidade crítica determinada para o SF-A (2%). Logo, os ensaios a seguir utilizando os materiais *Sínter feed-A* e *Sínter feed-B*, são realizados com o teor de umidade de 1,7%.

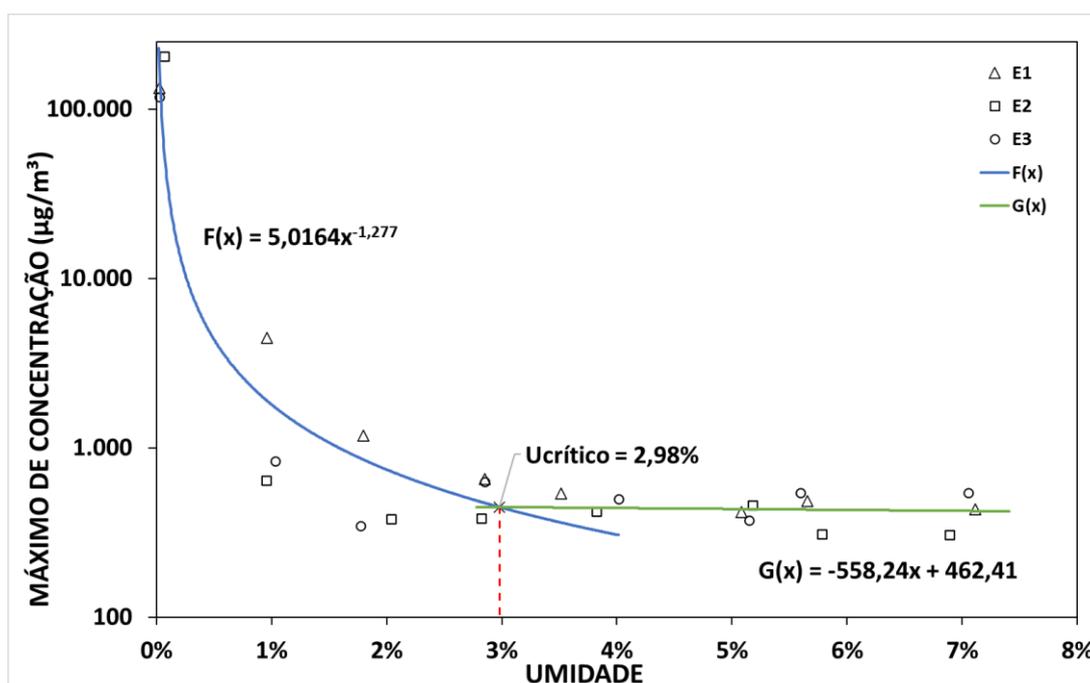


Figura 6.3 – Concentração máxima de partículas (PM10), medida no teste de queda para as amostras de *Sínter feed - B* com o teor de umidade crescente. O teor da umidade crítica foi de 3%.

6.2. Ensaios variando a altura de empilhamento sem spray (SF-A)

Para esse ensaio foi utilizado o material *Sínter Feed-A* a 1,7% de umidade. Essa escolha da umidade deve-se a esse valor corresponder a 20% abaixo da umidade crítica, a qual foi determinada no ensaio de queda de material em tubo. O ensaio consistiu em variar a altura do empilhamento, em relação ao transportador de correia. Manteve-se as posições fixas dos contadores 1 (frontal) e 2 (lateral), conforme a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

A Figura 6.4 apresenta os resultados. Nota-se o seguinte comportamento da nuvem de partículas de minério. O contador 1, localizado no ponto mais acima e na

frente do fluxo, tem seu ápice de concentração ($602,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) quando a altura do empilhamento está em 1600 mm (altura máxima de empilhamento). Essa concentração decresce 27,95% na posição intermediária de 1200 mm e 35,35% na menor altura de 800 mm.

Esse resultado mostrou que apesar de ter uma redução de quase 28% da maior altura de empilhamento para a altura intermediária, quando comparado a altura média (1200 mm) com a menor altura (800 mm) percebe-se que a redução de 10,27% foi relativamente baixa. Isso mostra que a medição de concentração no ponto frontal da saída do transportador pode não possuir influência significativa da altura de queda. Alguns experimentos futuros, estudando outros fatores, devem ser desenvolvidos para elucidar melhor essa afirmação.

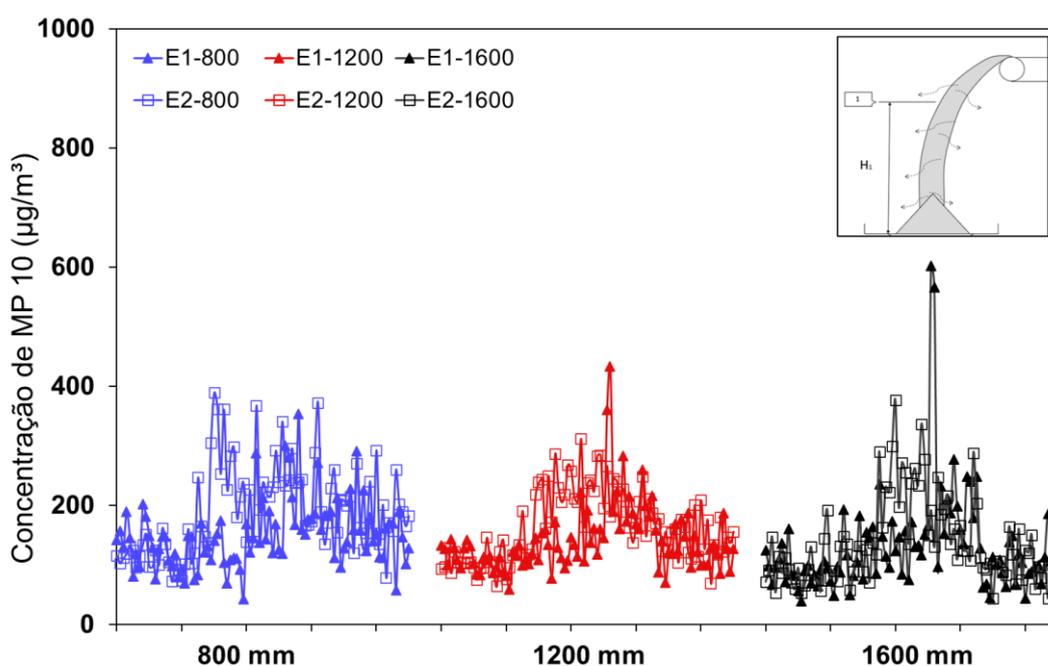


Figura 6.4 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Frontal a descarga do material particulado. Para $h=1600$ mm tem-se a maior emissão.

Para a medição de concentração de particulados pelo contador 2, localizado no ponto mais abaixo e na lateral do fluxo, a influência da altura de queda de material é mais perceptível. A Figura 6.5 mostra os resultados.

O ápice de emissão de poeira mediu-se na altura de 1600 mm ($3192,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Essa concentração reduz bruscamente quando comprada com a altura intermediária, cerca de 74% menor. Contudo, tal como foi observado para o contador na posição

frontal, quando se compara a concentração da posição intermediária de 1200 mm ($848,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$) com a concentração na menor altura ($710,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$) percebe-se que a diminuição não é significativa, cerca de 16%.

Portanto, os resultados dessa investigação mostram que a geração de poeira aumentou à medida que a altura de queda aumentou. Esse resultado é similar aos resultados apresentados por Azhar (2019), sendo que, as maiores concentrações foram obtidas pelo contador 2 (lateral). Entende-se esse comportamento como consequência ao impacto do minério com a bandeja de recebimento, o que causa a expulsão do ar retido no espaço intersticial do material em descarga.

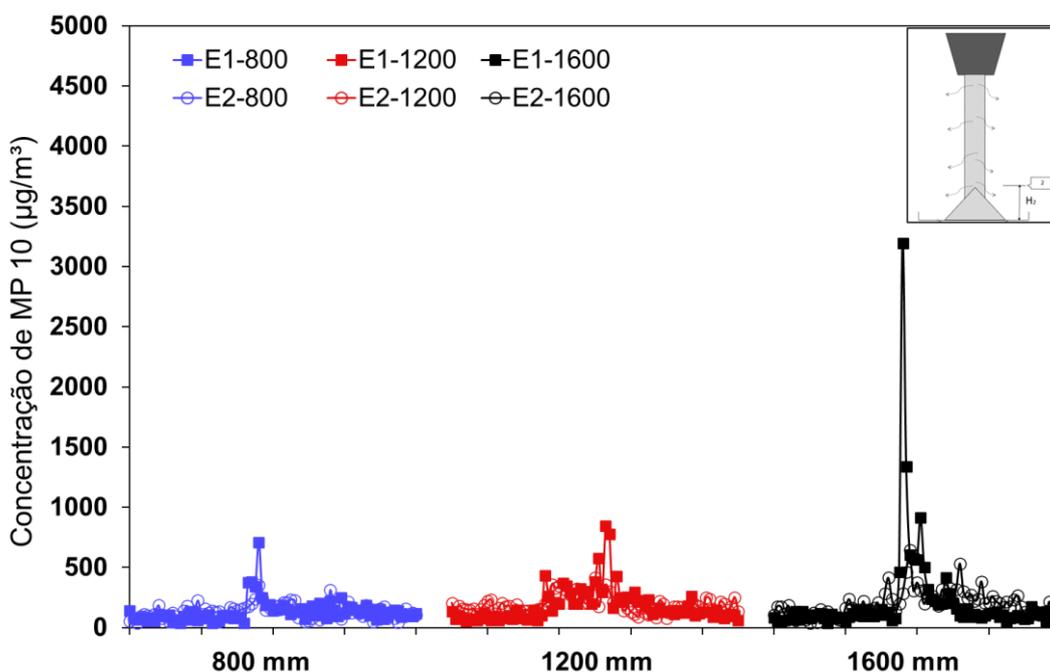


Figura 6.5 – Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Lateral a descarga do material particulado. Para $h=1600$ mm tem-se a maior emissão.

6.3. Ensaios variando a altura de empilhamento com spray (SF-B)

Devido ao fato do material anterior (SF-A), similar ao material SF-B, ser ensaiado a um teor de umidade 20% abaixo da umidade crítica (1,7%) e afim de avaliar a influência do spray como forma de controle de poeira, realizou-se ensaios utilizando o material *Sínter feed-B* a 1,69% de umidade (20% abaixo da umidade crítica determinada no ensaio de queda de material em tubo). Nos ensaios, variou-se

a altura de empilhamento (800 mm, 1200 mm e 1600 mm) e utilizou-se spray sobre a correia.

Nota-se o seguinte comportamento da nuvem de partículas de minério utilizando spray de água como forma de controle. O contador 1, localizado no ponto mais acima e na frente do fluxo, tem seu ápice de concentração ($320,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$) quando a altura do empilhamento está em 1600 mm (altura máxima de empilhamento). Essa concentração decresce 39,22% ($194,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$) na posição intermediária (1200 mm) e 59,35% ($130,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$) na menor altura (800 mm), conforme mostrado na Figura 6.6.

Esse resultado mostrou a influência da altura de queda na emissão de poeira mesmo com a utilização do spray. Para a menor altura de empilhamento (800 mm) houve uma redução de quase 60% na concentração, quando comparado a maior altura de queda (1600 mm). Isso pode ter acontecido pelo fato de o spray ter sido aplicado somente sobre a correia. Enquanto, a parte inferior do material não ter contato direto com o spray ocasionando uma ineficiência na umidificação, consequentemente, na maior altura de queda a poeira fina tende a se desprender em maior concentração quando comparado as demais alturas.

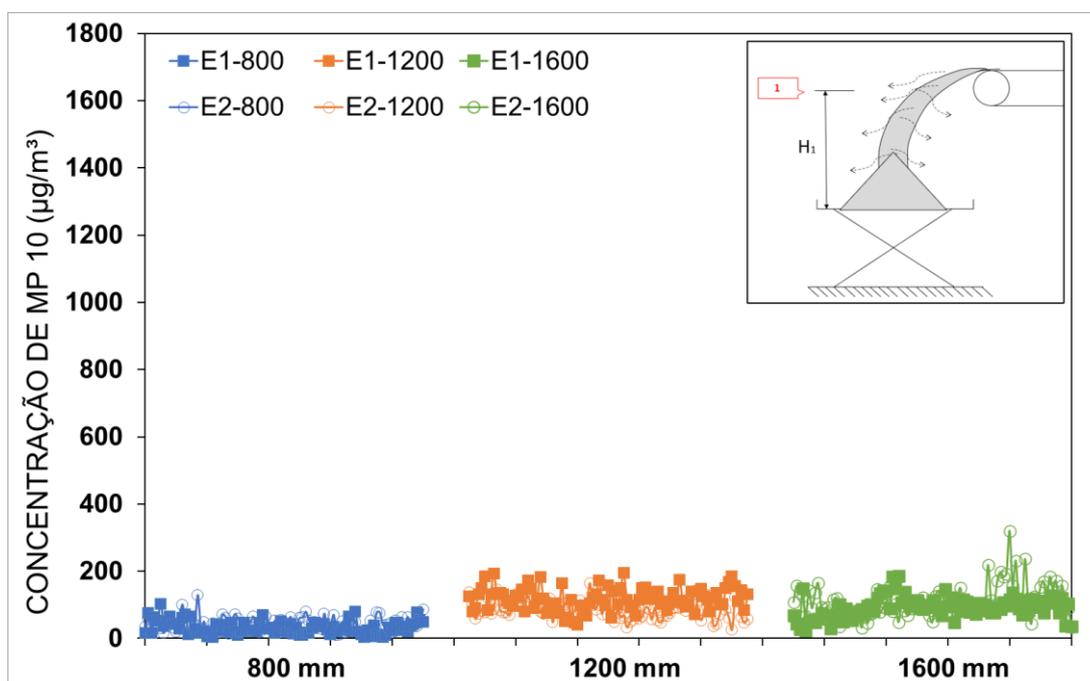


Figura 6.6 – Concentração de partículas MP10, medidas por um contador Frontal a descarga de material. Com spray. Para h=1600 mm tem-se a maior emissão.

