

Desenvolvimento de túnel de vento para avaliação da eficiência de bicos de pulverização no abatimento de poeira

Development of a wind tunnel to evaluate the efficiency of spray nozzles in dust removal

Danilo Silva Santos¹, Danielle Vitória Baia Rodrigues², Luis Paulo Silveira Machado³, André Luiz Amarante Mesquita⁴, Ronaldo Menezes dos Santos Junior⁵

RESUMO

A mineração desempenha um papel fundamental na economia, especialmente na extração de minério de ferro. No entanto, seus benefícios vêm acompanhados de impactos ambientais, como a emissão de poeira. Esse problema causa transtornos às mineradoras, resultando em paralisações, multas e riscos à saúde de trabalhadores e comunidades próximas, além da degradação ambiental. O controle da poeira tem sido amplamente estudado, e um dos métodos mais utilizados é a pulverização de soluções supressoras. A eficiência dos bicos de spray é um fator crítico nesse processo, tornando os testes em bancada essenciais para compreender o abatimento da poeira de minérios. O uso de túneis de vento tem se mostrado uma abordagem comum em pesquisas da área. Neste estudo, foi desenvolvido um túnel de vento para avaliar cinco tipos de bicos, testando sua eficiência na supressão de pellet feed e sinter feed em duas velocidades e diferentes pressões de água. Os resultados demonstraram que o túnel permite avaliar e comparar o desempenho dos bicos de forma eficaz, consolidando-se como uma ferramenta valiosa para aprofundar esse conhecimento no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados.

Palavras-chave: Poeira. Supressão. Bicos de Pulverização. Túnel de vento.

ABSTRACT

Mining plays a fundamental role in the economy, particularly in iron ore extraction. However, its benefits are accompanied by environmental impacts, such as dust emissions. This issue causes disruptions in mining operations, leading to production stoppages, fines, and health risks for workers and nearby communities, in addition to environmental degradation. Dust control has been widely studied, with the use of suppressant solutions through spray nozzles being one of the most effective methods. The efficiency of these nozzles is a critical factor, making bench-scale tests essential for understanding dust suppression in bulk materials. The use of wind tunnels has become a common approach in research on this topic. In this study, a wind tunnel was developed to evaluate five different nozzle types, testing their efficiency in suppressing pellet feed and sinter feed at two airspeeds and different water pressures. The results demonstrated that the tunnel effectively assesses and compares nozzle performance, establishing itself as a valuable tool for advancing knowledge in the Laboratory of Fluid Dynamics and Particulate Systems.

Keywords: Dust. Suppression. Spray nozzle. Wind Tunnel.

¹ Mestre e Ufpa.
E-mail: daniloss@ufpa.br
Orcid 0000-0003-3233-653X

² Graduado e Ufpa.
Orcid 0009-0006-6449-5411

³ Doutor e Ufpa.
Orcid 0000-0003-1587-3632

⁴ Doutor e Ufpa.
Orcid 0000-0001-5559-5580

⁵ Mestre e Vale.
Orcid 0000-0002-5167-9645

1. INTRODUÇÃO

A mineração de ferro desempenha um papel fundamental na economia global e nacional, fornecendo matéria-prima essencial para diversas indústrias. No contexto mundial, o minério de ferro é um dos recursos minerais mais explorados e demandados, sendo utilizado na produção de aço, fundamental para a construção civil, fabricação de veículos, e uma variedade de produtos de consumo. No Brasil, especificamente, a mineração de ferro tem sido uma atividade econômica de grande relevância, com vastas reservas e uma significativa participação na balança comercial do país (MME, 2023). No entanto, a extração, transporte e manuseio desse minério frequentemente resultam na geração de poeira, um subproduto indesejado que pode ter consequências negativas para o meio ambiente, a saúde humana e a eficiência operacional das instalações.

As atividades do ramo da mineração geram, em suas fases, poeira que prejudica o bom andamento dos negócios devido a seus impactos sobre o meio ambiente e as pessoas. Durante décadas, toneladas de minério são produzidas, estocadas e transportadas em cada empreendimento. Isso quer dizer que, sem atividades mitigatórias sobre a problemática dos particulados aerotransportados, serão décadas de impactos ambientais, sociais e financeiros associados a esse inconveniente (Castro *et al.* 2022).

Um estudo em escala utilizando bancadas que repliquem os efeitos desses métodos se torna bem-sucedido para a escolha do melhor meio de abatimento para cada minério estudado (Castro *et al.*, 2022). Já é comum o uso de bicos de pulverização para o abatimento de poeira no ramo da mineração. Como cada bico produz, devido a efeitos construtivos, diferentes tipos de projeção de gotículas variando, entre outras coisas, o tamanho das gotas, a velocidade de impacto dessas e o formato da zona de impacto podendo ser tipo cone, cone oco, leque e outras, a avaliação da eficiência desses bicos pode ser realizada em testes que simulem condições reais de mineração como objetivo de medir quantitativamente e objetivamente o sucesso ou insucesso de cada tipo de bico para os diferentes tipos de minérios.

Roberts et al. (2016) exemplificam o abatimento por impacto direto, foco do presente trabalho. Os autores citam que há uma ligação entre a relação de tamanho entre poeira e gota a eficiência no impacto entre as mesmas. Esse fato é descrito na figura 1. Nota-se que quando a gotícula é muito maior que a partícula de poeira as linhas de corrente carregam a poeira e o impacto é impossibilitado, o que não ocorre para uma relação parecida de

tamanho entre elas. Isto confirma a importância da caracterização das emissões para melhor compor o processo de solução via pulverização.

