



Experimento em Escala da Emissão de Material Particulado no Processo de Empilhamento de Minério de Ferro

*Maycon Magalhães Castro¹; Luis Paulo Silveira Machado¹; Hemerson da Conceição Wanzeler¹;
Ryan Luiz Rodrigues Louzada¹; Danilo Silva Santos¹; André Luiz Amarante Mesquita¹; Ronaldo
Menezes dos Santos Júnior²*

✉ maycon.castro@tucurui.ufpa.br

- Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia/
Universidade Federal do Pará - PA, Brasil.*
- Vale, Complexo portuário de Tubarão - ES, Brasil*

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 25 de maio de 2022

Aceito em: 30 de novembro de 2022

Publicado em: 31 de agosto de 2022

Resumo: A emissão de poeira pode levar à problemas de saúde, riscos de explosão e poluição ambiental. Por isso, deve-se compreender os parâmetros relacionados à geração de poeira para aprimorar técnicas de controle de emissão. A redução de poeira na pulverização via spray é o principal método para prevenir e controlar sua emissão no empilhamento de minério. Para analisar os parâmetros associados à geração de poeira, realizou-se ensaios com dois minérios: *Sinter Feed* e *Pellet Feed*. Desenvolveu-se uma bancada de transportadores em escala para testes de supressão de poeira via spray. Os principais parâmetros de controle da bancada são a altura de queda do material e a aspersão de água sobre o material com bicos de pulverização. Monitorou-se a supressão de poeira com contadores de partículas em diferentes posições. Os resultados mostram que a geração de poeira aumentou com a altura de queda. A região de impacto do material sobre a superfície de empilhamento, emite maior concentração em comparação a região frontal do fluxo. Após a aspersão de água, a concentração de poeira reduziu cerca de 70 % para a maior altura de empilhamento. Observou-se que o *Pellet Feed* em relação ao *Sinter Feed*, possui maior umidade crítica, maior emissão de poeira e menor granulometria.

Palavras-chave: Supressão de poeira, material particulado, correia transportadora, bico de pulverização, minério de ferro.

Scale Experiment of Particle Matter Emission in the Iron Ore Stacking Process

Abstract: Dust emission can lead to health problems, explosion hazards, and environmental pollution. Therefore, the parameters related to dust generation must be understood to improve emission control techniques. Dust reduction in spraying is the main method to prevent and control dust emission in ore stacking. To analyze the parameters associated with dust generation, tests were carried out with two ores: Sinter Feed and Pellet Feed. A scaled conveyor bench was developed for spray dust suppression testing. The main bench control parameters are the drop height of the material and the spraying of water over the material with spray nozzles. Dust suppression was monitored with particle counters in different positions. The results show that dust generation increased with falling height. The impact region of the material on the stacking surface emits a higher concentration compared to the front region of the flow. After water spraying, the dust concentration was reduced by about 70% for the highest stacking height. It was observed that the Pellet Feed, in relation to the Sinter Feed, has higher critical moisture, higher dust emission, and smaller granulometry.

Keywords: Dust suppression, particulate matter, conveyor belt, spray nozzle, iron ore.

Experimento a Escala de Emisión de Polvo en el Proceso de Apilamiento de Mineral de Hierro

Resumen: La emisión de polvo puede conducir a problemas de salud, peligros de explosión y contaminación ambiental. Por eso, los parámetros relacionados con la generación de polvo deben entenderse para mejorar las técnicas de control de emisiones. La reducción de polvo en la aspersión por aspersión es el método principal para prevenir y controlar la emisión de polvo en el apilamiento de minerales. Para analizar los parámetros asociados con la generación de polvo, se realizaron pruebas con dos minerales: Sinter Feed y Pellet Feed. Se desarrolló un banco transportador a escala para las pruebas de supresión de polvo por aspersión. Los principales parámetros de control del banco son la altura de caída del material y la pulverización de agua sobre el material con pico de pulverización. La supresión de polvo se controló con contadores de partículas en diferentes posiciones. Los resultados muestran que la generación de polvo aumentó con la altura de caída. La región de impacto del material sobre la superficie de apilamiento emite una mayor concentración en comparación con la región frontal del flujo. Después de la aspersión de agua, la concentración de polvo se redujo en aproximadamente un 70 % para la altura de apilamiento más alta. Se observó que el Pellet Feed, con relación al Sinter Feed, tiene mayor humedad crítica, mayor emisión de polvo y menor granulometría.

Palabras clave: Supresión de polvo, material particulado, cinta transportadora, boquilla de aspersión, mineral de hierro.

INTRODUÇÃO

As operações de manuseio de sólidos a granel envolvendo a queda de material em fluxo livre, como na formação de pilhas de estocagem, são comuns na indústria da mineração. Em tais operações, o descarregamento do minério da tremonha, ou da correia transportadora em queda livre, faz com que o material particulado (MP) muito pequeno se separe do fluxo principal e se misture com o ar circundante causando a suspensão de poeira (AZHAR; RANI, 2020; WANGCHAI; HASTIE; WYPYCH, 2016).

O risco da emissão de particulado, causando a poluição do ar, está relacionada ao manuseio de minérios. O particulado de minério muito pequeno, pode viajar grandes distâncias pela ação do vento e gerar graves riscos à saúde. Problemas respiratórios para trabalhadores da mineração e comunidades próximas às instalações industriais são observados. Também, impactos de menor efeito podem ocorrer, tais como: diminuição da visibilidade e precipitação de poeira nas superfícies das casas, veículos e estruturas próximas (PLANNER, 2011; FERRAZ, 2020).

Existem dois principais aspectos físicos pelos quais a poeira se desprende do material a granel e pode ser carregada por correntes de ventos para fora do fluxo de empilhamento: (i) a poeira é liberada durante a queda livre do material original, devido colisões com partículas vizinhas e interação com ar circundante; (ii) o impacto do fluxo de material sobre a superfície da pilha em formação, libera o ar aprisionado causando a emissão de poeira (COOPER; ARNOLD, 1995; FASCHINGLEITNER; HÖFLINGER, 2011).

Durante as operações de queda livre de material particulado, o ar circundante é induzido a se mover pela corrente de material à medida que os particulados contidos no granel se desprendem do fluxo principal e se envolvem com o ar ambiente (ANSART; RYCK; DODDS, 2009; CECALA et al., 2019; AZHAR; RANI, 2020). Esse cenário influencia na geração de poeira em suspensão (DONOHUE et al., 2009).