A Figura 6.7 apresenta os resultados medidos pelo contador 2 (lateral a descarga do material). Os resultados reforçam o que foi discutido anteriormente. Para a maior altura de empilhamento obteve-se a maior concentração de poeira ($1075,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$), seguindo de $304,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para a altura intermediária (1200 mm) e a menor concentração de poeira para a altura de 800 mm ($220,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Observa-se que quando comparado com a concentração medida, a maior altura de empilhamento, pelo contador frontal ($320,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$) o resultado obtido pelo contador lateral ($1075,42 \mu\text{g}/\text{m}^3$) foi bem superior, devido aos processos de queda, colisão e impactação do fluxo de material com a superfície gerando mais poeira.

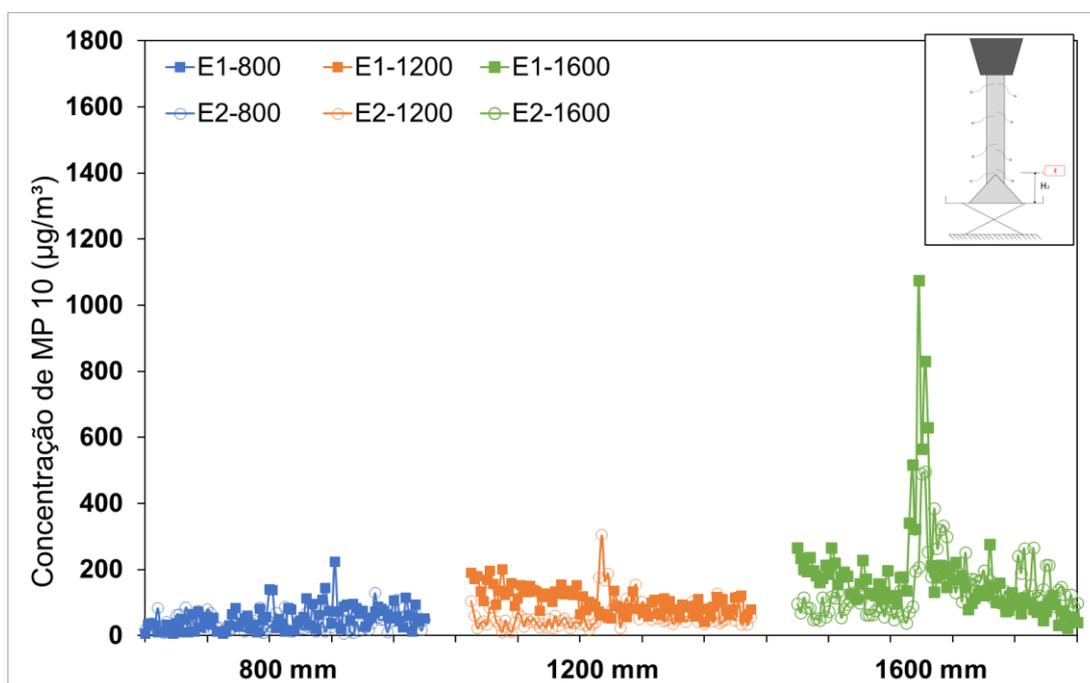


Figura 6.7 – Concentração de partículas MP10, medidas por um contador Lateral a descarga de material. Com spray. Para $h=1600$ mm tem-se a maior emissão.

6.4. Avaliação do uso de spray na contenção da poeira

Afim de avaliar o uso spray na prevenção (contenção) da poeira emitida para cada altura de empilhamento, utilizou-se o bico de spray localizado sobre a correia para umidificar o material, como forma de prevenir a emissão de poeira durante o empilhamento de minério.

Portanto, utilizou-se os resultados obtidos nos ensaios variando a altura de empilhamento sem spray discutido na Seção 5.3 para o *Sínter feed-A*, comparou-se

com os resultados apresentados na Seção 5.4 para o material *Sínter feed-B* com a utilização de spray. Avaliou-se a umidificação com spray como forma de controle de emissão de poeira para cada altura de empilhamento (800 mm, 1200 mm e 1600 mm) tanto para o contador 1 (frontal ao fluxo de material) como para o contador 2 (lateral ao fluxo de material), os resultados são apresentados e discutidos a seguir.

A Figura 6.8, apresenta os resultados de concentração de partículas, medidos pelo contador frontal ao fluxo de material, comparando sem e com o uso de spray sobre a correia, para as alturas de empilhamento de 800 mm, 1200 mm e 1600 mm, respectivamente.

Observa-se que para a menor altura de queda (800 mm) a concentração máxima medida antes do uso de spray foi de $389,26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e após a umidificação, obteve-se uma redução de poeira emitida de 66,53% ($130,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Para as demais alturas de empilhamento (1200 mm e 1600 mm), a diminuição da poeira emitida após o uso do spray ficou em torno de 50% (55,10% para a altura de 1200 mm e 46,77% para a altura de 1600 mm).

Os resultados mostram a eficácia do uso de spray como forma de controle de emissão de poeira, onde a aspersão sobre a correia faz com que as gotículas cobrem as partículas de minério, molhando-as e aumentando seu peso específico. Esse aumento do peso significa que, após o material sair da correia e entrar em queda livre, as partículas finas ficam menos propensas a se desprender do fluxo principal e ficam suspensas no ar.

Percebe-se também que a eficiência da aspersão reduz, à medida que aumenta a altura de empilhamento. Isso ocorre devido à distância de queda ser maior, consequentemente, o material leva mais tempo para chegar na superfície (mesa de empilhamento). Logo, fazendo com que mais partículas se desprendam do fluxo de material permanecendo suspensa no ar.

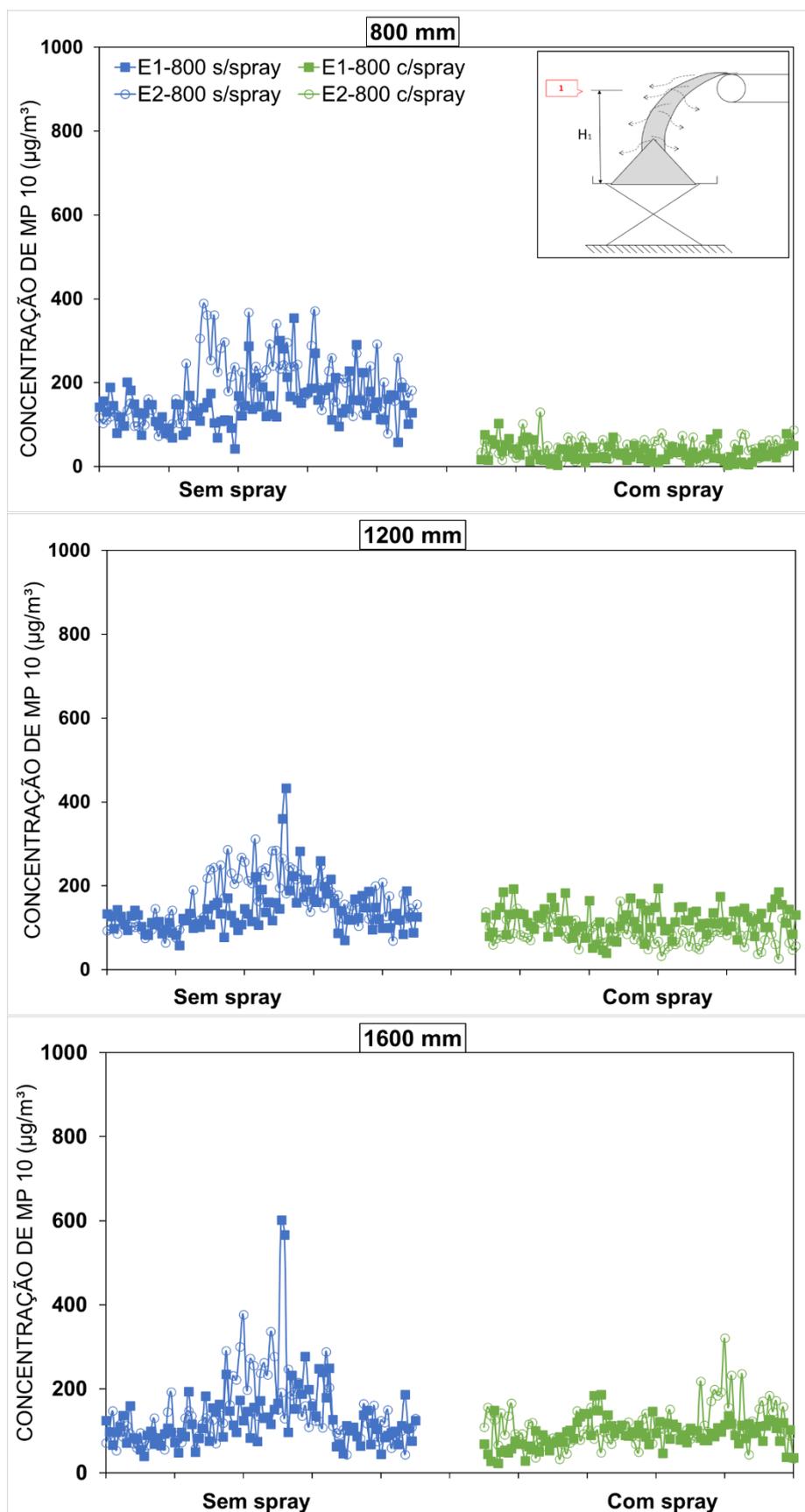


Figura 6.8 – Concentração de partículas MP10, sem e com spray, medidas por um contador Frontal a descarga do material. Material Sínter feed com 1,69% de umidade.

A Figura 6.9 apresenta os resultados de concentração de poeira para a altura de 800 mm (mínima), antes da utilização de spray e após a utilização de spray, medido pelo contador de partículas localizado na lateral da descarga de material. Os resultados mostram que antes da aspersão a concentração máxima medida foi de $710,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e após o uso do spray de água a concentração medida durante o impacto do material sobre a superfície foi de $222,18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, tendo então uma redução de quase 70% na concentração de partículas de poeira dispersa.

A Figura 6.9 apresenta os resultados de concentração de poeira para a altura de 1200 mm (média), antes da utilização de spray e após a utilização de spray, medido pelo contador de partículas localizado na lateral da descarga de material. Para a altura intermediária a minimização da concentração de poeira, após a aplicação do spray sobre o material, foi um pouco menor que a anterior cerca de 65% (concentração antes da aplicação foi de $848,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, após o uso do spray foi de $304,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

A Figura 6.9 apresenta os resultados de concentração de poeira para a maior altura de empilhamento de material (1600 mm), antes da utilização de spray e após a utilização de spray, medido pelo contador de partículas localizado na lateral. Para essa altura de queda de material, foi observado anteriormente que emitia a maior concentração de partículas ($3192,72 \mu\text{g}/\text{m}^3$) após a aspersão sobre o fluxo de material que passa pela correia, a concentração de poeira emitida reduziu 66,32%.

Ao comparar com a minimização de quase 70% na menor altura de empilhamento (800 mm), a redução da eficiência da aspersão tem influência não só apenas da umidificação que ocorre apenas na parte superior do material como também, pelo fato que a energia causada pelo impacto do material sobre a superfície de empilhamento é maior que a força de adesão das partículas que mantém as partículas finas aglomeradas, causando assim a separação do material aglomerado e conseqüentemente a poeira fica mais propensa a suspensão no ar.