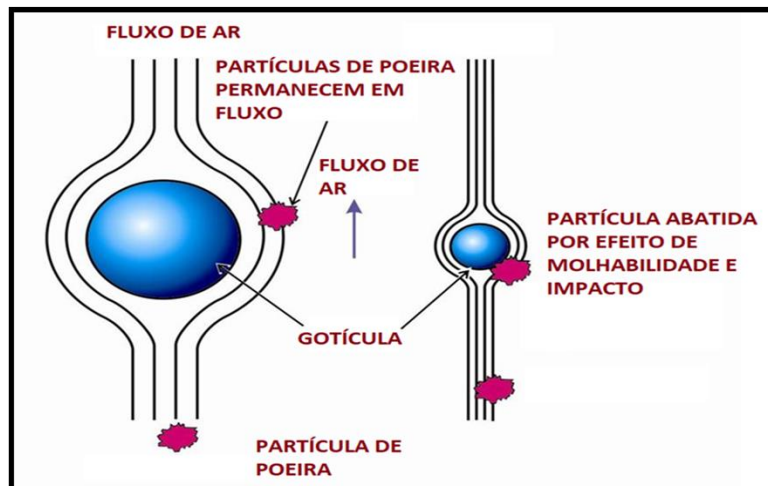


Figura 1. Relação entre tamanho da gota e da poeira interferem no processo na geração de impacto entre elas. Fonte: Adaptado de Roberts *et al.* (2016)

Aboalez et al. (2024) destaca que a utilidade de ambientes especializados, como túneis de vento de poeira, pois, tais configurações controladas podem refinar estratégias de controle de poeira ao replicar de perto as condições na indústria, melhorando assim os padrões das operações de mineração. Os autores defendem que ambientes de teste que espelhem de perto as condições reais das situações de manuseio mineral tornam túneis de vento uma abordagem representativa para estudar a dinâmica do abatimento da poeira.

Xu et al. (2018) explanam que a eficiência da supressão de poeira é uma função complexa de muitos fatores que não são tão fáceis de mensurar em campo e, por isso, testes simulados de túnel de vento de laboratório fornecem um ambiente controlado podem ser realizados de forma fácil e econômica. Os autores destacam que um túnel de vento para este fim é geralmente projetado contendo uma seção de teste para confinar a propagação de poeira, um ventilador de sopro ou exaustão para fornecer fluxo de ar, um gerador de poeira de poeira, o aparelho de pulverização de água, o equipamento de monitoramento de poeira e uma unidade de coleta de poeira emitida. Este esquema é mostrado na figura 2.

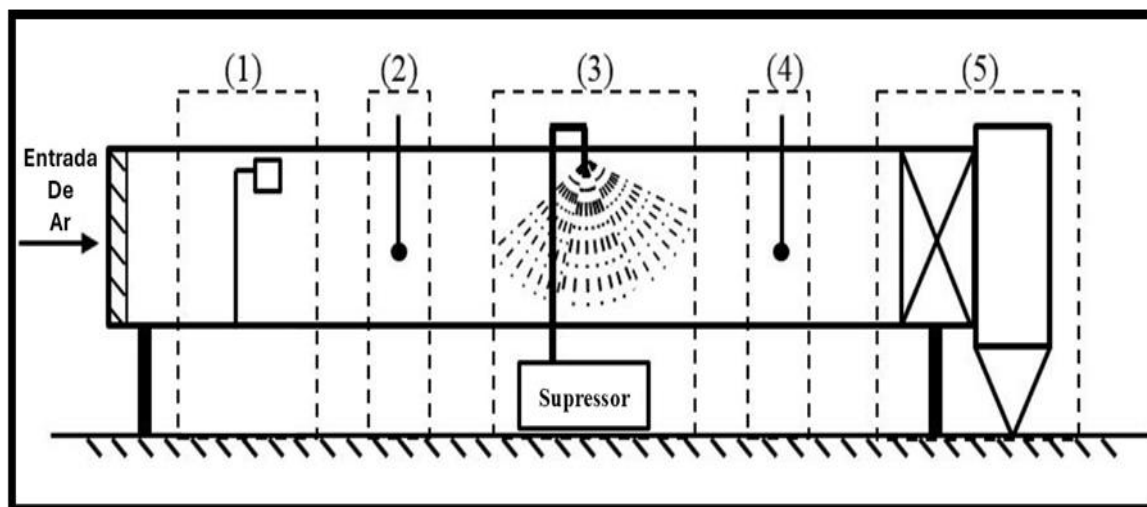


Figura 2. Esquema típico de um túnel usado para estudo de abatimento de poeira via sprays. (1) Geração de poeira, (2) e (4) Amostragem, (3) bicos de spray e (5) coletor de poeira não abatida. Fonte: Adaptado de Xu *et al.* (2018)

Os mesmos ratificam que os túneis de vento são ferramentas importantes para a ciência e largamente usados na avaliação da eficiência de bicos de pulverização no abatimento de poeira, facilitando a influência da geometria dos bicos, suas condições operacionais, sua capacidade de gerar gotas de tamanhos suficientemente pequenas para efetividade do abatimento, as propriedades do fluido e sua interação com as partículas, e a própria dinâmica das partículas em seu movimento de suspensão e transporte.

