



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

DANILO SILVA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE TÚNEL DE VENTO PARA AVALIAÇÃO DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO
NO ABATIMENTO DE POEIRA

Tucuruí-PA

2024

DANILO SILVA SANTOS

**DESENVOLVIMENTO DE TUNEL DE VENTO PARA
AVALIAÇÃO DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO NO ABATIMENTO
DE POEIRA**

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: Engenharias 2

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Tucuruí-PA

2024

FICHA CATALOGRÁFICA (Expedida pelo sistema on-line da biblioteca)

Acesse <http://bcficat.ufpa.br/> para gerar a ficha catalográfica

Deve ser impressa no verso da folha de rosto

DANILO SILVA SANTOS

DESENVOLVIMENTO DE TÚNEL DE VENTO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO NO ABATIMENTO DE POEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energ 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: Engenharias 2.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Aprovada em 20 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente



ANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA

Data: 10/03/2025 12:56:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Doutor / André Luiz Amarante Mesquita / UFPA - Orientador

Documento assinado digitalmente



MARCIO FERREIRA MARTINS

Data: 11/03/2025 10:42:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Doutor / Márcio Ferreira Martins / UFES, Membro Externo

Documento assinado digitalmente



DAVI EDSON SALES E SOUZA

Data: 11/03/2025 19:39:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Doutor/ Davi Edson Sales e Souza / Membro Interno PPGINDE

AUTOR: Danilo Silva Santos.

TÍTULO: DESENVOLVIMENTO DE TÚNEL DE VENTO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO NO ABATIMENTO DE POEIRA

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Danilo Silva Santos.

Rua Nova 1, no 198, Bairro Novo Horizonte.

68.488-000 Breu Branco – PA – Brasil.

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Biblioteca Central / UFPA, Belém – PA

S586d SILVA SANTOS, DANILO

DESENVOLVIMENTO DE TÚNEL DE VENTO PARA
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BICOS DE
PULVERIZAÇÃO NO ABATIMENTO DE POEIRA / DANILO
SILVA SANTOS. — 2024.

91 f. : il. color. 90 p.

Orientador(a): Prof. Dr. Andre Luiz Amarante Mesquita
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Mestrado Profissional em Computação Aplicada, Tucuruí,
2024.

1. Túnel. 2. Bicos. 3. Pulverização. 4. Poeira. 5.

Supressão. I. Título.

CDD 620

Aos meus amados pais, Domingos Louredo dos Santos e Francisca Pereira da Silva, e a minha amada esposa Mayana Santos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Jeová Deus, o centro e o fundamento de tudo em minha vida, por renovar a cada momento a minha força e a disposição e pelo discernimento concedido ao longo dessa jornada.

A minha esposa Mayana Coelho Silva Santos que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me apoiando nos momentos de dificuldades, e ajudando-me no que podia para o alcance dessa realização.

Quero agradecer também aos meus pais Domingos Louredo dos Santos e Francisca Pereira da Silva, que me criaram sobre a premissa de trabalhar honestamente e batalhar pelas minhas conquistas.

Ao meu orientador, prof. Dr. André Mesquita que acreditou em mim; ouvindo pacientemente as minhas considerações, partilhando comigo as suas ideias, conhecimento e experiências além de me motivar. Quero expressar o meu reconhecimento e admiração pela sua competência profissional e minha gratidão pela sua amizade, por ser um profissional extremamente qualificado e pela forma humana que conduziu minha orientação, se tornando um tutor e um amigo para a vida toda.

A todos os professores do PPGINDE pelas excelentes contribuições acadêmicas a e toda a instituição da UFPA. Um agradecimento especial ao Prof Douglas Garcia que, na condição de Diretor do PPGINDE nunca desistiu de me ver mestre.

Agradeço também a VALE por acreditar neste espaço acadêmico para produzir soluções com base em pesquisa para mitigação dos inconvenientes relacionados com o manuseio do minério assim como pelo financiamento da estrutura necessária para se alcançar resultados técnicos e acadêmicos de alto nível.

Agradeço também aos meus companheiros do Grupo FluidPar, juntamente comigo, lutaram para estar até aqui, finalizando o Mestrado. Mas destaque, em especial, agradecimentos a Ronaldo Jr, Ryan, Emanuel, Evily, Arthur, Artur, Pedro, Gabriel, Maycon, Chico, Vilhena, Baia, Baena, Madalena, Neto, Armando, Ermenson, Davi, Jessé, Wassim, Luiz Paulo, Filipe e tantos outros que contribuíram significativamente para a construção do saber embutido neste trabalho.