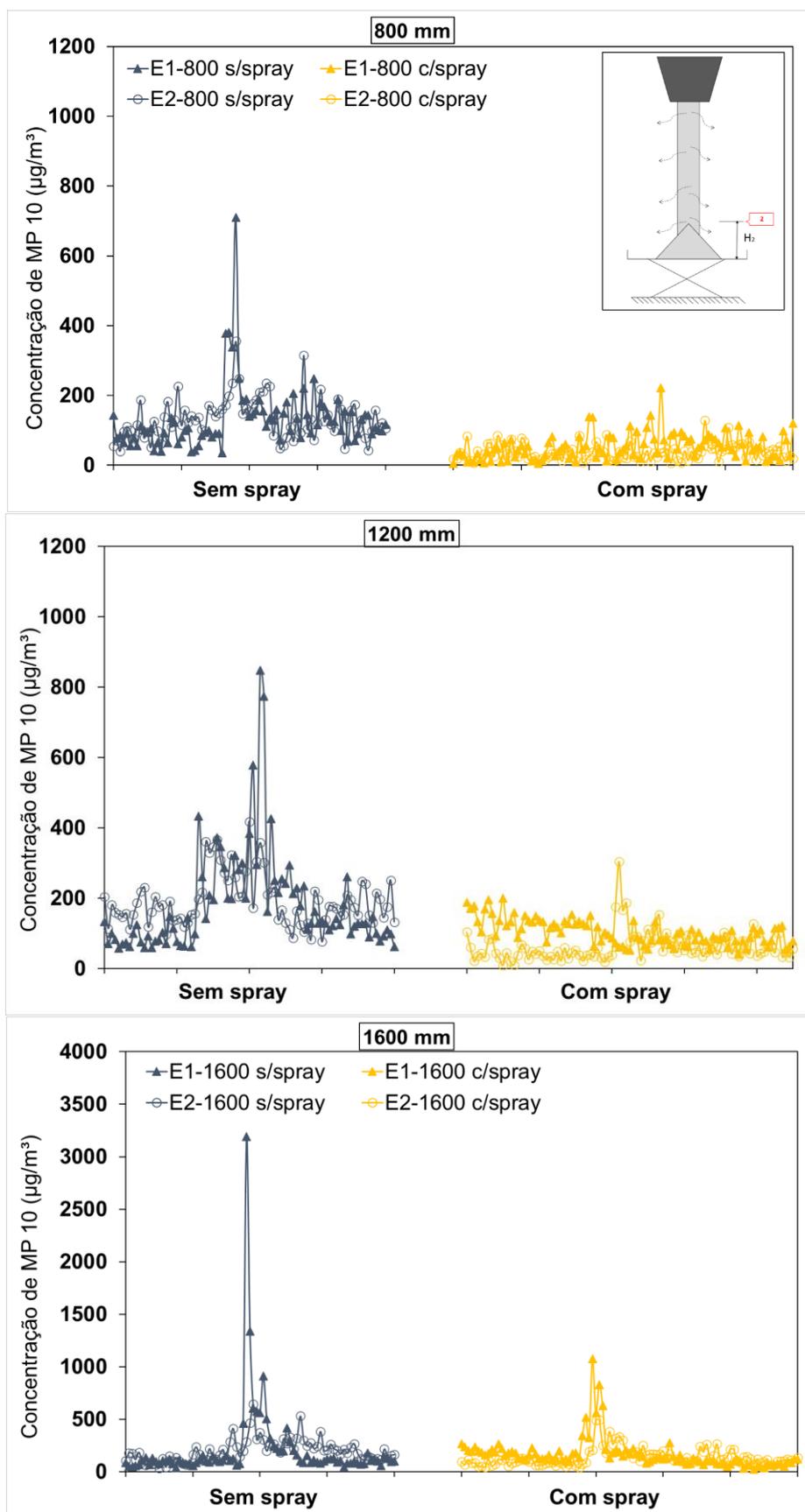


Figura 6.9 – Concentração de partículas MP10, sem e com spray, medidas por um contador Lateral a descarga do material. Material Sínter feed com 1,69% de umidade.

6.5. Influência da granulometria na emissão de poeira

Os resultados obtidos na caracterização do tamanho de partículas dos materiais *Pellet feed* (PF-A e PF-B) e *Sínter feed* (SF-A e SF-B) mostram que o PF possui uma distribuição granulométrica de tamanho de partículas menor quando comparado ao SF. Percebe-se tanto graficamente como foi mostrado na Seção de caracterização como através dos diâmetros equivalentes (D50). Isso mostra uma diferença significativa na distribuição granulométrica de ambos tipos de materiais.

Sendo assim, os resultados obtidos nos ensaios de Queda no Tubo para os materiais *Pellet feed* e *Sínter feed* (mina A), apresentados anteriormente, são comparados na Figura 6.10. Percebe-se que a umidade crítica medida para o PF foi de 4,69%. Para o material SF foi de 2,07%. Ou seja, o PF (menor granulometria) precisa de um teor de umidade maior, quando comparado com o SF (maior tamanho de partículas), para que valores de umidade (acima da umidade crítica) não seja significativa no desprendimento da poeira durante o manuseio do material.

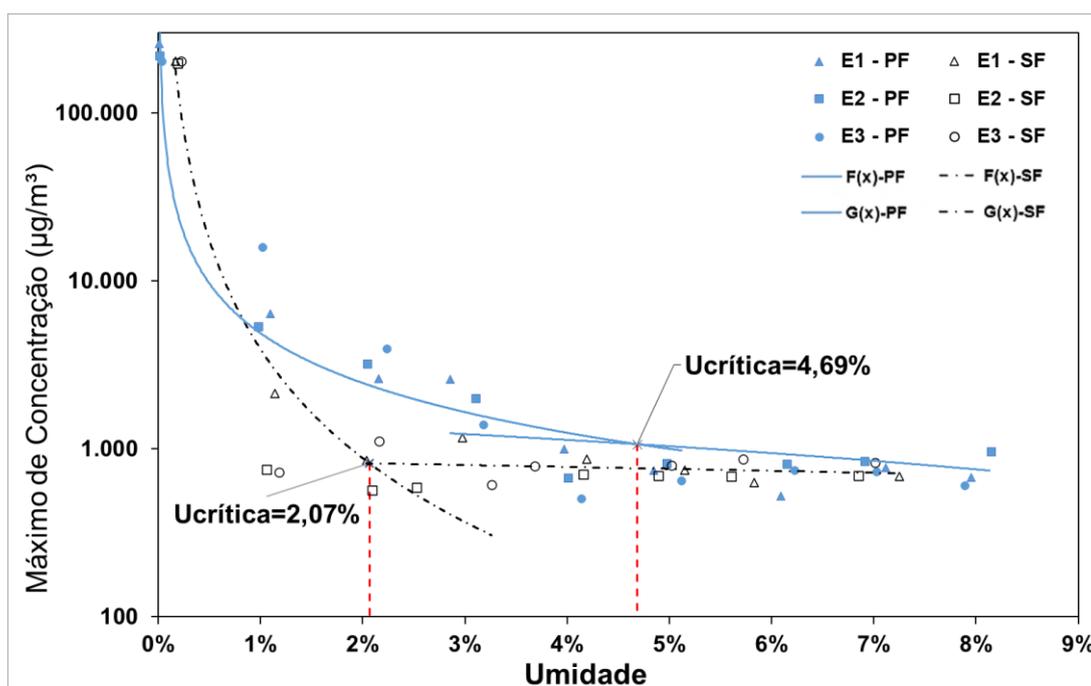


Figura 6.10 – Concentração máxima de partículas de tamanho MP10, medida no Teste de Queda para as amostras de *Pellet feed* e *Sínter feed* com o teor de umidade crescente. O material *Pellet feed* apresentou um teor de umidade maior.

Os resultados de concentração de partículas MP 10 obtidos nos ensaios de empilhamento, para o minério *Pellet feed-A* e *Sínter feed-A*, a altura de empilhamento

intermediário (1200 mm), são discutidos a seguir. A Figura 6.11 (painel superior) apresenta os resultados de comparação da concentração de partículas medidos pelo contador 1 (frontal). Para o contador frontal a descarga de material, observou-se que para o material *Pellet feed* (tamanho de partículas menor) apresentou uma maior concentração de poeira ($1037,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$) dispersa do fluxo principal na saída do transportador, quando comparado com a concentração de partículas ($433,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$) emitida nos ensaios do material *Sínter feed*.

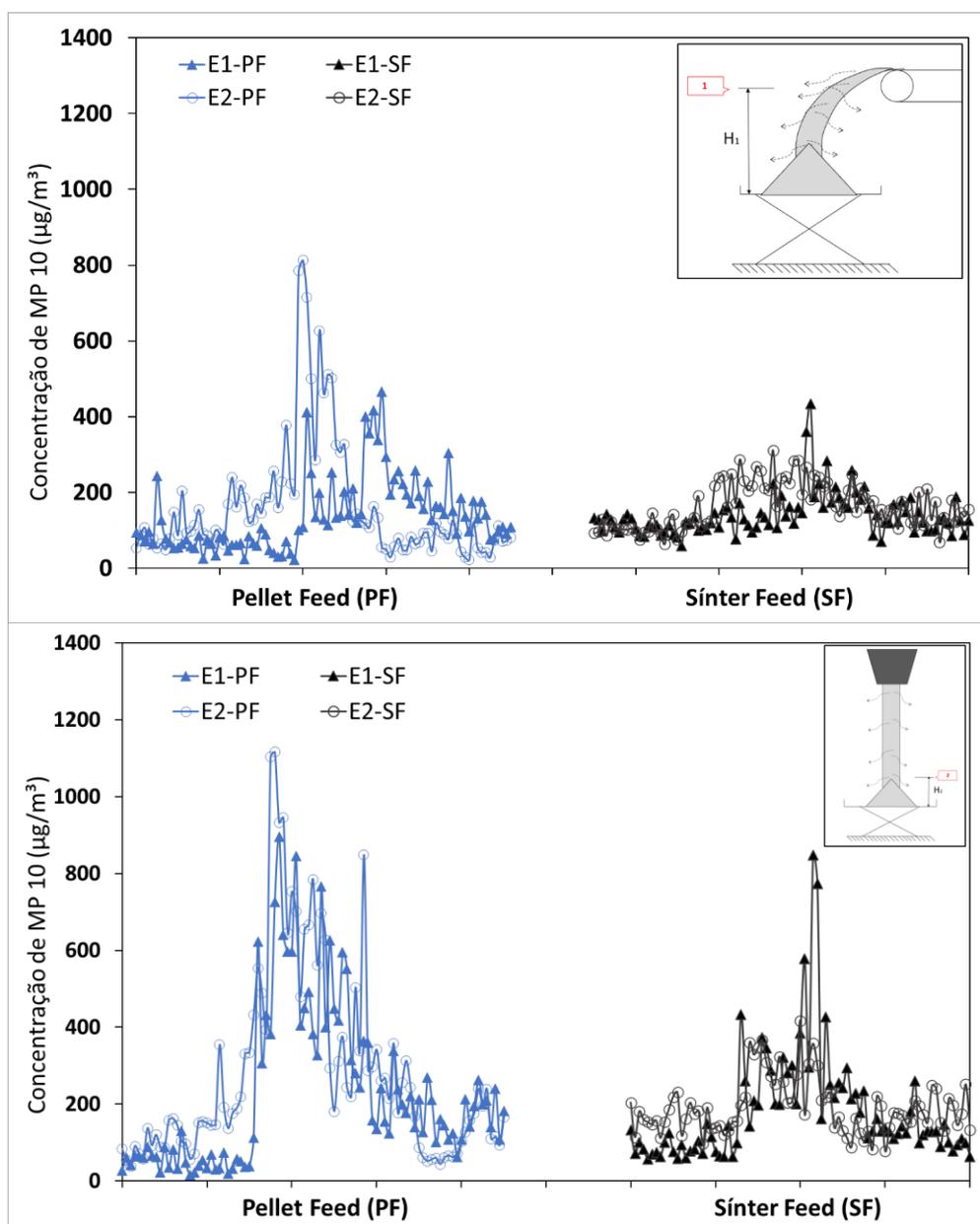


Figura 6.11 – Concentração de partículas MP 10, medidas por um contador frontal (painel superior) e um contador lateral (painel inferior).

Para as medições realizadas pelo contador 2 (lateral a descarga de material), observou-se comportamento similar ao medido pelo contador 1, porém com uma concentração maior. A Figura 6.11 (painel inferior) apresenta os resultados da concentração medida pelo contador lateral para ambos os materiais. Observa-se que o PF obteve uma concentração máxima de $1116,52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e o SF uma concentração menor de $848,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ficando evidente que por se tratar de um material de granulometria menor o *Pellet feed* tende a emitir maior concentração de particulados quando manuseado. Contudo, deve-se realizar mais experimentos para verificar a influência da porcentagem de finos (partículas muito finas suscetíveis à emissão), afim de obter resultados mais precisos.

7. CONCLUSÃO

A bancada de transportadores desenvolvido para os estudos relacionados a geração e controle de poeira de materiais particulados foi projetado, construído e testado. A metodologia proposta para a realização de experimentos de caracterização da poeira durante o empilhamento de minério em laboratório foi melhorada no decorrer no trabalho, e melhorada para se obter uma compreensão melhor do fenômeno estudado, por fim a metodologia foi satisfeita para obtenção dos resultados.

Os resultados dos experimentos para a caracterização dos pontos de medição de maior emissão forneceram a posição em que os contadores de partículas devem ser posicionados para uma melhor eficiência na medição, garantindo maior precisão nos resultados obtidos no estudo.

Os resultados mostraram ainda que, a poeira é gerada em dois pontos principais. Primeiro durante a saída do material da correia no ponto de transbordo do material onde as partículas finas, induzidas pelo ar circundante, se desprendem do fluxo principal e se envolve com o ar ambiente. O segundo ponto observa-se durante o impacto do fluxo de material sobre a superfície da pilha em formação, liberando particulados no ar aprisionado causando a emissão de poeira.

Os resultados dessa investigação mostram também, que a geração de poeira suspensa no ar aumentou à medida que a altura da queda aumentou, como também mostrou a eficiência do uso de spray como forma de controle na contenção da poeira, devido a aglomeração das partículas e o aumento do seu peso específico fazendo

com fiquem menos propensas a suspensão no ar. As propriedades do material, principalmente a distribuição granulométrica, afetaram significativamente as emissões de poeira para o ambiente, sendo maior para matérias mais finas (*pellet feed*) e necessitando de um teor de umidade mais elevado quando comparado a um material mais grosseiro (*sínter feed*).

Portanto, o laboratório permite realizar experimentos em modelo que podem ser relacionados de forma similar para resolução de problemas e desenvolvimento de novas técnicas em casos reais da indústria de materiais a granel. Além disso, o laboratório permite realizar experimentos relacionados a estudos: utilizando variados tipos de materiais a granel, fluxo de materiais em chutes de transferência entre correias, fluxo de materiais durante o processo de empilhamento, parâmetros associados a geração de partículas de poeira, aspersão via spray (prevenção e supressão) como forma de controle de particulados gerados durante o manuseio e transporte de materiais em transportadores de correia e aspectos associados a aspersão para melhorar a sua eficiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, JONATHAN O.; THUNDIYIL, JOSEF G.; STOLBACH, ANDREW. Clearing the air: a review of the effects of particulate matter air pollution on human health. **Journal of medical toxicology**, v. 8, n. 2, p. 166-175, 2012.