Xu *et al.* (2019) usaram um túnel de vento para estudar a influência da concentração de diferentes surfactantes na eficiência de um sistema de pulverização no controle de poeira. Guo *et al.* (2020) fizeram uso de um túnel de vento para medir certos parâmetros dos bicos de pulverização, incluindo as faixas efetivas de pulverização, ângulos de atomização e taxas de fluxo sob várias condições de velocidade de fluxo. Klenk (2012), usou um túnel para testar 70 tipos diferentes de bicos de pulverização e medir suas eficiências no abatimento poeira. Avaliou diferentes vazões e a estabilidade do cone de pulverização nas velocidades de vento de 4 m/s e 6 m/s. Swanson e Langefeld (2015) usaram um túnel de vento com controle psicrométrico para recriar as condições subterrâneas de uma mina subterrânea. Um túnel de vento é usado por Zhao *et al.* (2021) para avaliação comparativa entre estes dinâmicos e estáticos do efeito de soluções de controle de poeira. Chang *et al.* (2019) usaram um túnel de vento para realizar a avaliação da eficiência de diferentes soluções aditivas de mercado preparadas para atuarem como potencializadores do efeito de controle de poeira por meio de bicos de *spray*. O objetivo deste estudo é, com base no estado da arte, construir um túnel de vento e um protocolo de

ensaios que deem suporte na avaliação de eficiência de bicos de pulverização no abatimento de poeira gerada durante o manuseio de grãos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O túnel escolhido para compor o laboratório foi baseada em uma escala 1:2 do estudo de Zhou et al. (2017) alterando-se, porém o modelo de controle de velocidade por meio de um exaustor de velocidade variável semelhante ao estudo de Xu et al. (2019). A geração de poeira é formada pela queda livre dos grãos com a formação da poeira que é succionada para a seção de testes para a avaliação de abatimento causada por cada um dos bicos de interesse. O esboço inicial de idealização está mostrado na figura 3.

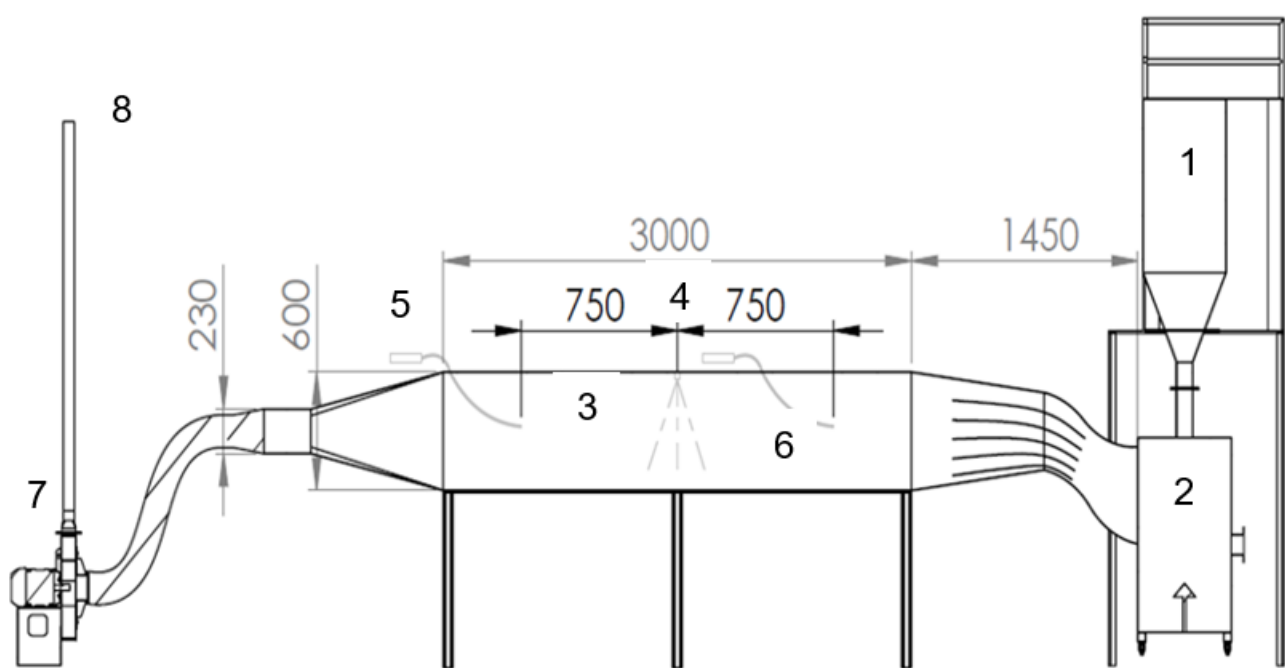


Figura 3. Desenho esquemático com medidas (mm) do túnel de vento. (1) Silo alimentação. (2) Caixa de geração de poeira. (3) Seção de teste. (4) Bico alimentado por máquina de spray. (5) Contador de partícula 2 [com aquecimento]. (6) Contador de partícula 1 [sem aquecimento]. (7) Exaustor controlado por inversor de frequência. (8) Exaustão e controle de poeira.

Para gerar a poeira foi construída uma caixa de poeira de 0,36 m³ de volume. A mesma é alimentada por um silo com 0,22 m³ de autonomia. O material cai por acionamento de uma válvula do tipo guilhotina com uma altura de queda de 0,90 m. Um cone de metal de espera simula o ângulo de repouso do material que se empilha em uma condição real de manuseio. O resultado da queda é uma nuvem de poeira que se forma e é aspirada para

a seção de teste por um exaustor que possui uma capacidade de vazão máxima de 0,50 m³/s. O mesmo é acionado por um inversor de frequência que permite a modulação da velocidade de acordo com o diâmetro de interesse para o ensaio (Figura 4)