Devido às graves consequências associadas à inalação de particulados, a regulamentação da qualidade do ar tem estabelecido padrões rigorosos. Em 2006 e 2012, a Agência de Proteção Ambiental (EPA) norte americana realizou modificações nos padrões de emissão de MP para refletir a compreensão crescente de efeitos adversos para a saúde devido à inalação de poeira (EPA, 2022).

Este trabalho tem como objetivo a análise experimental da emissão de poeira em processos de empilhamento de minério. Para esse fim, desenvolveu-se equipamentos e técnicas para a realização de experimentos de caracterização da geração de poeira durante o processo de empilhamento de minério. Os resultados deste estudo podem ser aplicados em processos em escalas reais de empilhamento de materiais a granel.

METODOLOGIA

Materiais Utilizados

O trabalho consistiu em analisar as propriedades dos minérios de ferro *Pellet feed* (PF) e *Sinter feed* (SF) e como elas se associam à emissão de poeira. Os materiais foram cedidos pela empresa Vale e os ensaios foram realizados no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar) da Universidade Federal do Pará, Campus Tucuruí.

A amostra foi transportada em tambores de 200 litros a umidade de 7 %. Inicialmente os materiais foram analisados e em seguida caracterizados em ensaios de massa específica real (picnometria), distribuição granulométrica (peneiramento) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Inicialmente, os materiais foram quarteados, levados a estufas (por no mínimo 24 h) e secos a temperaturas de 105 °C aproximadamente. Na Figura 1 são mostrados os materiais secos. Percebe-se a diferença da distribuição granulométrica entre o PF e o SF, sendo mais evidente após o resultado da caracterização.



Figura 1. Materiais utilizados nos ensaios: Pellet feed (esquerda) e Sinter feed (direita).
Fonte: O Autor.

Determinação da massa específica real

Os ensaios de massa específica real (ρ_s) das amostras de minério de ferro foram realizadas em triplicata por picnometria. Utilizou-se um picnômetro de 100 mL e uma balança BK3000 com capacidade máxima de 3000 g e resolução de 0,01 g. Os dados de massa específica real são importantes para configurar o contador de partículas que medirá a emissão de poeira nos ensaios.

Microscopia Eletrônica de Varredura

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) é uma técnica instrumental que permite 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.

Cálculo de similaridade de uma empilhadeira

Condição de similaridade é o conceito subjacente de análise dimensional, sendo importante para a técnica da análise dimensional. 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 (DONECKER, 2011; CENGEL; CIMBALA, 2015).

Há três condições necessárias para semelhança completa entre um modelo (M) e um protótipo (P) (SANTOS JR.; MESQUITA, 2017), onde modelo diz respeito ao modelo em escala (bancada experimental) e protótipo ao cenário real. 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 (λ), conforme a Equação 1. Para o estudo, em escala, de uma

empilhadeira real (protótipo) para uma em laboratório (modelo) será utilizado como fator constante a largura da correia da empilhadeira real (l_P) e em escala (l_M).

$$\lambda = \frac{l_P}{l_M} \quad (1)$$

Sendo, l_P : Largura da correia real (mm), l_M : Largura da correia em escala (mm), λ : Fator de escala (-).

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 do 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. Assim, em escoamentos granulares, pode-se usar as duas equações adimensionais conhecidas, o Número de Froude, o qual representa a razão entre as forças de inércia sobre força gravitacional, e o Número Capacidade, que é a razão entre a vazão volumétrica sobre a velocidade pela secção de área da correia. Realiza-se a igualdade para o Número de Froude e pode-se determinar a velocidade do modelo (v_M), que é a velocidade do aparato experimental no laboratório, em função da velocidade da empilhadeira (v_P), conforme a Equação 2.

$$v_M = v_P \sqrt{\frac{l_M}{l_P}} = v_P \sqrt{\frac{1}{\lambda}} \quad (2)$$

Sendo, v_M : Velocidade do modelo ($m s^{-1}$), v_P : Velocidade do protótipo ($m s^{-1}$).

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 1 (um). Similaridade cinemática é uma condição necessária, mas insuficiente para semelhança dinâmica. Utilizando o Número Capacidade e substituindo na Equação 2 de velocidade, determina-se a vazão volumétrica do modelo (Q_M) em função da vazão volumétrica da empilhadeira real (Q_P), conforme a Equação 3.

$$Q_M = Q_p \cdot \left(\frac{l_M}{l_p}\right)^{5/2} = \frac{Q_p}{\lambda^{5/2}} \quad (3)$$

Sendo, Q_M : Vazão volumétrica do modelo ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$), Q_p : Vazão volumétrica do protótipo ($\text{m}^3 \text{h}^{-1}$).

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

Distribuição granulométrica

A determinação da distribuição granulométrica das amostras é realizada através de peneiramento do material seco, conforme procedimentos descritos na norma NBR NM 248 (ABNT, 2001a).

Após a escolha da massa mínima da amostra (*Pellet feed* = 1 kg e *Sinter feed* = 2 kg), 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 realizado por meio de uma peneira vibratória, com uma amplitude de vibração de 1 mm e por peneiras com abertura entre 15 μm e 19100 μm . O ensaio dura cerca de 15 min. Os produtos retidos nas peneiras são pesados em uma balança BK5000, com capacidade máxima de 5000 g e resolução de 0,01 g. Determina-se então a porcentagem em relação à massa inicial. Para eficiência na caracterização dos materiais, os ensaios são feitos em triplicata.

Empilhamento em escala laboratorial

Nos ensaios, utiliza-se o minério de ferro *Pellet feed* e *Sinter Feed* com 1,7 % de umidade, o ajuste de umidade dos materiais foi realizado, na base úmida, através da adição de água em massa de material seco. O material seco é quarteado de acordo com a norma NBR NM 27 e separado em amostras de 70 kg (ABNT, 2001b).

Prepara-se a amostra do material para uma umidade de interesse. Três amostras são coletadas para confirmação da umidade. Preenche-se a moega de alimentação com 65 kg do material. Usa-se o contador de partícula modelo *Particles Plus* 8306 com uma taxa de fluxo de 2,83 L min^{-1} e 6 canais de armazenamento para o tamanho de partícula de 0,3 à 20 μm . 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 dos instrumentos, o transportador de correia é ligado e 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 até se estabilizar novamente. A mesa de empilhamento é limpa e se inicia os experimentos para diferentes alturas de empilhamento (800, 1200 e 1600 mm).