ANSART, Renaud; DE RYCK, Alain; DODDS, John A. Dust emission in powder handling: Free falling particle plume characterisation. **Chemical Engineering Journal**, v. 152, n. 2-3, p. 415-420, 2009.

AZHAR, NUR ANIS LIYANA; RANI, SITI ILYANI. Experimental study of airborne dust generation during powder free falling. In: **Proceedings of the International Conference on Islamic Civilization and Technology Management**. 2019. p. 24.

CARLI, Carla de. **Aplicação do método de opções reais no planejamento de pilhas de estoque na mineração**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

CHAVES, ARHUR PINTO. **Teoria e prática no tratamento de minérios**. Manuseio de Sólidos Granulados. São Paulo, SP. 1 ed, v. 5, p. 10-76, 2011.

CECALA, A. B., O'BRIEN, A. D., SCHALL, J, COLINET, J. F., FOX, W. R., FRANTA, R. J., Joy, J., REED, W. R., REESER, P. W., ROUNDS, J. R., SCHULTZ, M. J. **Dust control handbook for industrial minerals mining and processing**. Pittsburgh, PA: Department of health and human services, 1 ed, 314p. Bibliografia: p. 88-105. 2012.

CECALA, A. B., O'BRIEN, A. D., SCHALL, J, COLINET, J. F., FOX, W. R., FRANTA, R. J., Joy, J., REED, W. R., REESER, P. W., ROUNDS, J. R., SCHULTZ, M. J. **Dust control handbook for industrial minerals mining and processing**. Pittsburgh, PA: Department of health and human services, 2 ed, 406p. Bibliografia: p. 130-158. 2019.

COOPER, PAUL; ARNOLD, PETER. Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 13, p. 125-134, 1995.

COPELAND, C. R.; KAWATRA, S. K. Design of a dust tower for suppression of airborne particulates for iron making. **Minerals Engineering**, vol. 24, n. 13, p. 1459–1466, 2011.

ÇENGEL, YUNUS A.; CIMBALA, JOHN M. **Mecânica dos fluídos: Fundamentos e aplicações**, Porto Alegre: AMGH, 2012.

DOS ANJOS SANTOS, Alcinéa Meigikos. **O tamanho das partículas de poeira suspensas no ar dos ambientes de trabalho**. Fundacentro, 2001.

DOS SANTOS JUNIOR, RONALDO MENEZES. Procedimentos experimentais para avaliação da emissão de poeira em manuseio de minério. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2020.

EPA. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. NAAQS Table. Washington, D.C: EPA, 2020. Disponível em: <<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>>. Acesso em: 26 mar. 2022.

FARFEL, M. R., ORLOVA, A.O., LEES, P.S.J., ROHDE C., ASHLEY, P.J., CHILSON, J.J., A study of urban housing demolition as a source of lead in ambient dust on sidewalks, streets, and alleys. **Environmental Research** **99**, 204-213, 2005.

FONTANA, ARTHUR DOS REIS LEMOS. Desenvolvimento de um aparato experimental para a avaliação da emissão e de supressores de poeira em vagões e pilhas. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.

FORTES, Fabiana Fonseca; PEREIRA, Carlos Alberto. Manuseio, estocagem e qualidade do minério de ferro. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 9, n. 2, p. 117-122, 2013.

GUARANY, C. A. L. B. et al. Principais Métodos de Estocagem de Minério de Ferro: Uma Abordagem Teórica. **Perspectivas Online: Ciências exatas e engenharia**, v. 3 (6), p. 42–55, 2013.

IEMA. RELATÓRIO DA QUALIDADE DO AR NA GRANDE VITÓRIA. Qualidade do Ar. Cariacica, ES: **IEMA**, 2020. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/qualidadedoar/relatorios>>. Acesso em: 06 ago. 2021.

JULIÁ, ALEXANDRE FONT. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2010.

KLENK, Ulrich; PAREY, Matthias; SCHMIDT, Eberhard. Use of water droplets and additives for dust control. In: **Proceedings 11th World Filtration Congress**. 2012.

LEÃO R.X.A.; AMORIM L.S.; MARTINS M.F.; JUNIOR H.B.; SARCINELLI E.; MESQUITA A.L.A. **A model for velocity streamlines of airborne dust particles spreading caused by free-falling bulk materials**. Powder Technology, v.371, p.190-194. 2020.

LEÃO R.X.A.; AMORIM L.S.; MARTINS M.F.; JUNIOR H.B.; SARCINELLI E.; MESQUITA A.L.A. **Airborne flow dynamics near free-falling bulk materials: CFD analysis from analytical pressure field**. Powder Technology, v.385, Pages 1-11, 2021.

LIMA, LEANDRO FERREIRA BORBA. Cálculo de ar induzido pela queda livre de materiais granulares via CFD. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.

LIU, ZHIQIANG; NIE, WEN; PENG, HUITIAN; YANG, SHIBO; CHEN, DAWEI; LIU, QIANG. The effects of the spraying pressure and nozzle orifice diameter on the atomizing rules and dust suppression performances of an external spraying system in a fully-mechanized excavation face. **Powder Technology**, v. 350, p. 62-80, 2019.

LOUREIRO, LUCIANA NEVES. **Panorâmica sobre emissões atmosféricas estudo de caso: avaliação do inventário de emissões atmosféricas da região metropolitana do Rio de Janeiro para fontes móveis**. 2005. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

MACARINGUE, ARMANDO ALGUSTO. Determinação da umidade crítica em processos de emissão de poeira aplicados a minério de ferro e carvão. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2019.

- MEIRELES, Reinaldo P. L. **Modelagem e simulação de malha ferroviária em circuito fechado da estrada de ferro Vitória a Minas**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2010.
- MOHAL, B. R. **Enhancement of the wettability of coal powders using surfactants**. Tese (Doctor of Philosophy) - The Pennsylvania State University, Pennsylvania, 1988.
- NIOSH [2021]. Best practices for dust control in coal mining, second edition. By Colinet JF, Halldin CN, Schall J. Pittsburgh PA: U.S. **Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health**, DHHS (NIOSH) Publication No. 2021-119, IC 9532.
- OCHERI, Cyril et al. Bulk Raw Materials Handling and Blending Techniques of Sinter Plant: A Case Study of Ajaokuta Steel Company Limited, Kogi State, Nigeria. **Journal of Metallic Material Research| Volume**, v. 3, n. 02, 2020.
- PIQUET, C. V. **Desenvolvimento de um laboratório de transportadores de correia em escala**. Universidade Federal do Pará. ITEC, Belém-PA, 2015.
- PLANNER, J. A sustainable approach to manage dust emission during handling and transport of coal and iron ore. In: CASANZ Conference, 2011, Auckland, **Proceedings [Paper 203]**. New Zealand, 2011.
- ROBERTS, J. M.; WYPYCH, P. M. **Research into Improving the Efficiency of Water Spraying Airborne Dust Control Techniques in the Iron Ore Industry**. Perth. 0, 2017.
- SILVA, ARTUR JOSÉ CUNHA DA. Desenvolvimento de um túnel para secagem e emissão de minério em condições ambientais controladas. 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.
- SPRAYING SYSTEMS CO. Soluções criativas que eliminam o seu problema de poluição. **Especialistas em tecnologia de pulverização**. 2020.
- TEMPO NOVO. Relatório apontam aumento do pó no ar da Grande Vitória. Jornal da Serra, Espírito Santo, 30 de julho de 2020. Disponível em: <<https://www.portaltenponovo.com.br/relatoriosapontamadoponoar-da-grande-vitoria/>>. Acesso em: 06 ago. 2021.
- TIEN, J. C.; KIM, J. Respirable Coal Dust Control Using Surfactants. **Applied Occupational and Environmental Hygiene**, v. 12, n. 12, p. 957-963, 1997. DOI: 10.1080/1047322X.1997.10390635.
- VALLACK H. W., SHILLITO, D. E. Suggested guidelines for deposited ambient dust. **Atmospheric Environment**, vol. 32(16), p. 2737-2744, 1998.
- WANGCHAI, S., HASTIE, D. B., WYPYCH, P. W. **The simulation of particle flow mechanisms in dustiness testes**: 11th International Congress on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation. The University of Newcastle, 2013.
- WYPYCH, PETER; COOK, DAVE; COOPER, PAUL. Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 2, p. 323-326, 2005.
- XIAOCHUAN, Li et al. Developments in studies of air entrained by falling bulk materials. **Powder Technology**, v. 291, p. 159-169, 2016.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo

Faz-se a aplicação do teorema π de Buckingham para analisar-se um escoamento de partículas uma correia de transferência. Sabe-se que as forças do escoamento dependem de:

- Taxa de fluxo de massa (\dot{m});
- Densidade (ρ);
- Aceleração da gravidade (g);
- Diâmetro da partícula (D);
- Comprimento característico (l);
- Velocidade da correia (v);
- Ângulo de repouso (α);
- Fator de forma da partícula (S_f);

Assim, tem-se:

$$F = f(\rho, g, D, l, v, S_f, \dot{m}, \alpha) \quad n = 8 \quad (1)$$

As grandezas analisadas têm as seguintes dimensões primárias (m=massa, L=comprimento e t=tempo):

- Taxa de fluxo de massa (\dot{m}) – $[m^1L^0t^{-1}]$
- Densidade (ρ) – $[m^1L^{-3}t^0]$
- Aceleração da gravidade (g) – $[m^0L^1t^{-2}]$
- Diâmetro da partícula (D) – $[m^0L^1t^0]$
- Comprimento característico (l) – $[m^0L^1t^0]$
- Velocidade da correia (v) – $[m^0L^1t^{-1}]$
- Ângulo de repouso (α) – $[m^0L^0t^0]$
- Fator de forma da partícula (S_f) – $[m^0L^0t^0]$

Observando-se as dimensões das variáveis, define-se o sistema de grandezas fundamentais. Assim, $j = 3$. Reescrevendo a equação (1):

$$0 = f(\rho, g, D, l, v, S_f, \dot{m}, \alpha) \quad (2)$$

Escolhe-se a densidade, comprimento característico e a velocidade da correia como grupo de parâmetros. Como o fator de forma (S_f) e o ângulo de repouso (α) já são grandezas adimensionais estes já são um número π por si mesmos π_1 e π_2 , respectivamente, logo se define três grupos π para análise:

$$\pi_3 = \rho^a v^b l^c D \quad (3)$$

$$\pi_4 = \rho^d v^e l^f g \quad (4)$$

$$\pi_5 = \rho^g v^h l^i \dot{m} \quad (5)$$

Então, faz-se a análise dimensional das três equações anteriores, chegando às equações acima.

$$[m^0L^0t^0] = [m^aL^{-3a}t^0] \cdot [m^0L^b t^{-b}] \cdot [m^0L^c t^0] \cdot [m^0L^1t^0] \quad (6)$$

$$[m^0L^0t^0] = [m^dL^{-3d}t^0] \cdot [m^0L^e t^{-e}] \cdot [m^0L^f t^0] \cdot [m^0L^1t^{-2}] \quad (7)$$

$$[m^0L^0t^0] = [m^gL^{-3g}t^0] \cdot [m^0L^h t^{-h}] \cdot [m^0L^i t^0] \cdot [m^1L^0t^{-1}] \quad (8)$$

Assim, para cada equação, faz-se a análise de cada grandeza fundamental separadamente, chegando-se a 3 equações para cada equação anterior:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Massa:} \\ \text{Comprimento:} \\ \text{Tempo:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = a \\ 0 = -3a + b + c + 1 \\ 0 = -b \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} a = 0 \\ b = 0 \\ c = -1 \end{array} \right\} \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Massa:} \\ \text{Comprimento:} \\ \text{Tempo:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = d \\ 0 = -3d + e + f + 1 \\ 0 = -e - 2 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} d = 0 \\ e = -2 \\ f = 1 \end{array} \right\} \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Massa:} \\ \text{Comprimento:} \\ \text{Tempo:} \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = g + 1 \\ 0 = -3g + h + i \\ 0 = -h - 1 \end{array} \quad \left. \begin{array}{l} g = -1 \\ h = -1 \\ i = -2 \end{array} \right\} \quad (11)$$

Resolvendo as nove equações, e substituindo os resultados para determinar os grupos adimensionais, tem-se

$$\pi_3 = \rho^0 v^0 l^{-1} D \quad (12)$$

$$\pi_4 = \rho^0 v^{-2} l^1 g \quad (14)$$

$$\pi_5 = \rho^{-1} v^{-1} l^{-2} \dot{m} \quad (15)$$

Obtém-se:

$$\pi_1 = S_f \quad (16)$$

$$\pi_2 = \alpha \quad (17)$$

$$\pi_3 = \frac{D}{l} \quad (18)$$

$$\pi_4 = \frac{lg}{v^2} = \left(\frac{lg}{v^2}\right)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} = \frac{v}{\sqrt{lg}}, \text{Número de Froude} \quad (19)$$

$$\pi_5 = \frac{\dot{m}}{\rho v l^2} \quad (20)$$

Usa-se a relação da vazão volumétrica que é dada por:

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (21)$$

Assim, pode-se escrever este último grupo equação (20) como o número de capacidade:

$$C = \frac{Q}{v l^2} \quad (22)$$

O número de Froude, que aparece em toda a literatura sobre o fluxo granular, expressa a relação entre as forças inerciais e gravitacionais. Para escoamento não coesivo a similaridade recai no emprego do número de Froude, e considerando que para um sistema de transferência de um material granular inicialmente em repouso a uma altura l , tem-se que

$$v = \sqrt{2gl} \quad (23)$$

Substituindo esta expressão na equação (19), tem-se

$$Fr = \frac{\sqrt{2gl}}{\sqrt{lg}} \quad (24)$$

$$Fr = \left(\frac{\sqrt{2gl}}{\sqrt{lg}}\right)_M = \left(\frac{\sqrt{2gl}}{\sqrt{lg}}\right)_P \quad (25)$$

$$\frac{\sqrt{2gl_M}}{\sqrt{l_Mg}} = \frac{\sqrt{2gl_P}}{\sqrt{l_Pg}} \quad (26)$$

$$\frac{\sqrt{2gl_M}}{\sqrt{l_Mg}} = \frac{\sqrt{2gl_P}}{\sqrt{l_Pg}} \quad (27)$$

$$\frac{(2gl_M)^{1/2}}{(l_Mg)^{1/2}} = \frac{(2gl_P)^{1/2}}{(l_Pg)^{1/2}} \quad (28)$$

$$\frac{(2gl_M)^{1/2}}{(2gl_P)^{1/2}} = \frac{(l_Mg)^{1/2}}{(l_Pg)^{1/2}} \quad (29)$$

$$\frac{(l_M)^{1/2}}{(l_P)^{1/2}} = \frac{(l_M)^{1/2}}{(l_P)^{1/2}} \quad (30)$$

$$\frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} = \frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} \quad (31)$$

$$\sqrt{\frac{l_M}{l_P}} = \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \quad (32)$$

$$\left(\sqrt{\frac{l_M}{l_P}}\right)^2 = \left(\sqrt{\frac{l_M}{l_P}}\right)^2 \quad (33)$$

$$\frac{l_M}{l_P} = \frac{l_M}{l_P} \quad (34)$$

$$\frac{l_P}{l_M} = \frac{l_P}{l_M} \quad (35)$$

$$\boxed{\frac{l_P}{l_M} = \lambda} \quad (36)$$

Com isso pode-se fazer uso das duas equações adimensionais muito importantes, no caso Número de Froude que representa a razão entre as forças de inércia sobre força gravitacional equação (19) e o Número Capacidade que é a razão entre a vazão volumétrica sobre a velocidade pela secção de área da correia equação (22), fazendo a devida igualdade do protótipo para o modelo em escala, pode-se tirar informações importantes para similaridade do escoamento real com relação ao modelo em escala, apenas usando artifícios matemáticos pra isolar dados importantes, como velocidade do modelo (v_M) equação (26):

$$Fr = \left(\frac{v}{\sqrt{lg}} \right)_M = \left(\frac{v}{\sqrt{lg}} \right)_P \quad (37)$$

$$Fr = \frac{v_M}{\sqrt{l_M}} = \frac{v_P}{\sqrt{l_P}} \quad (38)$$

$$v_M = \frac{v_P}{\sqrt{l_P}} \cdot \sqrt{l_M} = v_P \cdot \frac{\sqrt{l_M}}{\sqrt{l_P}} = v_P \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \quad (39)$$

$$\boxed{v_M = v_P \sqrt{\frac{1}{\lambda}}} \quad (40)$$

Fazendo o mesmo com a equação (22) do Número Capacidade e substituindo a equação anterior, determina-se a vazão volumétrica do modelo (Q_M) equação (29).

$$C = \left(\frac{Q}{vl^2} \right)_M = \left(\frac{Q}{vl^2} \right)_P \quad (41)$$

$$\left(\frac{Q_M}{v_M l_M^2} \right) = \left(\frac{Q_P}{v_P l_P^2} \right) \quad (42)$$

$$Q_M = \frac{Q_P}{v_P l_P^2} \cdot v_M l_M^2 \quad (43)$$

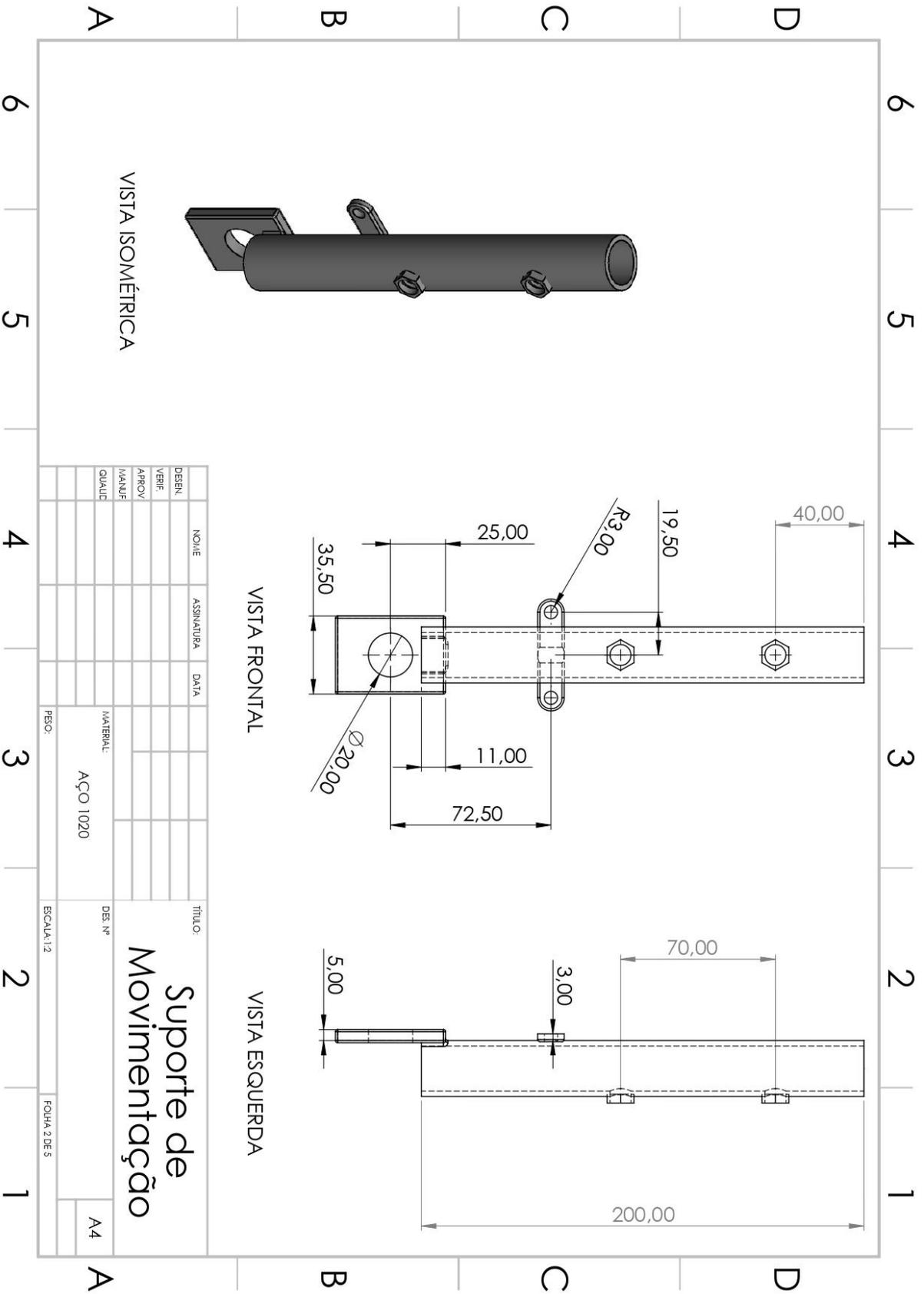
Substituindo na Equação (43), v_M pela equação (40), tem-se:

$$Q_M = \frac{Q_P}{v_P l_P^2} \cdot v_P \cdot \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} \cdot l_M^2 = \frac{Q_P}{v_P l_P^2} \cdot v_P \cdot \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{1/2} \cdot l_M^2 \quad (44)$$

$$Q_M = \frac{Q_P}{l_P^2} \cdot \frac{l_M^{1/2}}{l_P^{1/2}} \cdot l_M^2 = Q_P \cdot \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{1/2} \cdot \frac{l_M^2}{l_P^2} \quad (45)$$

$$Q_M = Q_P \cdot \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^2 \quad (46)$$

$$\boxed{Q_M = Q_P \cdot \left(\frac{l_M}{l_P} \right)^{5/2} = \frac{Q_P}{\lambda^{5/2}}} \quad (47)$$



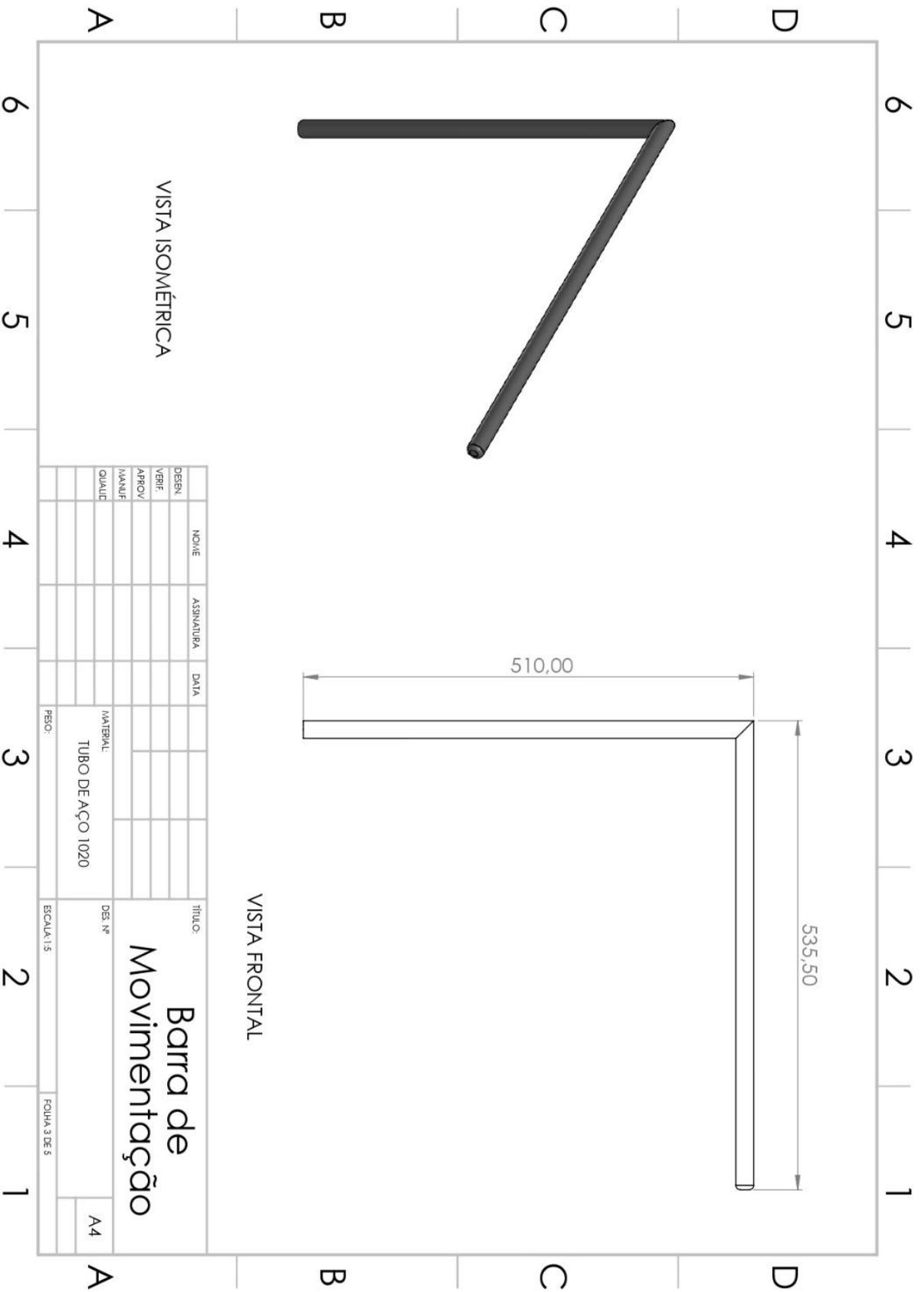
VISTA ISOMÉTRICA

VISTA FRONTAL

VISTA ESQUERDA

DESENH. VERIF.	NOOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:
APROV. MANUF. QUALIC				Suporte de Movimentação
				DES. Nº
				MATERIAL:
				AÇO 1020
				PEBO:
				ESCALA: 1:2
				FOLHA 2 DE 5