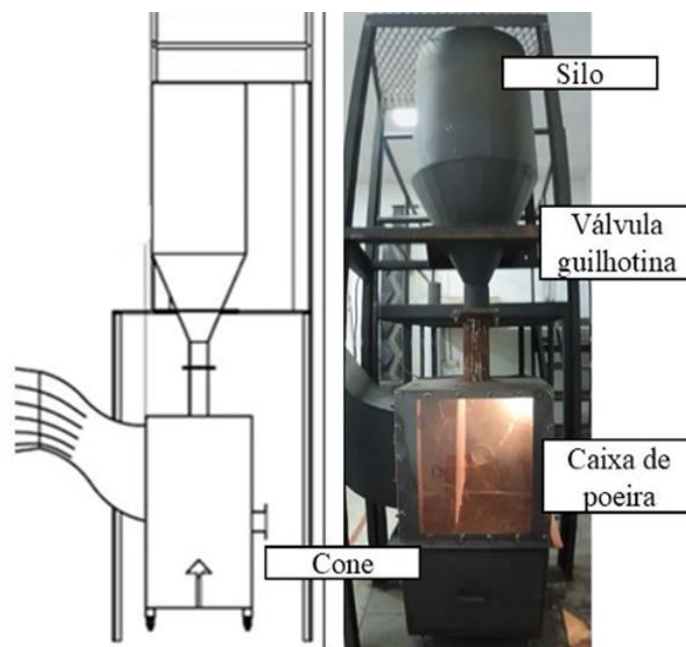


Figura 4. Sistema de geração de poeira.

O comprimento da seção de teste é de 3 metros com uma seção quadrada de 0,6 metros de lado. O ponto de fixação dos bicos a serem ensaiados é no centro da seção de teste e as sondas de captação do fluxo de poeira ficam equidistantes ao bico em 0,75 metros sendo uma anterior ao bico e outra posterior para fins de mensuração percentual da eficiência. A seção de teste possui portas de acesso em acrílico que mantêm o estanque e uma iluminação interna em LED para visualizar as condições do ensaio. Além disso, drenos para escoamento da água e limpeza antes e durante os ensaios realizados foram instalados. Os bicos possuem uma ação transversal ao perfil de escoamento da nuvem de poeira gerada na caixa de poeira (Figura 5).



Figura 5. Seção de teste. (1) Sonda com aquecimento. (2) Sonda sem Aquecimento. (3) Bico de pulverização. (4) Janela de visualização.

Para a avaliação da eficiência dos bicos de spray, dois contadores de partículas foram usados sendo ambos do modelo CPT-100 (Figura 6) da INSTRUTHERM. O mesmo possui as características técnicas necessárias para a análise, como a capacidade de detectar partículas em seis diferentes tamanhos, sendo eles, 0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.5 μm , 5.0 μm e 10.0 μm . Possui também uma taxa de fluxo de amostragem ajustável de 0.1 a 2.83 litros por minuto (LPM), garantindo precisão na coleta de amostras de partículas, além de uma margem de erro reduzida, ideal para aplicações críticas onde a precisão na contagem de partículas. Os mesmos estavam externos ao ambiente de teste da bancada e conectados por mangueiras às sondas de captação de 10mm de diâmetro.



Figura 6. Contador de partículas CPT-100.

Como o contador de partículas contabiliza gotas como partículas, fez-se uma adaptação na sonda após o abatimento (que sofre influência do *spray*) como aquecimento resistivo dentro de condições específicas que proporcionassem a evaporação das gotículas antes de passarem pelo contador de partículas. A figuras 7 mostra este implemento na seção de teste. Nota-se, pelos resultados, que as condições de aquecimento nas duas velocidades são retornadas as condições de base. Este resultado mostra que é possível esperar realização dos ensaios sem a interferência da contabilização das gotas do *spray* como partículas

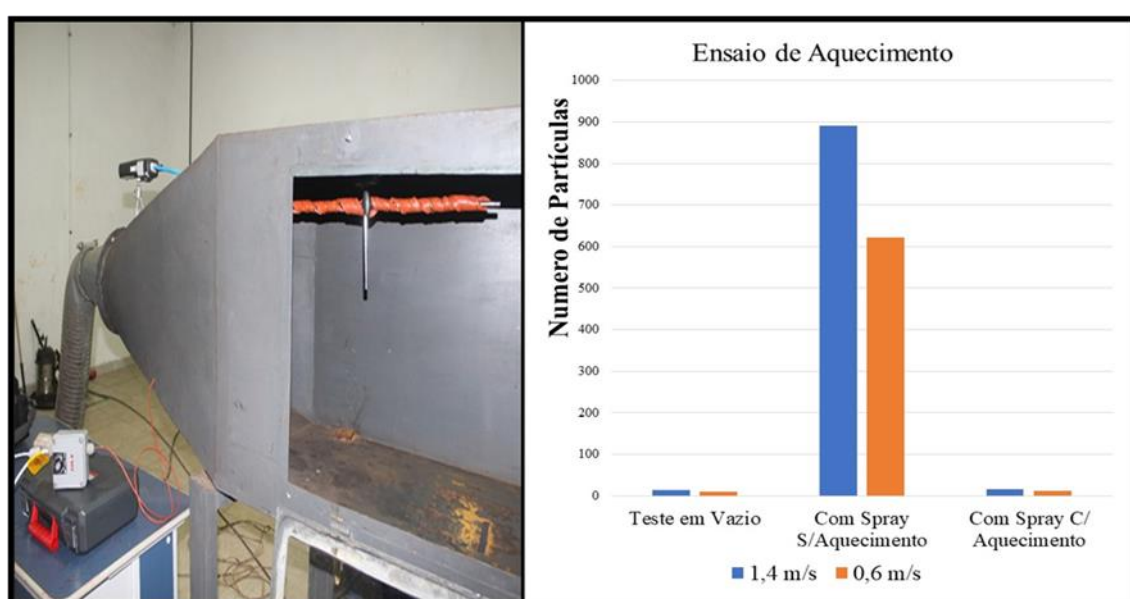


Figura 7. Evaporação no sistema de amostragem e contagem de partículas.