"Estou tranquilo, calmo, alerta, atento e tenho plena consciência do meu espaço e daqueles que estão a minha volta. Estou focado no essencial e alheio a todo resto. O futuro é incerto, mas não estou preocupado. Vou contar com os mais próximos de mim. Vou compartilhar seus problemas como fazem com os meus. Vou viver e vou amar"

Jack Campbell

Ad Astra

RESUMO

A mineração é extremamente importante econômica e socialmente para a indústria, com destaque para o minério de ferro, mas, junto com seus benefícios, acompanham impactos ambientais gerados de diferentes formas, como a poeira. Tal inconveniente tem causado transtornos aos empreendimentos mineiros, como parada de produção e pesadas multas, assim como problemas para as pessoas que trabalham nas empresas e comunidades dos entornos, devido aos problemas de saúde associados com a inalação da poeira e sujidade dos ambientes tornando-os insalubres e desvalorizados. Mecanismos de controle de poeira têm sido largamente estudados e um destes é o controle de poeira utilizando pulverização de soluções supressoras. Estudar a eficiência dos bicos de sprays se torna de grande importância e testes em bancadas atuam como meios eficientes de entender o mecanismo de abatimento de poeira de minérios. Tem sido comum pesquisas utilizar tuneis de vento. Desta forma foi construído um túnel capaz de avaliar cinco bicos diferentes e suas eficiências na supressão de pellet feed e sinter feed em duas velocidades a diferentes pressões de água. Concluiu-se que o túnel é capaz, por meio da metodologia usada, de avaliar e comparar o melhor bico demonstrando ser uma ferramenta importante na consolidação deste conhecimento no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados.

Palavras chaves: 1. Túnel. 2. Bicos. 3. Pulverização. 4. Poeira. 5. Supressão.

ABSTRACT

Mining is extremely important economically and socially for the industry, especially iron ore, but along with its benefits, it also has environmental impacts generated in different ways, such as dust. This inconvenience has caused disruptions to mining enterprises, such as production shutdowns and heavy fines, as well as problems for people who work in the companies and surrounding communities, due to health problems associated with inhaling dust and dirt from the environments, making them unhealthy and devalued. Dust control mechanisms have been widely studied and one of these is dust control using spraying of suppressant solutions. Studying the efficiency of spray nozzles has become of great importance and bench tests act as efficient means of understanding the mechanism of dust abatement from minerals. Research has been common to use wind tunnels. Thus, a tunnel was built capable of evaluating 5 different nozzles and their efficiencies in suppressing pellet feed and sinter feed at two speeds and different water pressures. It was concluded that the tunnel is capable, through the methodology used, of evaluating and comparing the best nozzle, demonstrating that it is an important tool in consolidating this knowledge in the Fluid Dynamics and Particulates Laboratory.

Key words: 1. Tunnel. 2. Nozzles. 3. Spraying. 4. Dust. 5. Suppression

SÚMARIO

1	Introdução	13
1.1	Considerações Gerais	13
1.2	Justificativa.....	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Estrutura do Trabalho.....	15
2	Fundamentos e revisão bibliográfica	17
2.1	Caracterização da Poeira de Minério de Ferro	17
2.1.1	Velocidade terminal de uma partícula	20
2.1.2	Impactos ambientais e à saúde associados à exposição à poeira de minério de ferro	24
2.1.3	Métodos tradicionais de controle de poeira.....	26
2.2	Tecnologia de Pulverização de Bicos	27
2.2.1	Princípios de funcionamento dos bicos de pulverização	28
2.2.2	Mecanismo de supressão de poeira.....	31
2.2.3	Tipos de bicos de pulverização utilizados no controle de poeira em operações de mineração	34
2.3	Fatores que influenciam a eficiência dos bicos de pulverização no controle de poeira.	37
2.4	Uso de Túneis de Vento Para Avaliação de Eficiência de Bicos	39
2.4.1	Revisão de estudos anteriores.....	41
3	ESTRUTURA DA BANCADA	47
3.1	Seção de Geração de Poeira	48
3.2	Seção de Teste	48
3.2.1	Contador de Partícula.....	49
3.3	Seção de controle de Spray.....	50
4	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ENSAIADOS	52
4.1	Recebimento e Secagem.....	52
4.2	Granulometria.....	53
4.3	Massa específica aparente.	54
4.4	Massa específica real	56