A4

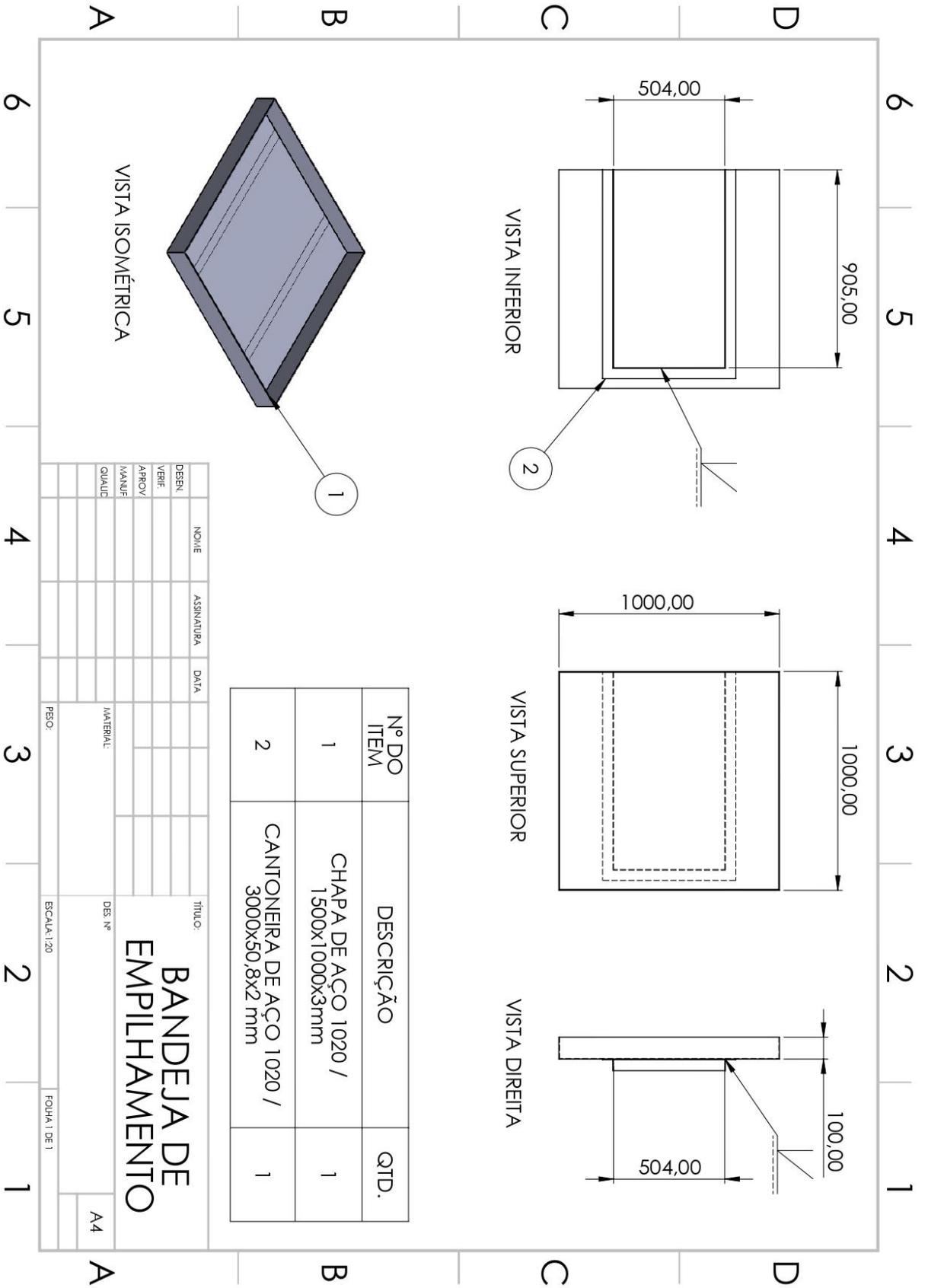


VISTA ISOMÉTRICA

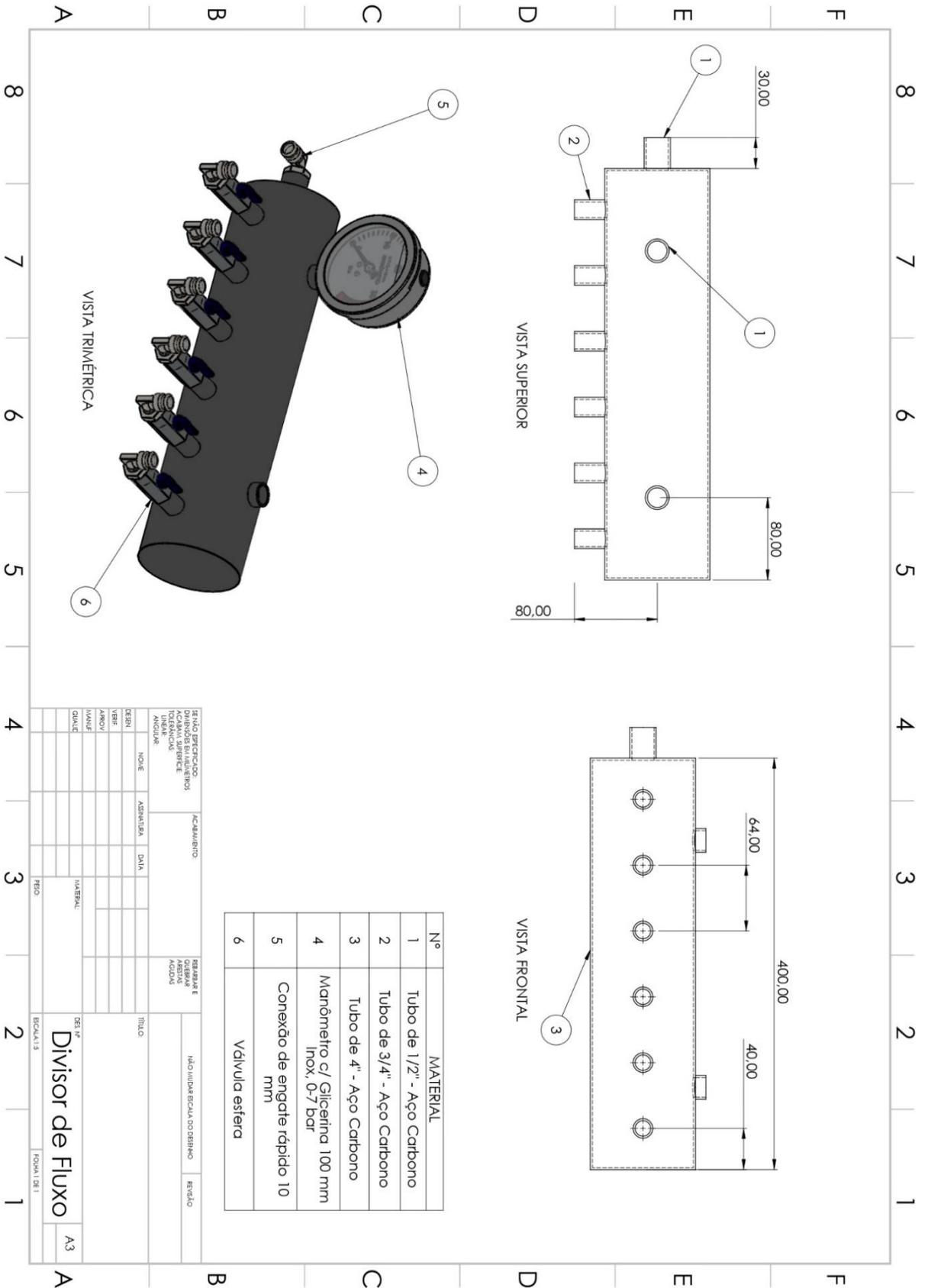
VISTA FRONTAL

DESIGN	VERIF.	APROV.	MANUF.	QUALID.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO
								Barra de Movimentação
MATERIAL: TUBO DE AÇO 1020								DES. Nº
PROJ: ESCALA: 1:5								FOLHA 3 DE 5
								A4

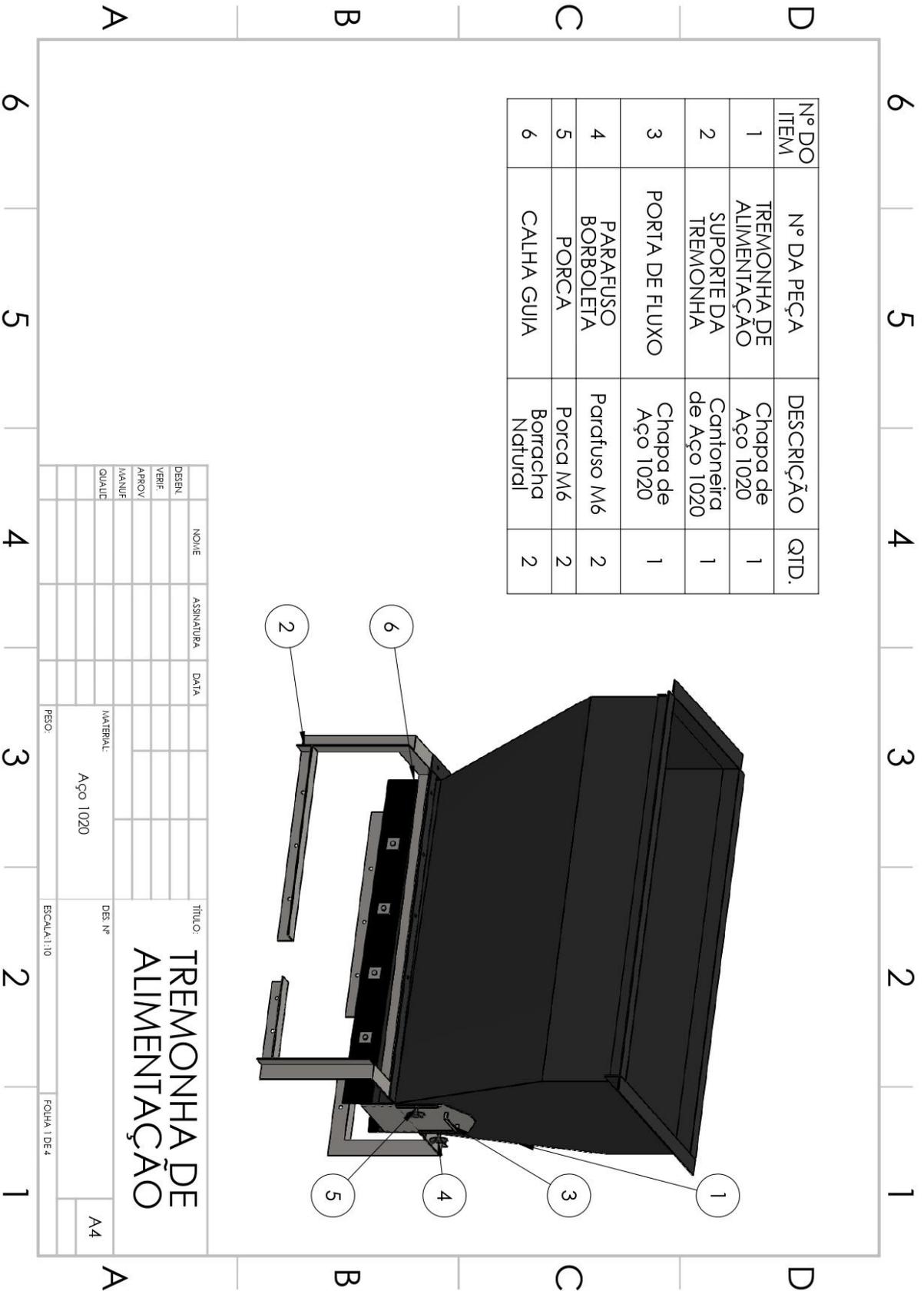
APÊNDICE C – Projeto da bandeja de empilhamento