Para avaliação das regiões de maior emissão de poeira, posiciona-se um contador na frente da descarga do material (contador 1) e o outro contador na sua lateral (contador 2). Realiza-se ensaios variando apenas a altura dos contadores em relação a mesa de empilhamento ($h = 300, 600, 900$ e 1200 mm) e mantém-se à altura de empilhamento fixa de 1200 mm (altura do transportador de correia em relação a mesa de empilhamento). Essas medições determinam quais posições da descarga de material possuem maior emissão de partículas de poeira. A Figura 2 apresenta a configuração dos ensaios que foram realizados.

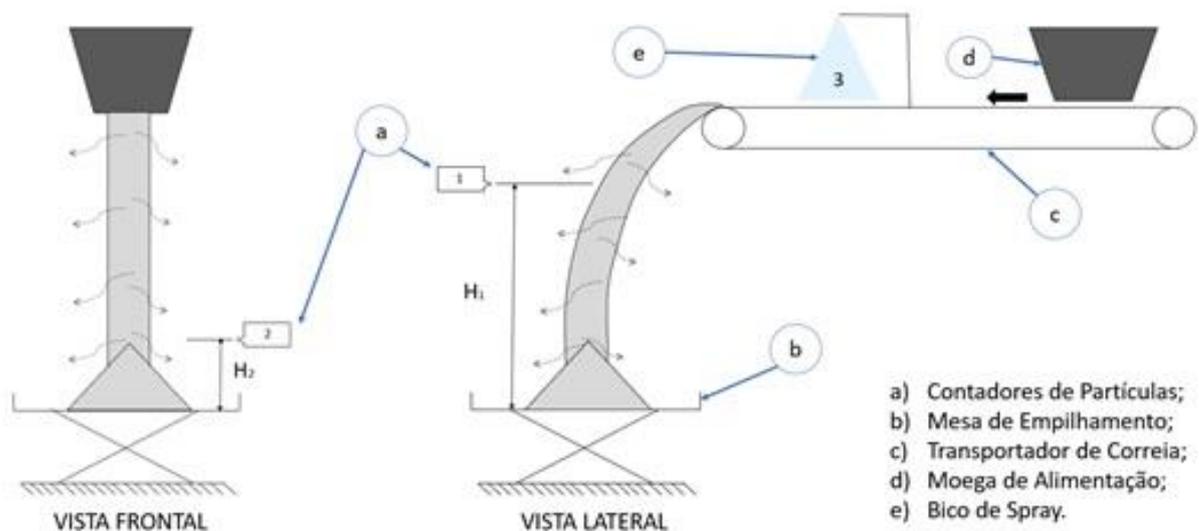


Figura 2. Desenho esquemático da bancada de empilhamento.

Fonte: O Autor.

Determinação da umidade crítica (teste de queda em tudo)

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 Macaringue (2018), permite determinar uma umidade crítica, para cada material granular, realizando experimentos de queda de material para diversas umidades.

A umidade crítica pode ser definida como um parâmetro para a determinação de um limite de umidade, acima do qual a emissão de poeira tende a um valor constante (MACARINGUE, 2018). Para determinação da umidade crítica foram executados experimentos para teores crescentes de umidade do material, medindo-se o número máximo de partículas emitidas no

Experimento em Escala da Emissão de Material Particulado no Processo de Empilhamento de Minério de Ferro

experimento. Realizou-se ensaios de queda de material em queda livre, utilizando um dispositivo cilíndrico com um reservatório no topo. O reservatório é preenchido com uma massa padronizada (200 g) 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 ao processo de queda do minério. Um contador de partículas registra 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 3 apresenta a bancada de teste de queda.

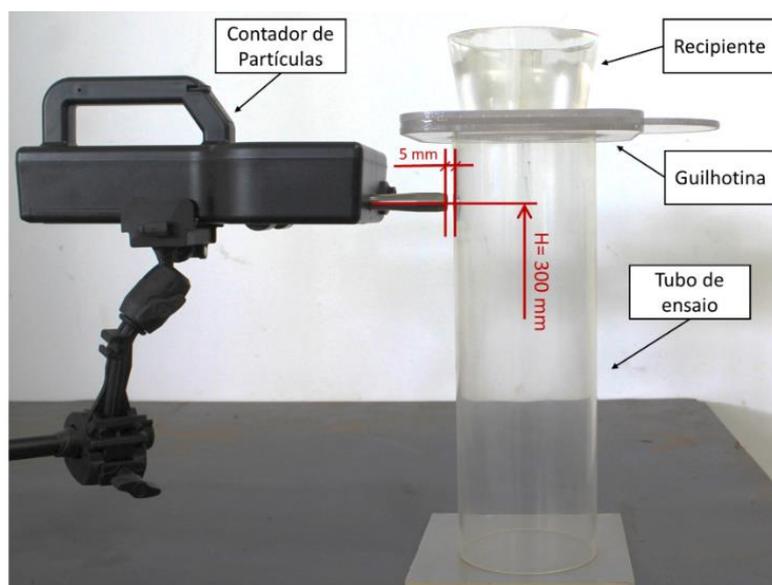


Figura 3. Bancada de teste de queda em tubo.

Fonte: O Autor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação das características físico-químicas do material é fundamental, para que se possa entender os parâmetros que influenciam a geração do MP durante seu manuseio.

Os resultados da distribuição granulométrica obtidos com o processo de peneiramento estão na Figura 3, onde observa-se a diferença na composição granular do SF e PF. Enquanto o D50 (diâmetro mediano de partícula) do PF fica em torno de 75 μm (74,98 μm), o D50 do SF é acima de 2000 μm (2073,83 μm). Assim, o PF possui um tamanho de partícula menor que o SF e espera-se que o PF possua uma maior emissão de MP do que o SF (maior granulometria). Esse é um dos questionamentos a ser respondido na conclusão desse estudo.

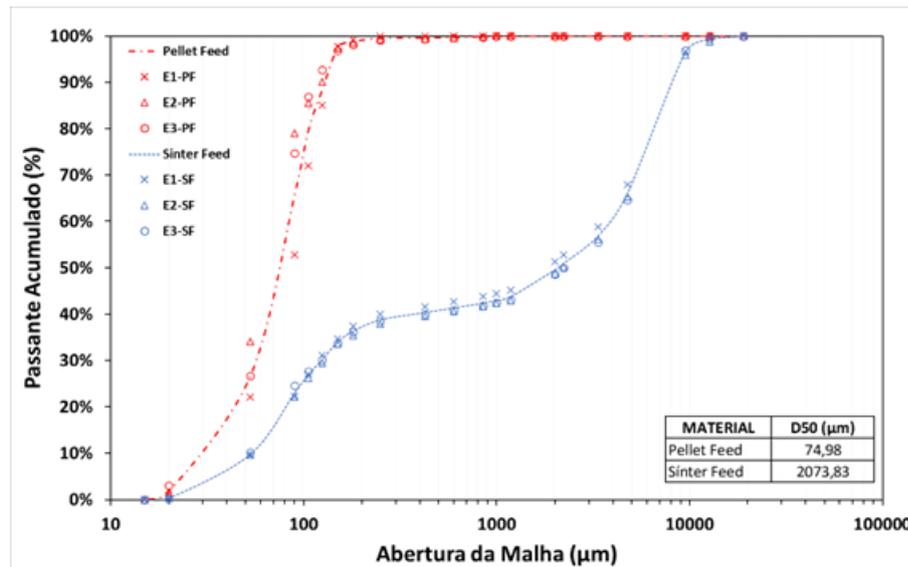


Figura 3. Granulometria dos materiais utilizados nos ensaios, onde D50 é chamado de diâmetro mediano de partícula.