Para o controle dos parâmetros operacionais dos bicos foi adotada a máquina de *spray* da Spraying Systems modelo AutoJet1550+ que modula vazão e pressão e auxilia na utilização e variação de diferentes tipos de bicos de *spray*, incluído o atomizado a ar. A mesma, descrita na figura 3.5, possui a capacidade de operar o fluido supressor até a pressão de 5 bar o que corrobora com o intuito de geração de uma função de eficiência dos bicos testados em função da pressão de operação. O equipamento garante testes em diferentes condições operacionais e, consequentemente, diferentes ângulos de *spray* e tamanho de gotas. A mesma é alimentada por um tanque de armazenamento de supressor que, neste estágio da pesquisa é a água conforme descrito na figura 8.

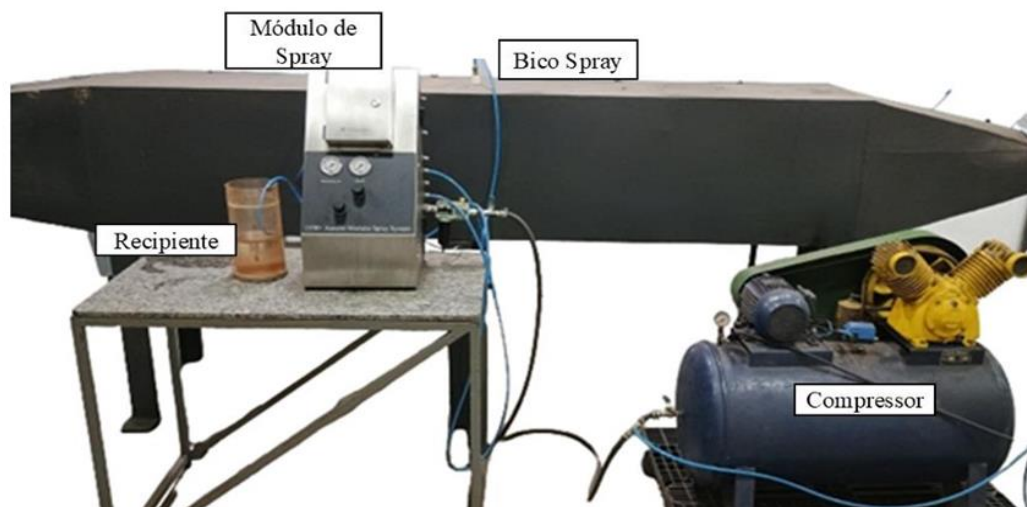


Figura 8. Sistema de controle de pulverização.

A metodologia do ensaio consiste em se movimentar 2 kg de material previamente seco simulando o manuseio mineral em campo. Os materiais usados foram o pellet feed e o sínter feed nas mesmas condições granulares de recebimento. Os mesmos foram ensaiados sem umidificação com o procedimento de secagem de 24 horas a 110°C para enfim serem movimentados.

As velocidades são de 0,6 m/s e 1,4 m/s, que equivalem a menor velocidade de captação de uma partícula de 50µm de pellet feed (Granel mais pesado) e à máxima velocidade alcançada na seção de teste do túnel de vento, respectivamente. A posição das sondas dos contadores localizadas nos pontos críticos de emissão para cada uma dessas velocidades. Os ensaios são realizados testando a eficiência de cada bico para as pressões de 2 bar, 3 bar e 5 bar. Para cada pressão foi realizada ensaios em triplicata. Antes de cada ensaio o túnel era cuidadosamente limpo e aspirado e a quantidade de partículas PM10 era medida antes do ensaio sendo que estas deviam estar obrigatoriamente abaixo de 10, caso não, a limpeza era refeita até a esta condição ser atendida. A eficiência foi medida pela diminuição percentual de concentração de poeira medidas pelos contadores de partículas antes e depois da atuação do spray. Um termopar indicava a temperatura do aquecimento. A figura 9 mostra de forma esquemática esta metodologia.