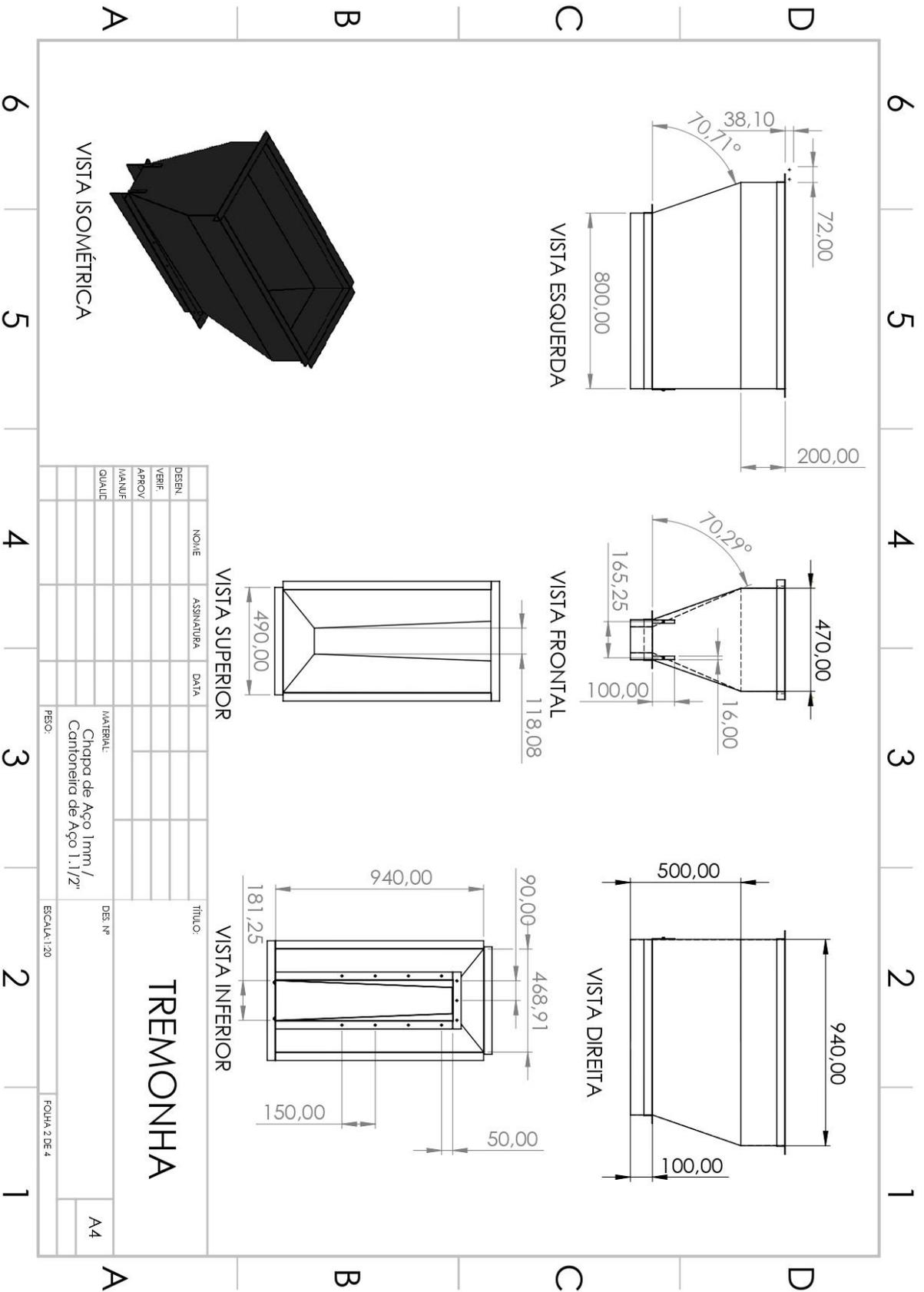


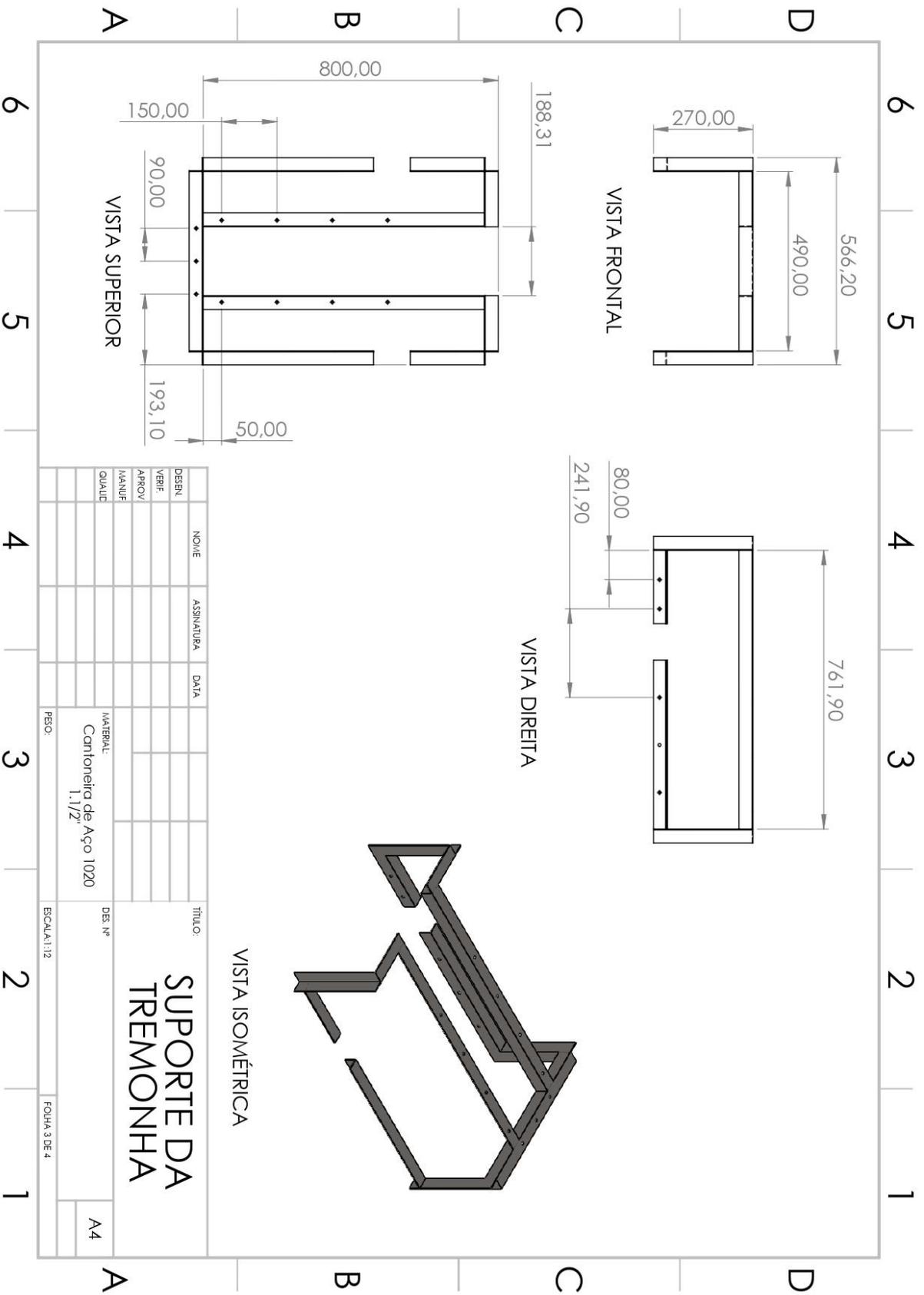
APÊNDICE D – Projeto do divisor de fluxo de água

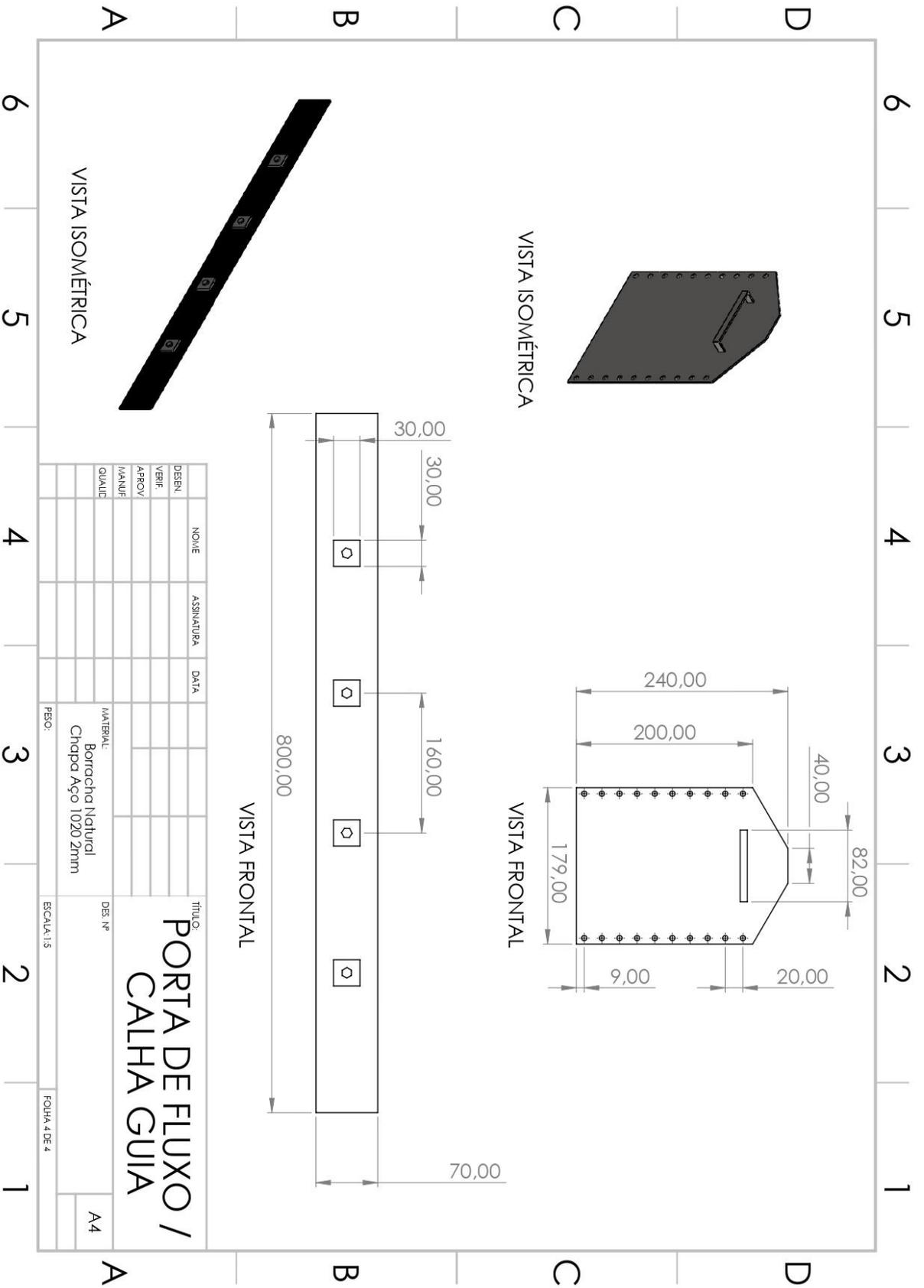


APÊNDICE E – Projeto do sistema de alimentação da correia









VISTA ISOMÉTRICA

VISTA ISOMÉTRICA

VISTA FRONTAL

VISTA FRONTAL

DESENH. VERIF.	APROV.	MANUF.	QUALID.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO
							PORTA DE FLUXO / CALHA GUIA
							DES. Nº
							MATERIAL
							Borracha Natural
							Chapa Aço 1020 2mm
							PEBO:
							ESCALA: 1:15
							FOLHA 4 DE 4

A4

ANEXO A – Câmera fotográfica Canon EOS Rebel T5



PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

Perfeita para famílias e pessoas que estão em busca da sua primeira câmera profissional.

A EOS Rebel T5 permite fotografar e filmar com qualidade profissional de forma muito fácil. Ela vem com um sensor CMOS (APS-C) de 18,0 Megapixels e um processador de imagem próprio da Canon, o DIGIC 4, que vai produzir fotos ricas em detalhes, além de oferecer ótimo desempenho na gravação de vídeos em alta definição. Uma grande tela LCD de 3,0" facilita a visualização das imagens, principalmente durante a gravação de vídeos. Outras características, como por exemplo, 63 zonas de medição, sistema de medição de dupla camada, ampla faixa de ISO para fotos com pouca luz, modos de disparo com pré-configurações que facilitam na hora de fotografar, como Cena Inteligente Automática, Criativo Automático, a função Basic+ e o Guia de Recursos, fazem da EOS Rebel T5 uma câmera para qualquer momento.

Seu corpo leve e detalhes de acabamento também remetem à alta qualidade de câmeras mais avançadas, tornando-a ainda mais atraente.

ANEXO B – Mesa hidráulica pantográfica 500 kg Worker



APLICAÇÕES

Indicada para elevação de peças pesadas e cargas para montagem.

Código	976466	976474
Capacidade	300 kg	500 kg
Rodas "poliuretano" (d)	127 mm x 35 mm	127 mm x 35 mm
Elevação (h3)	560 mm	560 mm
Altura total (h14)	970 mm	970 mm
Altura mínima (h13)	340 mm	340 mm
Comprimento (l1)	925 mm	925 mm
Dimensões da mesa (l/b5/s)	855 mm x 500 mm x 50 mm	855 mm x 500 mm x 50 mm
Altura total (h12)	900 mm	900 mm
Altura de trabalho c/ mesa travada	840 mm	840 mm

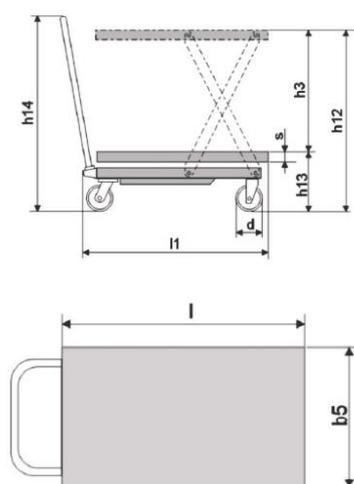


Imagem meramente ilustrativa.

S. Meller
Sandro Meller
Responsável Técnico

Fabricado na China, importado e distribuído por:
Ferragens Negrão Comercial LTDA CNPJ 76.639.285/0001-77
Rua Professor Algacyr Munhoz Mader, 2800
CEP 81310020 Curitiba - PR - Brasil
Telefone (41) 2109 8005 - www.worker.com.br

ANEXO C – Bico de spray atomização fina

FINE
SPRAY
HYDRAULIC ATOMIZING NOZZLES

S
STANDARD ANGLE SPRAY

S
PERFORMANCE DATA:
STANDARD ANGLE SPRAY


Inlet Conn. (in.)	Nozzle Type							Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (mm)	Core No.	Flow Rate Capacity (liters per hour)										Spray Angle (°)		
	LN	LNN	LND	LNND	N	NN	M				2 bar	3 bar	4 bar	7 bar	15 bar	20 bar	35 bar	45 bar	80 bar	3 bar	6 bar	20 bar	
1/4	•	•						.30	.41	106	–	–	–	–	–	3.1	4.0	4.6	6.1	–	–	51	
	•	•						.40	.41	108	–	–	–	–	–	4.1	5.4	6.1	8.2	–	–	58	
	•							.50	.41	109	–	–	–	–	4.4	5.1	6.7	7.6	10.2	–	–	63	
	•	•	•	•	•	•	•	.60	.41	206	–	–	–	3.6	5.3	6.1	8.1	9.2	12.2	–	35	65	
	•	•	•	•	•	•	•	1	.51	210	–	3.9	4.6	6.0	8.8	10.2	13.5	15.3	20	45	62	72	
	•	•	•	•	•	•	•	1.5	.51	216	4.8	5.9	6.8	9.0	13.2	15.3	20	23	31	65	70	72	
	•	•	•	•	•	•	•	2	.71	216	6.4	7.9	9.1	12.1	17.7	20	27	31	41	70	75	77	
	•	•	•	•	•	•	•	3	.71	220	9.7	11.8	13.7	18.1	26	31	40	46	61	65	70	73	
	•	•	•	•	•	•	•	4	1.1	220	12.9	15.8	18.2	24	35	41	54	61	82	72	81	84	
	•	•	•	•	•	•	•	6	1.1	225	19.3	24	27	36	53	61	81	92	122	73	79	81	
	•	•	•	•	•	•	•	8	1.5	225	26	32	36	48	71	82	108	122	163	85	89	91	
	•	•	•	•	•	•	•	10	1.6	420	32	39	46	60	88	102	135	153	204	82	84	86	
	•	•	•	•	•	•	•	12	1.9	420	39	47	55	72	106	122	162	183	245	78	82	85	
	•	•	•	•	•	•	•	14	1.9	421	45	55	64	84	124	143	189	214	285	85	88	90	
					•	•		16	2.2	421	52	63	73	96	141	163	216	245	326	83	86	88	
	•	•	•	•	•	•	•	18	1.9	422	58	71	82	109	159	183	243	275	367	81	84	86	
	•						•	20	2.1	422	64	79	91	121	177	204	270	306	408	75	78	80	
	•	•	•	•	•	•	•	22	1.9	625	71	87	100	133	194	224	297	336	449	70	72	75	
•	•	•	•	•	•	•	26	2.2	625	84	103	119	157	230	265	351	398	530	73	74	77		

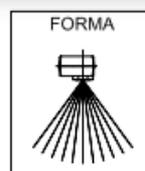
Maximum operating pressure depends on material and application. Contact your sales engineer for details.
Highlighted column shows the rated pressure.