Fonte: O Autor.

Foram feitas as análises de MEV para ambos os materiais passantes da peneira de 100 μm do ensaio de granulometria. A Figura 4 apresenta uma amostra de partículas de PF. 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.

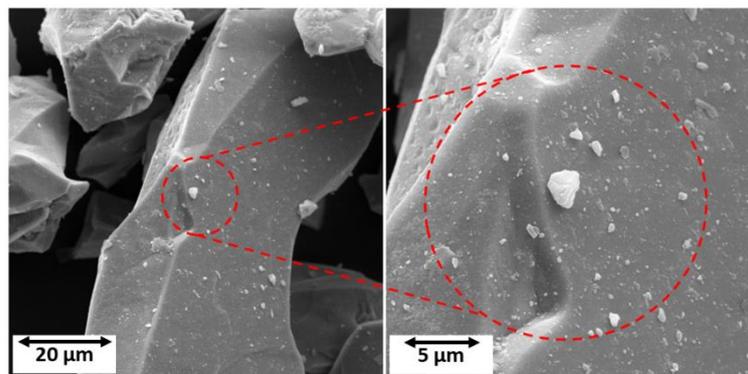


Figura 4. Fotomicrografia do material Pellet feed: 1760x (esquerda) e 12700x (direita).

Fonte: O Autor.

Na Figura 5 é mostrado a fotomicrografia da amostra de SF, onde observa-se que, além dos tamanhos e formas irregulares das partículas, a amostra possui partículas menores de 5 μm agregadas nas partículas maiores e em maior quantidade quando comparada com PF. Com esses resultados espera-se que o PF gere maior emissão de MPIO. Portanto, percebe-se que as micropartículas (menores que 5 μm) ficam “coladas” nas partículas maiores, por forças eletrostáticas que são forças mais fracas quando comparadas com as forças capilares de

Experimento em Escala da Emissão de Material Particulado no Processo de Empilhamento de Minério de Ferro

partículas umidificadas, ou seja, essas forças são chamadas forças de Van der Waals, conforme mostrado por Cornelis *et al.* (2004), e Schulze (2008) que afirmam que a intensidade da força de Van der Waals é diretamente ligada ao tamanho da partícula, da distância entre partículas e da característica da superfície do material.

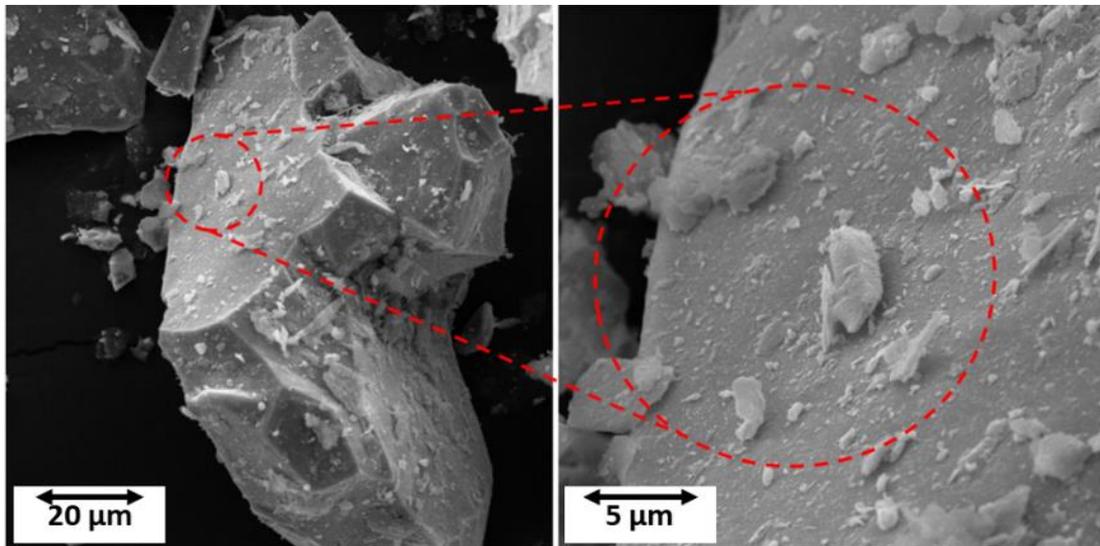


Figura 5. Fotomicrografia do material Sínter feed: 2670x (esquerda) e 11500x (direita).
Fonte: O Autor.

Utilizando a metodologia apresentada para a medição de massa específica real, obtivemos os seguintes valores para o: *Pellet feed* $4,7 \text{ g cm}^{-3}$ e *Sínter feed* $4,1 \text{ g cm}^{-3}$. A seguir, utilizando informações reais de uma empilhadeira/recuperadora (protótipo) e aplicando os cálculos da similaridade obtivemos os resultados para o modelo em escala laboratorial (modelo). A Tabela 1 resume essas informações.

Tabela 1. Resumo das informações do protótipo e modelo da empilhadeira.

PARÂMETRO	PROTÓTIPO (Real)	MODELO (Experimento)
Largura da Correia (mm)	1.800	279
Fator de Escala (-)	1	6,45
Velocidade do Transportador (m s^{-1})	4,20	1,65
Vazão Mássica (t h^{-1})	8.000	75,67
Massa Específica Aparente (t m^{-3})	2,55	2,55
Vazão Volumétrica ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$)	3.137	29,67

Fonte: O Autor.