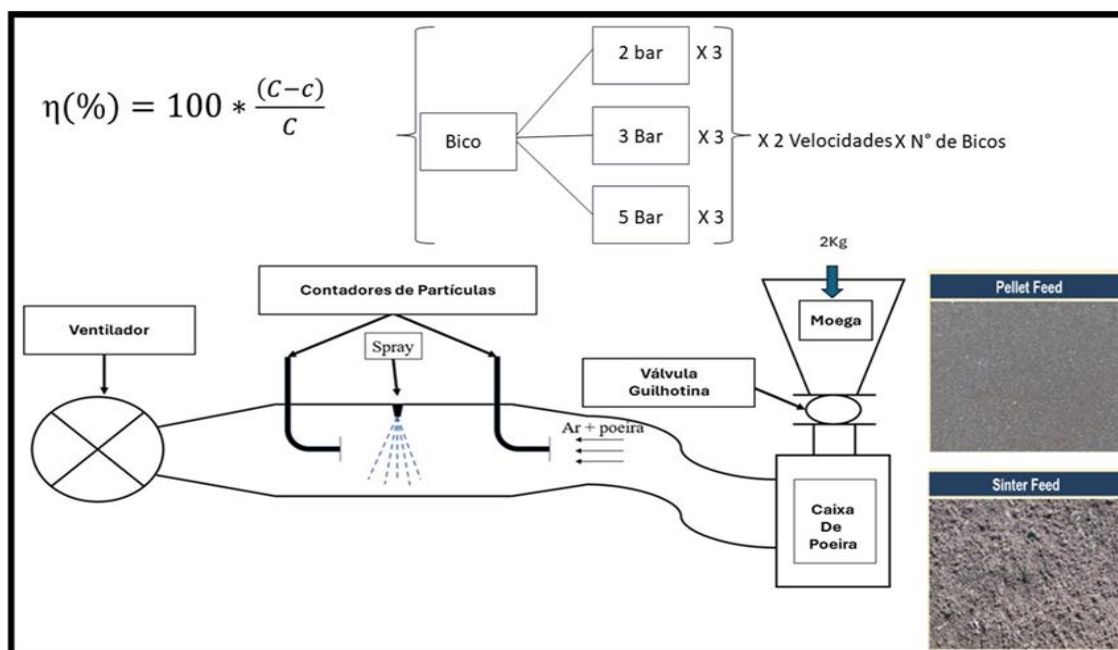


Figura 9. Diagrama esquemático da metodologia de ensaio de eficiência de bicos de spray em um túnel de vento

Para o cumprimento das premissas desta metodologia segue-se os seguintes passos para a execução do ensaio (Figura 10).

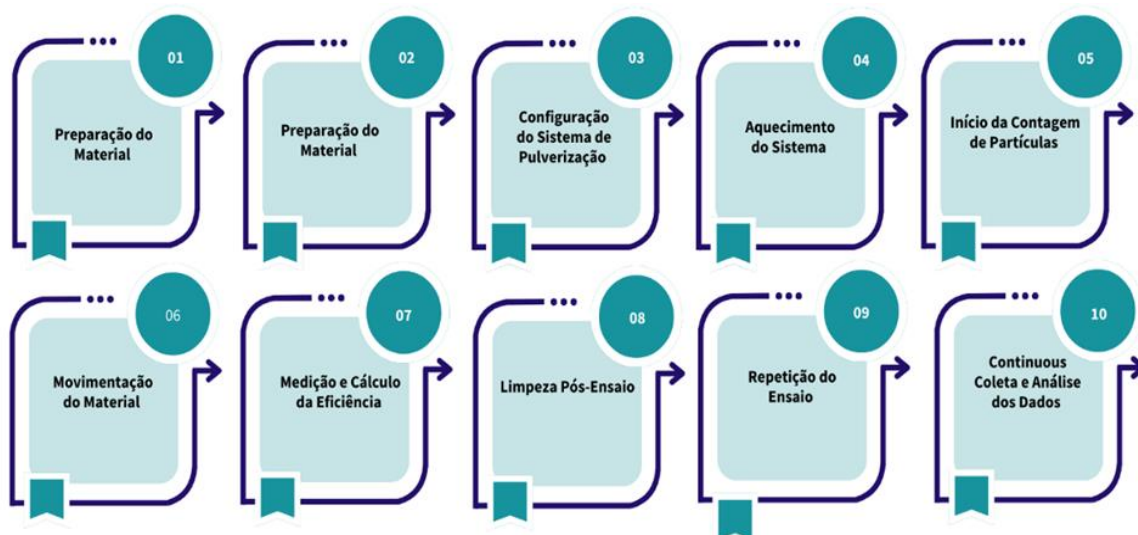


Figura 10. Sequência de atividades da metodologia de ensaio.

Para a aplicação da metodologia criada foram separados cinco tipos de bicos com características próprias para abater poeira nas mesmas condições. Espera-se avaliar se o túnel é capaz de comparar, nestas circunstâncias, a eficiência de cada bico para condições operacionais diferentes, 2 bar, 3 bar e 5 bar. Ao mesmo tempo, espera-se ter um apanhado

comparativo entre os bicos para direcionar os próximos trabalhos nesta linha de pesquisa. A figura 11 mostra os bicos escolhidos para os ensaios.



Figura 11. Bicos utilizados nos ensaios.

3. RESULTADOS

A figura 12 mostra o gráfico que compara os melhores desempenhos de cinco tipos de bicos na eficiência de abatimento de poeira do pellet feed em duas velocidades de transporte de partículas (1,4 m/s e 0,6 m/s), considerando uma pressão de água de 5 bar. É possível concluir que se destaca o Bico Atomizado (96%) e o Bico Névoa (92%) como os mais eficientes. Este comportamento reflete a maior facilidade de abatimento em velocidades menores de transporte de partículas e ao tamanho de gotas gerado em sua operação. Para a velocidade de 1,4 m/s, todos apresentam um desempenho inferior, com eficiências variando de 30% (Cone Cheio) a 96% (Bico Atomizado). A diferença de desempenho é mais evidente em bicos menos eficientes, como o Cone Cheio. Muito em função de que, a velocidades maiores, a nuvem de poeira fica menos tempo sob o efeito da ação do spray produzido pela ação dos bicos.

De uma forma geral o Bico Atomizado é o mais eficiente em ambas as velocidades e o Cone Cheio tem o menor desempenho relativo em ambas as condições, com eficiência máxima de 40%. Destaca-se a superioridade dos bicos Atomizado e Névoa para o controle de poeira, especialmente em condições de menor velocidade de transporte.