ANEXO D – Bico de spray cone oco



FLUIDJET®

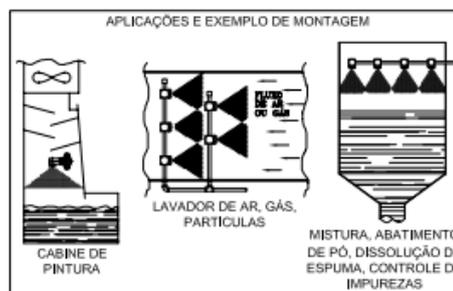
FL-2 BICO SPRAY - CONE OCO



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- SPRAY TIPO CONE OCO COM JATOS E ÂNGULOS VARIÁVEIS
- TAMPO REMOVÍVEL PARA FACILIDADE DE LIMPEZA
- TEMPERATURA MÁXIMA COMPORTÁVEL
LATÃO = 180°C
INOX = 400°C A 500°C
- ROSCA BSP / NPT FÊMEA / MACHO
- MODELO COM DISTRIBUIÇÃO UNIFORME
- PROJETADO PARA UMA EXCEPCIONAL RESISTÊNCIA AO DESGASTE
- MATERIAIS: LATÃO, INOX, BRONZE, ALUMÍNIO, PVC, NYLON, TEFLON, COBRE

Fabricamos com outras especificações sob consulta

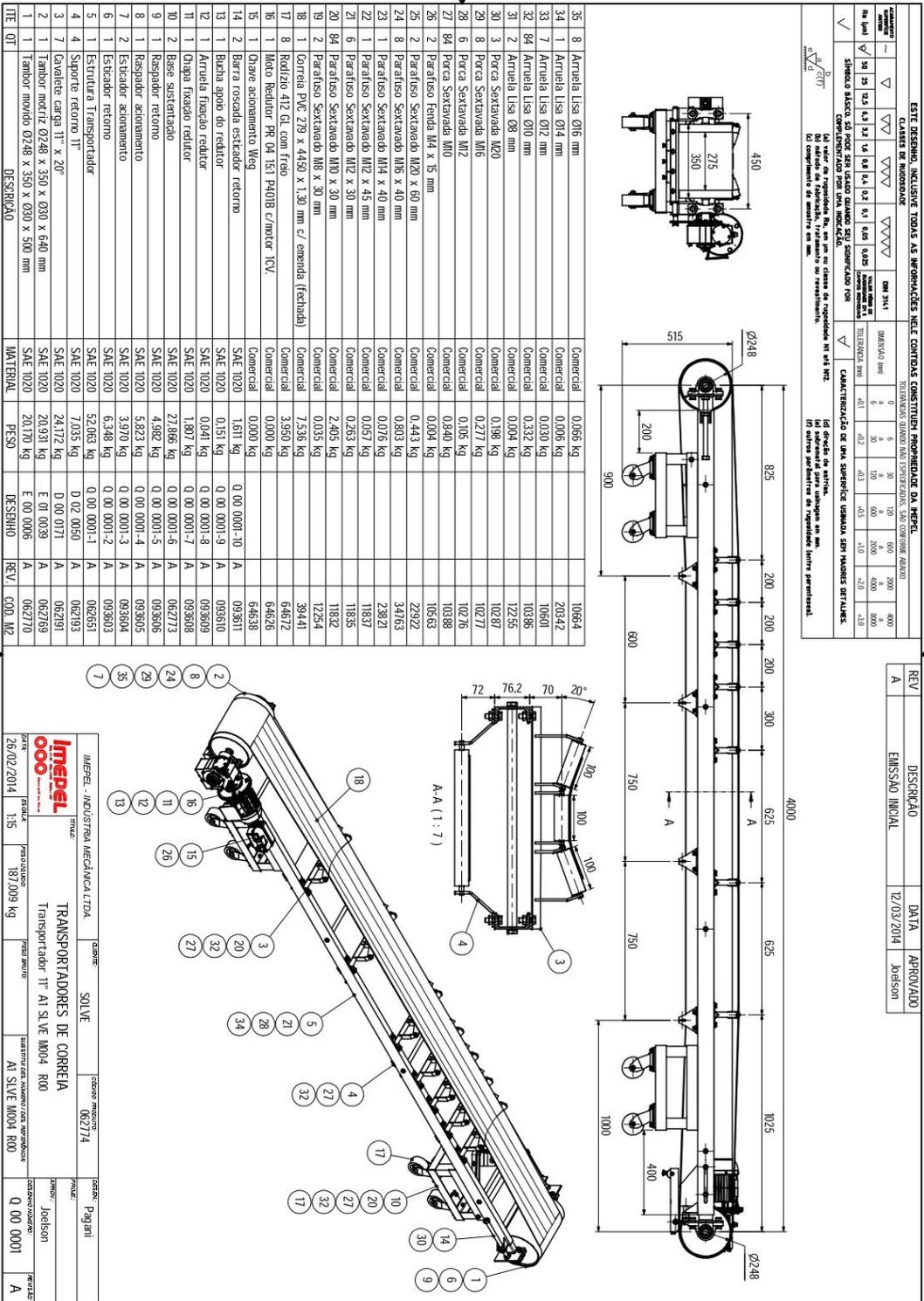


DIMENSÕES						
FÊMEA			MACHO			
A		C		A		
D		R		L		
L		B		L		
Ø ROSCA BSP NPT	DIMENSÕES				PESO	
	A	B	C	D	L	Kg
1/8"	20	16	12	20	28	0,07
1/4"	20	16	12	20	28	0,07
3/8"	25	20	19	29	35	0,1
1/2"	32	25	22	34	45	0,4
3/4"	40	32	25	41	56	0,4



ÂNGULOS DISPONÍVEIS: 60° - 90° - 120° - 150°											
MODELO	ROSCA NPT/BSP	SAIDA Ø mm	VAZÃO - LIT. / MIN								
			kg / cm ²								
			0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7
FL-2 / 1	1/8"	1,0	0,16	0,20	0,28	0,32	0,39	0,45	0,51	0,55	0,60
FL-2 / 2		1,5	0,22	0,45	0,55	0,64	0,78	0,90	1,0	1,1	1,2
FL-2 / 3		2,0	0,30	0,90	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
FL-2 / 4		2,5	0,95	1,4	1,7	1,9	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6
FL-2 / 5		3,5	1,6	2,3	2,8	3,2	3,9	4,5	5,1	5,5	6,0
FL-2 / 6		4,0	2,6	3,6	4,4	5,1	6,3	7,2	8,1	8,9	9,6
FL-2 / 7		4,5	3,2	4,5	5,5	6,4	7,8	9,0	10,1	11,1	12,0
FL-2 / 8	1/4"	1,5	0,45	0,55	0,64	0,78	0,90	1,0	1,1	1,2	
FL-2 / 9		2,0	0,64	0,90	1,1	1,3	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4
FL-2 / 10		2,5	0,96	1,4	1,7	1,9	2,3	2,7	3,0	3,3	3,6
FL-2 / 11		3,5	1,6	2,3	2,8	3,2	3,9	4,5	5,1	5,5	6,0
FL-2 / 12		4,0	2,6	3,6	4,4	5,1	6,3	7,2	8,1	8,9	9,6
FL-2 / 13		4,5	3,2	4,5	5,5	6,4	7,8	9,0	10,1	11,1	12,0
FL-2 / 14		5,0	4,8	6,8	8,3	9,6	11,7	13,6	15,2	16,6	17,9
FL-2 / 15	3/8"	3,5	1,6	2,3	2,8	3,2	3,9	4,5	5,1	5,5	6,0
FL-2 / 16		4,0	2,6	3,6	4,4	5,1	6,3	7,2	8,1	8,9	9,6
FL-2 / 17		4,5	3,2	4,5	5,5	6,4	7,8	9,0	10,1	11,1	12,0
FL-2 / 18		5,5	4,8	6,8	8,3	9,6	11,7	13,6	15,2	16,6	17,9
FL-2 / 19		6,5	6,4	9,0	11,1	12,8	15,7	18,1	20	22	24
FL-2 / 20		7,5	8,0	11,3	13,8	16,0	19,6	23	25	28	30
FL-2 / 21		8,0	9,6	13,5	16,6	19,2	23	27	30	33	36
FL-2 / 22		8,0	7,3	10,4	12,7	14,7	18,0	21	23	25	28
FL-2 / 23		8,5	8,9	12,6	15,5	17,9	22	25	28	31	33
FL-2 / 24		9,5	16,0	23	28	32	39	45	51	55	60
FL-2 / 25		1/2"	6,5	8,0	11,3	13,8	16,0	19,6	23	25	28
FL-2 / 26	7,5		9,6	13,5	16,6	19,2	23	27	30	33	36
FL-2 / 27	9,0		12,8	18,1	22	26	31	36	40	44	48
FL-2 / 28	11,0		16,0	23	28	32	39	45	51	55	60
FL-2 / 29	13,0		19,2	27	33	38	47	54	61	66	72
FL-2 / 30	3/4"	8,0	12,8	18,1	22	26	31	36	40	44	48
FL-2 / 31		9,5	16,0	23	28	32	39	45	51	55	60
FL-2 / 32		11,0	19,2	27	33	38	47	54	61	66	72
FL-2 / 33		13,0	22	32	39	45	55	63	71	78	84
FL-2 / 34		14,5	26	36	44	51	63	72	81	89	96
FL-2 / 35		15,0	29	41	50	57	70	81	91	100	108
FL-2 / 36		16,0	32	45	55	64	78	90	101	111	120
FL-2 / 37		17,0	35	50	61	70	86	99	111	122	132
FL-2 / 38		18,5	38	54	66	77	94	109	121	133	144

ANEXO F – Transportador inferior



ANEXO G – Características técnicas da empilhadeira (protótipo)

Equipamento		Empilhadeira / recuperadora
TAG do equipamento		ER-313K-05
Material manuseado		Minério de Ferro
Capacidade nominal	Empilhamento	8.000 t/h
	Recuperação	8.000 t/h
Capacidade de projeto	Empilhamento	11.200 t/h
	Recuperação	11.200 t/h
Empilhando	Recebe de	Transportador do pátio TR-313K-80
	Descarrega em	Pilha de minério de ferro
Recuperando	Recebe de	Pilha de minério de ferro
	Descarrega em	Transportador do pátio TR-313K-80
Vão (entre centros dos truques)		12.000 mm
Bitola do trilho duplo		1544 mm
Tipo de trilho da via de rolamento		US-CR-175
Comprimento da lança		50 m
Tipo de acionamento da roda de caçambas		Por motor hidráulico
Diâmetro da roda de caçambas		10.200 mm
Velocidade da roda de caçambas		4,5 rpm
Motores elétricos da U.H. da roda de caçambas		3 x 185 kW / 1785 rpm
Motor do TC da lança		2 x 260 kW / 1188 rpm
Velocidade da correia da lança		4,2 m/s
Largura da correia da lança		1800 mm
Ângulo de inclinação da lança		+ 13,0° a -13,5°
Motores do guincho da lança		2 x 55 kW / 1800 rpm
Velocidade de elevação da lança		5 m/min na ponta da lança
Sistema de giro		Por truques
Tipo de roda do giro		Lisa sem flange
Número total de rodas do giro		16
Diâmetro nominal das rodas do giro		800 mm
Reação máxima de roda do giro		85 t

Tipo da roda guia lateral do giro	Lisa sem flange
Número total de rodas guia lateral do giro	4
Diâmetro nominal das rodas guia lateral do giro	600 mm
Motores do giro da lança	2 x 30 kW / 1180 rpm
Velocidade de giro da lança	28 m/min (na ponta da lança)
Ângulo de giro da lança	240° (+120°; -120°)
Motores da translação	12 x 18,5 kW / 1765 rpm
Velocidade de translação	7,5 / 15 / 30 m/min
Curso total de translação	725 m
Motor do TC do trailer	2 x 370 kW / 1188 rpm
Velocidade da correia do trailer	4,0 m/s
Largura da correia do trailer	1800 mm
Motor do guincho do tripper	2 x 22 kW / 1800 rpm
Tipo de roda da translação	Flange duplo
Número total de rodas da translação	56 (máquina) + 16 (trailer) + 5 (tripper)
Número de rodas acionadas da translação	24
Diâmetro nominal das rodas da translação	630 mm
Reação máxima de roda da translação	30 t (em operação)
Tensão de alimentação	4160 V, 60 Hz, trifásico