5	METODO DO ENSAIO DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO	57
5.1	Velocidades de Testes	58
5.2	Simulação CFD nas Velocidades de Ensaio.....	60
5.3	Teste de Emissão.....	62
5.4	Teste de Contagem de Partículas na Zona de Pulverização da Seção de Teste	63
5.5	Protocolo de Ensaio	67
6	resultados e discussões	70
6.1	Emissão de Pellet Feed	71
6.2	Emissão de Sínter Feed	76
7	CONCLUSÃO	82
7.1	Sugestões para trabalhos futuros	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

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.

O controle eficaz da poeira de minério de ferro torna-se, portanto, uma preocupação crucial no contexto fabril. A poeira gerada durante o manuseio do minério não apenas contribui para a poluição atmosférica, afetando a qualidade do ar e os ecossistemas circundantes, mas também apresenta riscos significativos para a saúde ocupacional dos trabalhadores da indústria. Além disso, a presença de poeira pode acelerar o desgaste de máquinas e equipamentos, resultando em custos adicionais de manutenção e reparo. Nesse sentido, o emprego de tecnologias de controle de poeira, como os bicos de spray, emerge como uma estratégia essencial para mitigar esses impactos adversos.

O uso de túneis experimentais contribui significativamente para a análise da eficiência de bicos de spray no controle de poeira de minério de ferro. Esses túneis permitem a criação de um ambiente controlado e replicável, onde é possível simular condições reais de operação, incluindo velocidades do vento, características das partículas de poeira e padrões de dispersão. Ao padronizar essas condições, os pesquisadores podem realizar testes comparativos entre diferentes tipos de bicos de pulverização, avaliando sua capacidade de suprimir a emissão de poeira em cenários específicos de manuseio de minério de ferro. Além disso, os túneis experimentais permitem a coleta de dados precisos e

reprodutíveis, facilitando a análise estatística e a interpretação dos resultados. Dessa forma, o uso de túneis contribui para um melhor entendimento da eficiência dos bicos de spray e para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de controle de poeira na indústria da mineração.

1.2 Justificativa

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.

Estudar métodos técnica e economicamente viáveis para a realização da supressão de poeira é imperativo.

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. 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 de interesse comercial no Brasil.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Construir um túnel experimental para avaliação da eficiência de bicos de pulverização no controle da emissão de poeira durante o manuseio de minério de ferro.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Simular as condições de operação encontradas em ambientes industriais capaz de gerar o arraste de poeira de minério.
- Desenvolver uma metodologia para medição da eficiência de bicos de pulverização.
- Realizar testes de desempenho utilizando uma variedade de bicos de spray disponíveis no mercado, aplicando diferentes pressões atuando em velocidades variáveis
- Avaliar a eficiência relativa dos bicos de pulverização no controle da emissão de poeira de minério de ferro.

1.4 Estrutura do Trabalho

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

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica que, inicialmente realiza uma revisão da fundamentação e impacto da emissão de particulados, da natureza do fenômeno de abatimento via sprays e do uso de túneis de vento para avaliação de eficiência de bicos de spray para este fim.

No capítulo 3 é feita a descrição do desenvolvimento do túnel de teste de avaliação de eficiência de bicos de spray. E realizado estudos dos limites de velocidade da seção de teste assim como sua comparação com as características físicas e geométricas das partículas de interesse. Avalia-se a construção de um perfil de escoamento em duas velocidades específicas assim como a construção de um perfil de emissão. Mostrou-se também como foi possível realizar a contabilização das partículas de poeira sem o efeito de somatória na contabilização das gotas geradas pelo spray.

No capítulo 4 observa-se a caracterização mineral dos granéis para fins de comissionamento da bancada e análise da construção metodológica que seria usada nos ensaios de avaliação dos bicos.

No capítulo 5 expõe-se a metodologia dos ensaios e a forma em que a mesma foi construída para garantir os resultados dos ensaios.

No capítulo 6 são apresentados os resultados e discussões resultantes dos ensaios variando a pressão dos bicos e a velocidade de transporte da nuvem de poeira gerada em seu manuseio.