Realizou-se ensaios variando apenas a altura dos contadores em relação a mesa de empilhamento ($h=300$, $h=600$, $h=900$ e $h=1200$ mm) e manteve-se a altura de empilhamento fixa de 1200 mm (altura do transportador de correia em relação a mesa de empilhamento). Os resultados mostraram que, para a altura de empilhamento de 1200 mm, o contador 1 (frontal) na altura $h = 900$ mm mediu a maior emissão de particulados e para a medição de poeira do contador 2 (lateral), constatou-se que a altura $h = 300$ mm foi aquela que apresentou maior concentração de poeira. Sendo assim, essas alturas de contadores serão empregadas para o ensaio de empilhamento de 1200 mm. Determinou-se também para as alturas de empilhamento mínima (800 mm) e máxima (1600 mm), as posições dos contadores 1 e 2. A Tabela 2 resume as alturas dos contadores, em relação a mesa de empilhamento, que foram utilizadas no decorrer dos ensaios para cada altura de queda de material durante o empilhamento de minério.

Tabela 2. 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

Fonte: O Autor.

Avaliação da emissão de poeira em função da altura de empilhamento

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) para cada altura de empilhamento, conforme a Tabela 2.

A Figura 6 apresenta os resultados, onde nota-se o comportamento da nuvem de partículas de minério. O contador 1, localizado acima e na frente do fluxo, tem seu ápice de concentração ($602 \mu\text{g m}^{-3}$) quando a altura do empilhamento está em 1600 mm (altura máxima de empilhamento). Essa concentração decresce 28 % na posição intermediária de 1200 mm e 35 % na menor altura de 800 mm. Esse resultado mostrou que apesar de ter uma redução de 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 10,2 % 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.

Experimento em Escala da Emissão de Material Particulado no Processo de Empilhamento de Minério de Ferro

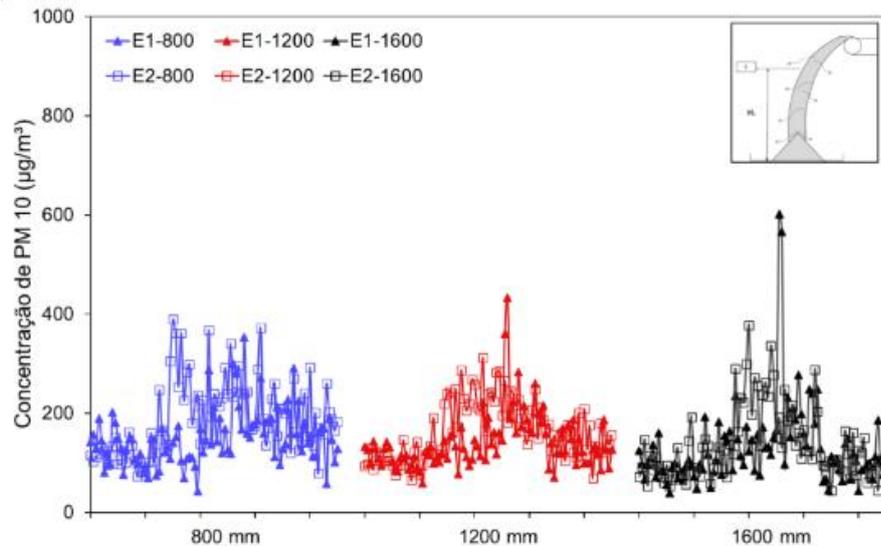


Figura 6. Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Frontal a descarga do material particulado.

Fonte: O Autor.

Para a medição de concentração de partículas pelo contador 2, localizado no ponto mais abaixo e na lateral do fluxo, a influência da altura de queda de material é mais perceptível (Figura 7). O ápice de emissão de poeira mediu-se na altura de 1600 mm ($3192 \mu\text{g m}^{-3}$). Essa concentração reduz bruscamente quando comparada 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 ($848 \mu\text{g m}^{-3}$) com a concentração na menor altura ($710 \mu\text{g m}^{-3}$) percebe-se que a diminuição não é significativa, cerca de 16%.

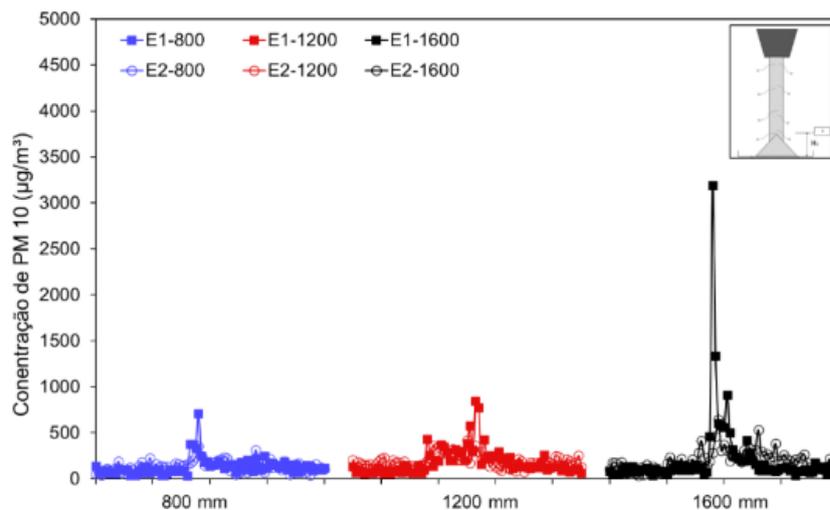


Figura 7. Concentração de partículas (MP10), medidas por um contador Lateral a descarga do material particulado.

Fonte: O Autor.

Portanto, os resultados desta investigação mostram que a geração de poeira aumentou à medida que a altura de queda aumentou. Esse resultado é similar ao resultado apresentado por Azhar (2020), 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, onde o volume de ar deslocado é proporcional à altura de queda (WYPYCH; COOK; COOPER, 2005; WANG *et al.*, 2022).

Avaliação do uso de spray na contenção da poeira

Para 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. Utilizou-se os resultados obtidos nos ensaios variando a altura de empilhamento sem spray e comparou-se quando se emprega o spray.

A Figura 8 (lado esquerdo) 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, 1200 e 1600 mm.

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

Fica claro nos resultados que o controle de particulados via umectação por pulverização é eficiente (GRUNDNIG *et al.*, 2006; FASCHINGLEITNER; HÖFLINGER, 2011). A aspersão sobre a correia umidifica as partículas fazendo com que as mesmas se aglomerem (PEREIRA; FORTES; MARTINS, 2015).

A aglomeração das partículas aumenta o peso específico do material permitindo que, após o material sair da correia e entrar em queda, as partículas finas ficam menos propensas a se desprender do fluxo principal e a ficarem 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, conseqüentemente o material leva mais tempo para chegar na superfície (mesa de empilhamento). Isso faz com que mais partículas tendem a se

Experimento em Escala da Emissão de Material Particulado no Processo de Empilhamento de Minério de Ferro

desprender do fluxo de material e permanença suspensa no ar. Os resultados com o contador lateral reforçam esse efeito.