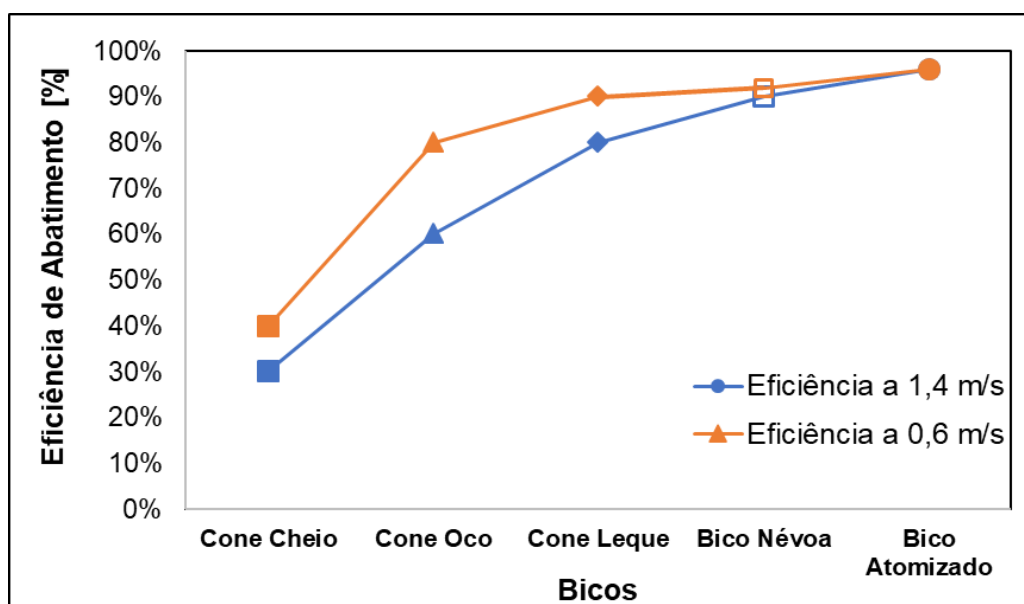


Figura 12. Análise comparativa da eficiência do melhor desempenho de cada bico em cada uma das velocidades de emissão para o pellet feed.

O gráfico da figura 13 compara a eficiência de abatimento de partículas em diferentes tipos de bicos para duas velocidades de transporte de poeira (1,4 m/s e 0,6 m/s) e destaca os melhores desempenhos de cada bico para o sínter feed. Nota-se que a eficiência é consistentemente maior para a velocidade de 0,6 m/s em todos os bicos, indicando que velocidades mais baixas favorecem a captura de partículas.

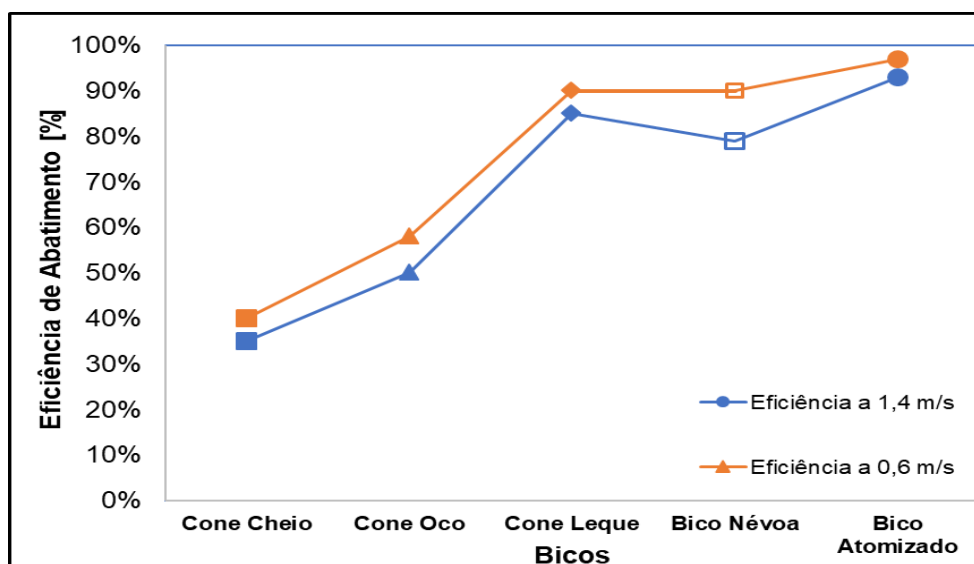


Figura 13. Análise comparativa da eficiência do melhor desempenho de cada bico em cada uma das velocidades de emissão para o sínter feed.

É de destaque que, usando o protocolo, o bico cone cheio, apresenta o pior desempenho, com eficiência máxima de aproximadamente 40% para 0,6 m/s e 35% para 1,4 m/s. Bicos mais sofisticados, como o cone leque, Bico Névoa e Bico Atomizado, se destacam em ambas as velocidades, indicando maior eficácia na atomização e dispersão das partículas. A eficiência tende a melhorar significativamente com a redução da velocidade do transporte de poeira.

4. DISCUSSÃO

Os resultados mostram que o tipo de bico e da velocidade de transporte das partículas na eficiência de abatimento de poeira do pellet feed e do sínter feed possuem uma relevância no processo de abatimento. Observa-se que os bico atomizado e o bico névoa apresentam maior eficiência para ambas as velocidades de transporte, alcançando 96% e 92%, respectivamente, o que pode estar relacionado ao menor tamanho das gotas.

Para a velocidade de 1,4 m/s, os bicos apresentam um desempenho inferior em comparação à condição de 0,6 m/s. Esse comportamento pode estar relacionado ao menor tempo de permanência da nuvem de poeira na região de atuação dos sprays, reduzindo a interação entre as partículas de poeira e as gotas de água.