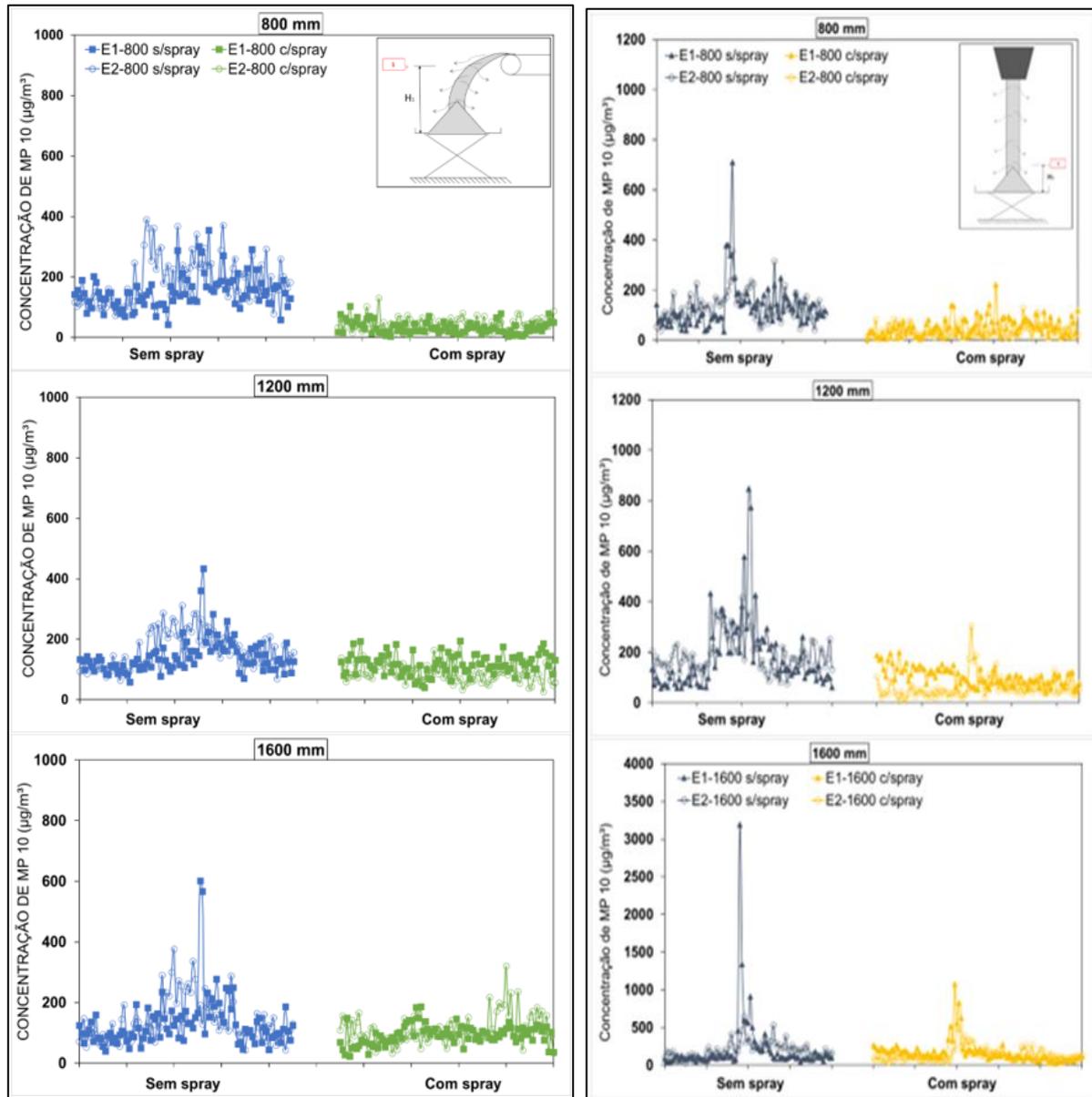


Figura 8. Concentração de partículas MP10, sem e com spray. Lado esquerdo: medidas por um contador Frontal; Lado direito: medidas por um contador Lateral.
Fonte: O Autor.

A Figura 8 (lado direito) apresenta os resultados de concentração de MP 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 $711 \mu\text{g m}^{-3}$ e após o uso do spray de água a concentração medida durante o impacto do material sobre a superfície foi de $222 \mu\text{g m}^{-3}$, tendo então uma redução de quase 70 % na concentração de MP.

Para a altura intermediária (1200 mm) a minimização da concentração de MP, após a aplicação do spray sobre o material, foi um pouco menor que a anterior cerca de 65 % (concentração antes da aplicação foi de $848 \mu\text{g m}^{-3}$, após o uso do spray foi de $304 \mu\text{g m}^{-3}$).

A Figura 8 (lado direito) apresenta os resultados de concentração de MP para a maior altura de empilhamento de material (1600 mm), antes 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 media a maior emissão de partículas ($3193 \mu\text{g m}^{-3}$) após a aspersão sobre o fluxo de material que passa pela correia, a concentração de MP emitida reduziu 66,3 %.

Ao comparar a minimização de quase 70 % na menor altura de empilhamento (800 mm), a redução da eficiência da aspersão tem influência da umidificação que ocorre apenas na parte superior do material, como também pelo fato que a energia recebida pelas partículas devido ao impacto do material sobre a superfície de empilhamento é suficiente para superar a força atrativa de adesão das partículas que mantém as partículas finas aglomeradas, causando assim a separação do material aglomerado e conseqüentemente o MP fica mais propenso a suspensão no ar.

Influência da granulometria na emissão de MP

Os resultados obtidos na caracterização do tamanho de MP dos materiais *Pellet feed* (PF) e *Sinter feed* (SF), mostram que o PF possui uma distribuição granulométrica de tamanho de partículas menor quando comparado ao SF. Percebe-se tanto graficamente como através dos diâmetros equivalentes (D50 para o *Pellet Feed* = $74,98 \mu\text{m}$; *Sinter feed* = $2073,83 \mu\text{m}$).

Como alternativa de baixo custo aos ensaios de determinação da emissão de poeira, ensaiou-se o PF e SF com os testes da Queda no Tubo. Os resultados estão na Figura 9. Percebe-se que a umidade crítica medida para o PF e SF foi de 4,69 % e 2,07 %, respectivamente. 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.

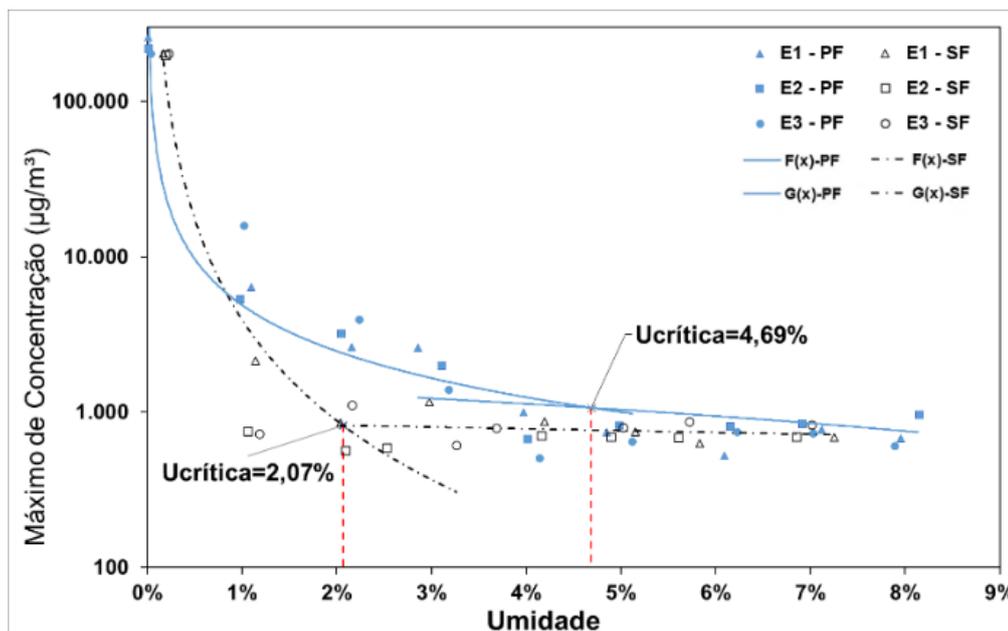


Figura 9. Concentração máxima de partículas de tamanho MPI0, medida no Teste de Queda para as amostras de *Pellet feed* e *Sinter feed* com o teor de umidade crescente.
Fonte: O Autor.

Os resultados de concentração de MPI0 (partículas de 10 µm de diâmetro) obtidos nos ensaios de empilhamento para os minérios *Pellet feed* e *Sinter feed*, a altura de empilhamento intermediário (1200 mm), são apresentados na Figura 10 (painel superior) que apresenta os resultados de comparação da concentração de MP medidos pelo contador 1 (frontal). Para o contador frontal a descarga de material, observou-se que para o *Pellet feed* (tamanho de partículas menor) apresentou uma maior emissão de MP ($1038 \mu\text{g m}^{-3}$) dispersa do fluxo principal na saída do transportador, quando comparado com a concentração de partículas ($434 \mu\text{g m}^{-3}$) emitida nos ensaios do SF.

Para as medições realizadas pelo contador 2 (lateral a descarga de material), observou-se o comportamento similar ao medido pelo contador 1, porém com uma concentração maior. A Figura 10 (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 $1117 \mu\text{g m}^{-3}$ e o SF uma concentração menor de $848 \mu\text{g m}^{-3}$, ficando evidente que por se tratar de um material de granulometria menor o *Pellet feed* tende a emitir mais MP quando manuseado. A maior emissão de MP é conduzida a partir dos materiais com o menor tamanho de partícula (WANG *et al.*, 2022). Contudo, deve-se realizar mais experimentos para verificar a influência da porcentagem de finos (partículas muito finas suscetíveis à emissão), a fim de obter resultados mais precisos.

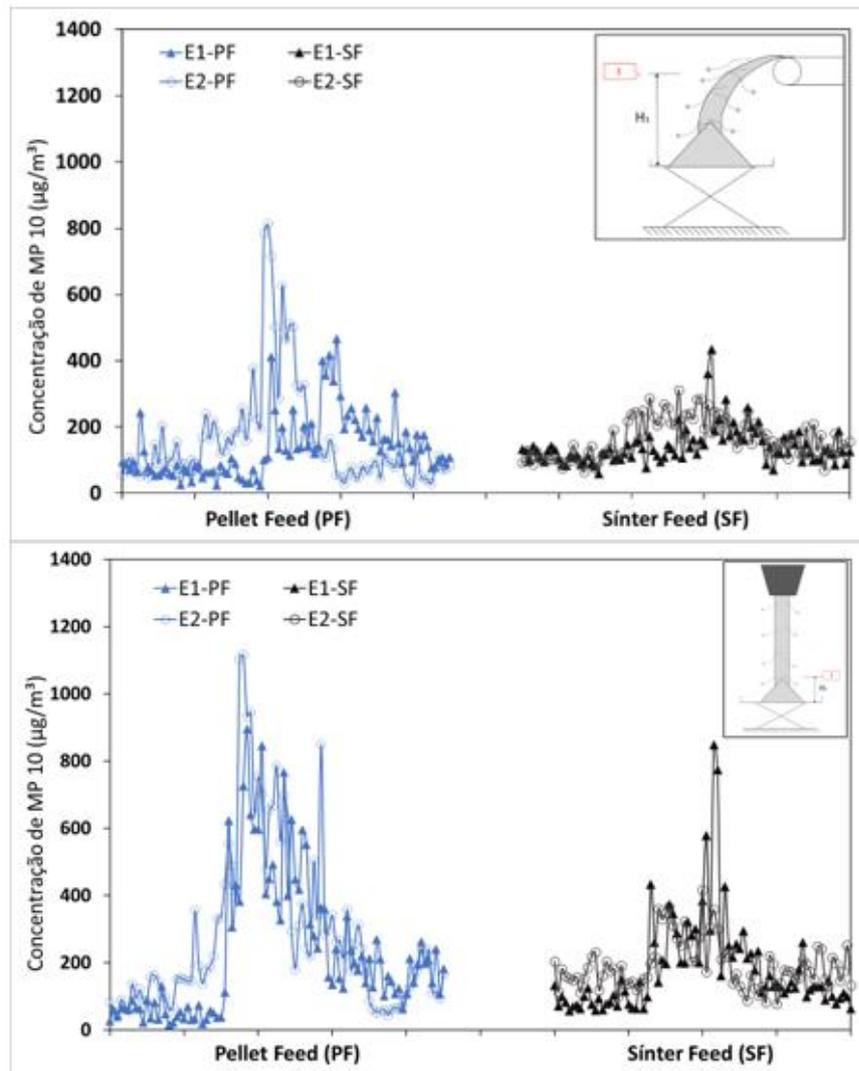


Figura 10. Concentração de partículas MP 10 (Pellet Feed e Sinter Feed), medidas por um contador frontal (painel superior) e um contador lateral (painel inferior).