Os resultados para o sínter feed apresentam tendência semelhante ao pellet feed: a eficiência de abatimento é maior para velocidades mais baixas. O bico Cone Cheio registrou os menores índices, atingindo aproximadamente 40% para 0,6 m/s e 35% para 1,4 m/s. Em contrapartida, os bicos Cone Leque, Névoa e Atomizado apresentaram eficiências mais elevadas, indicando maior capacidade de atomização e dispersão das gotas, favorecendo a captura das partículas em suspensão.

Os resultados indicam que o desempenho dos bicos pulverizadores está relacionado à velocidade de transporte da poeira e à característica da pulverização gerada. O Bico atomizado obteve os maiores índices de eficiência em todas as condições testadas, enquanto o cone cheio apresentou os menores valores. A seleção do tipo de bico deve considerar as condições específicas do processo para otimizar o abatimento de poeira e reduzir emissões para o ambiente.

Entende-se, para fins de aplicação prática, que uma estratégia combinada que vise diminuir as velocidades de movimento dos granéis, quando possível, e a escolha de bicos com a capacidade de produzir gotas correlatas com os diâmetros das partículas, se

mostram como meios de aumentar a eficiência de controle de poeira no manuseio mineral.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Construiu-se um túnel experimental capaz de avaliar diferentes bicos em condições operacionais diferenciadas de pressão. Entende-se que este túnel é um passo importante para o início de produções científicas que endossarão mecanismos de supressão úmida como uma fonte de entendimento no laboratório de fluidodinâmica e particulados.

Desenvolveu-se uma metodologia para medição da eficiência de bicos de pulverização com base nas condições operacionais do túnel dentro de seus limites operacionais e das características inerentes ao minério de ferro. Este protocolo é apenas a primeira fase do desenvolvimento da metodologia que se sustentará em outras aplicações de interesse na área, como o uso dos surfactantes como mecanismos potencializadores da ação dinâmica dos sprays gerados pelos bicos em suas características específicas.

Realizou-se testes de desempenho utilizando uma variedade de bicos de spray disponíveis no mercado, aplicando diferentes pressões atuando em velocidades variáveis. Os testes também revelaram necessidades comparativas extras como, o consumo energético, hídrico e análise comparativa de custo.

Analizou-se os dados obtidos durante os testes para avaliar a eficiência relativa dos bicos de pulverização no controle da emissão de poeira de minério de ferro. Estes dados comparativos fortalece a qualidade do protocolo de ensaio criado para o túnel e ao mesmo tempo espaços de melhora para encorpar os resultados a serem obtidos no futuro.

Como limitação à pesquisa, estão o tempo de coleta de 15 segundos, a queda abrupta do material gerando um pico de geração de material e o range de velocidade baixas que não abrangem outras condições de transporte de poeira geradas durante o manuseio.

Entende-se, porém, que o túnel de abatimento permite realizar experimentos que modelam em escala as condições de geração e supressão de poeira de minério de ferro e outros granéis. Desta forma, obtém-se uma ferramenta útil e funcional adquirida pelo laboratório de fluidodinâmica e particulados, para entender e desenvolver novas técnicas em casos reais da indústria de materiais a granel.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à VALE pelo financiamento e apoio técnico aos resultados alcançados por esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABOELEZZ, A.; BELTRAN, M.; HARGATHER, M. J.; HASSANALIAN, M.; ROGHANCHI, P. Comprehensive design and performance validation of a wind tunnel for advanced respirable dust deposition investigations. **Journal of Hazardous Materials**, v. 478, p. 135516, 2024.
- ABOELEZZ, A.; BELTRAN, M.; HARGATHER, M. J.; HASSANALIAN, M.; ROGHANCHI, P. Comprehensive design and performance validation of a wind tunnel for advanced respirable dust deposition investigations. **Journal of Hazardous Materials**, v. 478, p. 135516, 2024.
- CASTRO, M. M. et al. Experimento em escala da emissão de material particulado no processo de empilhamento de minério de ferro. *Revista Internacional de Ciências*, v. 12, n. 3, p. 250-268, 2022.
- CHANG, K.-C.; KUO, J.-W.; CHUNG, Y.-D. Improved design of dust test chamber for uniform distribution of dust sedimentation rate. **Journal of the Chinese Institute of Engineers**, v. 42, n. 3, p. 236-243, 2019.
- GUO, C. et al. A study of the spray atomization and suppression of tunnel dust pollution based on a CFD-based simulation. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 123632, 2020.
- KLENK, U.; PAREY, M.; SCHMIDT, E. **Use of water droplets and additives for dust control**. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal, 2012.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **A extensão da cadeia produtiva da economia mineral do PIB brasileiro**. Brasília: Repositório do Conhecimento Ipea, 2023.
- ROBERTS, J. M.; WYPYCH, P. M. Research into improving the efficiency of water spraying airborne dust control techniques in the iron ore industry. Perth, 2017.
- SWANSON, J.-G.; LANGEFELD, O. Fundamental research in water spray systems for dust control. **Mining Technology**, v. 124, n. 2, p. 78-82, 2015.
- XU, G.; CHEN, Y.; EKSTEEN, J.; XU, J. Surfactant-aided coal dust suppression: a review of evaluation methods and influencing factors. *Science of the Total Environment*, v. 639, p. 1060-1076, 2018.
- XU, C. et al. Multi-factor numerical simulation study on spray dust suppression device in coal mining process. **Energy**, v. 182, p. 544-558, 2019.
- ZHAO, Z. et al. Comparison of the coal dust suppression performance of surfactants using static test and dynamic test. *Journal of Cleaner Production*, v. 328, p. 129633, 2021.
- ZHOU, Q.; QIN, B.; MA, D.; JIANG, N. Novel technology for synergetic dust suppression using surfactant-magnetized water in underground coal mines. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 109, p. 631-638, 2017.