Fonte: O Autor.

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que o MP é gerado em duas regiões principais. Primeiro durante a saída do material da correia no transbordo do material, onde as partículas finas (induzidas pelo ar circundante) se desprendem do fluxo principal e se envolvem com o ar ambiente. A segunda região observa-se no impacto do fluxo de material sobre a superfície da pilha em formação, liberando particulados no ar aprisionado causando a emissão de poeira. A literatura mostra resultados similares como o apresentado por Faschingleitner e Höflinger (2011), onde eles chamam: o estágio de queda de geração primária de poeira e o estágio de impacto de geração secundária de poeira.

Experimento em Escala da Emissão de Material Particulado no Processo de Empilhamento de Minério de Ferro

Os resultados mostram ainda que: (i) a geração de poeira suspensa no ar aumenta com a altura da queda; o uso de spray auxilia no controle na contenção da poeira, devido a aglomeração das partículas e o aumento do seu peso específico. Os resultados para os cenários com spray estão em acordo com Wang *et al.*, (2022). As propriedades do material, principalmente a distribuição granulométrica, afetaram as emissões de poeira para o ambiente, sendo maior para materiais mais finos (*Pellet feed*) e necessitando de um teor de umidade mais elevado quando comparado a um material mais grosseiro (*Sinter feed*).

Portanto, a bancada desenvolvida 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 durante o processo de empilhamento, parâmetros associados à geração de partículas de poeira, aspersão via spray (prevenção) como forma de controle de particulados gerados durante o manuseio, transporte de materiais em transportadores de correia e aspectos associados a aspersão para melhorar a sua eficiência.

AGRADECIMENTOS

A empresa Vale S.A. pelo apoio financeiro dado ao projeto. Maycon Magalhães Castro - Composição e revisão do artigo, realização dos experimentos e análise estatística dos resultados. Luis Paulo Silveira Machado - Composição e revisão do artigo, formatação e revisão ortográfica. Hemerson da Conceição Wanzeler - Realização dos experimentos e estatística dos resultados. Ryan Luiz Rodrigues Louzada - Realização dos experimentos e estatística dos resultados. Danilo Silva Santos - Composição, formatação e revisão do artigo. André Luiz Amarante Mesquita - Composição e revisão do artigo, formatação e revisão ortográfica. Ronaldo Menezes dos Santos Júnior - Composição e revisão do artigo, formatação e revisão ortográfica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR NM 248/2001: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Disponível em: <http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosupload/17827/material/nbr_nm248_2003.pdf>. Acesso em 10 maio 2022a.

ABNT. NBR NM 27/2001: **Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório**. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/baccan/files/2019/04/Amostragem-NBR-NM-27-2001.pdf>>. Acesso em 26 abril 2022b.

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

- AZHAR, N. A. L.; RANI, S. I. Experimental Study of Airborne Dust Generation During Powder Free Falling. **Acta Mechanica Malaysia**, v. 3, n. 2, p. 37-39, 2020.
- CECALA, A. B., O'BRIEN, A. D., SCHALL, J., COLINET, J. F., FOX, W. R., FRANTA, R. J., ... & SCHULTZ, M. J. **Dust control handbook for industrial minerals mining and processing. Second edition.** [2019].
- CENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos-3.** [s.l.] AMGH Editora, 2015.
- COOPER, P.; ARNOLD, P. C. Air Entrainment and Dust Generation from a Falling Stream of Bulk Material. **KONA Powder and Particle Journal**, v. 13, n. 13, p. 125-134, 1995.
- CORNELIS, W.M., GABRIELS, D., ROGER HARTMANN, R. A conceptual model to predict the deflation threshold shear velocity as affected by near-surface soil water: I. Theory. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 68, p.1154-1161, 2004.
- DONECKER, P. **Dynamic scale modelling (DSM) of transfer chutes.** 2011.
- DONOHUE, T. J., ROBERTS, A. W., WHEELER, C. A., & MCBRIDE, W. Computer simulations as a tool for investigating dust generation in bulk solids handling operations. *Particle & Particle Systems Characterization*, v. 26, n. 5-6, p. 265-274, 2009.
- EPA. **EPA – Environmental Protection Agency, NAAQS Table. Washington, D.C: EPA.** Disponível em: <<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>>. Acesso em 21 março 2022.
- FASCHINGLEITNER, J.; HÖFLINGER, W. Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling. **Advanced Powder Technology**, v. 22, n. 2, p. 236-244, 2011.
- FERRAZ, P. H. R. Material Particulado e sua Emissão em Canteiros de Obra: Revisão de Literatura. *Revista Geama*, v. 6, n. 1, p. 12-24, 2020.
- GRUNDNIG, P. W., HÖFLINGER, W., MAUSCHITZ, G., LIU, Z., ZHANG, G., & WANG, Z. Influence of air humidity on the suppression of fugitive dust by using a water-spraying system. **China Particuology**, v. 4, n. 5, p. 229-233, 2006.
- MACARINGUE, A. A. **Determinação da Humidade Crítica em processos de emissão de poeira aplicados a minério de ferro e carvão.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Processamento Mineral) - Instituto Superior Politécnico de Tete, Moçambique.
- PEREIRA, J. L. G.; FORTES, J. D. N.; MARTINS, E. M.o. Poluição Do Ar Por Material Particulado Em Área Intraurbana No Rio De Janeiro: Alguns Aspectos Metodológicos. *REEC-Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 10, n. 3, 2015.
- PLANNER, J. **A Sustainable Approach To Manage Dust Emission During Handling and Transport of Coal and Iron Ore.** 2011.
- SANTOS JR.; MESQUITA, A. **Laboratório de transportadores de correia para análise de chutes em escala.** XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017.
- SCHULZE, D. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow.* Springer, Vol. 22, 2008.
- WANG, H., WANG, X., XIA, S., & LI, L. Experimental Study and Numerical Simulation on Dust Concentration Distribution of Chute at Enclosed Stockyard of Steel Works. *Minerals*, v. 12, n. 9, p. 1164, 2022.
- WANGCHAI, S.; HASTIE, D. B.; WYPYCH, P. W. The investigation of particle flow mechanisms of bulk materials in dustiness testers. **Particulate Science and Technology**, v. 34, n. 2, p. 241-254, 2016.
- WYPYCH, P.; COOK, D.; COOPER, P. Controlling dust emissions and explosion hazards in powder handling plants. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 2, p. 323-326, 2005.