Finalmente, o capítulo 7 é a conclusão do trabalho, são apresentados também algumas propostas futuras, que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho.

2 FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na indústria de minério de ferro, as emissões de poeira geradas durante o manuseio são um problema presente que precisa ser tratado. Os problemas associados ao excesso de emissões de poeira incluem implicações para a saúde, poluição ambiental, perda de materiais e deterioração dos equipamentos. O moral e a produtividade dos trabalhadores também podem ser afetado negativamente pelo excesso de poeira no local de trabalho e, claro, existe a importante necessidade de cumprir cada as regulamentações que estão cada vez mais rigorosas. Esses problemas variam de acordo com as características do particulado emitido e sua concentração, que por sua vez, está diretamente relacionada à quantidade de material manuseado e os métodos de controle implementados. (Roberts & Wypych, 2017).

O controle de poeira nas operações de mineração tem emergido como uma área vital gerando métodos inovadores e eficientes para proteger tanto o ambiente quanto a saúde dos trabalhadores e comunidades nos arredores dos empreendimentos mineiros. Várias abordagens têm sido investigadas com o objetivo de otimizar a remoção de poeira durante o manuseio de minério de ferro e o resultado é a construção do foco contínuo na melhoria das práticas existentes e na exploração de novas tecnologias. Tais esforços sublinham a crescente preocupação com as condições de trabalho e o impacto ambiental das operações, levando a um forte impulso para o desenvolvimento e a implementação de soluções mais eficazes e ambientalmente sustentáveis para o controle de poeira na mineração de ferro no mundo (Song et al., 2020).

2.1 Caracterização da Poeira de Minério de Ferro

Segundo NIOSH (2021) a poeira de minério de ferro, gerada durante o processo de mineração, transporte e beneficiamento do minério, apresenta características únicas que a diferenciam de outros tipos de poeiras. A composição química da poeira de minério de ferro é complexa e variável, dependendo do tipo de minério, da geologia do local de extração e dos métodos de processamento empregados. Ainda, segundo os autores, os principais componentes da poeira de minério de ferro incluem hematita (Fe_2O_3), goetita

(FeOOH), magnetita (Fe₃O₄) e sílica (SiO₂), além de outros minerais em quantidades menores.

WHO (2018) reforça que o tamanho das partículas da poeira de minério de ferro também é variável, com diâmetros que podem variar de micrômetros a milímetros. As partículas mais finas, com diâmetros inferiores a 10 µm, são as mais preocupantes do ponto de vista da saúde, pois podem ser facilmente inaladas e depositadas nos pulmões, causando doenças respiratórias graves. Por esse motivo, a caracterização da poeira de minério de ferro é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle de poeira e mitigação de seus impactos na saúde humana e no meio ambiente. Através da análise da composição química, do tamanho das partículas e da origem da poeira, é possível identificar os riscos potenciais associados à exposição à poeira e implementar medidas de controle adequadas para minimizar esses riscos.

Outra característica relacionada com a poeira é o seu diâmetro aerodinâmico que define o quão fácil é manter uma partícula em suspensão de acordo com suas dimensões e densidade e a forma como a mesma se comporta em sua interação com o ar. Basicamente entende-se através dessa grandeza a relação entre a partícula com o seu comportamento dinâmico no fluido em que está levando em consideração a relação entre suas propriedades físicas, principalmente as que interferem nas relações de resistência ao movimento. Quanto menor a poeira, mais tempo fica em suspensão. Simplificando, partículas com comportamento aerodinâmico idêntico podem ser fisicamente bem diferentes. Em geral, o diâmetro aerodinâmico diminui com o tamanho da partícula e aumenta com a densidade e à medida que as partículas se tornam menos esféricas. (Halt et al, 2015).

Segundo NIOSH (2021) a poeira de minério de ferro, gerada durante o processo de mineração, transporte e beneficiamento do minério, apresenta características únicas que a diferenciam de outros tipos de poeiras. A composição química da poeira de minério de ferro é complexa e variável, dependendo do tipo de minério, da geologia do local de extração e dos métodos de processamento empregados. Os principais componentes da poeira de minério de ferro incluem hematita (Fe₂O₃), goetita (FeOOH), magnetita (Fe₃O₄) e sílica (SiO₂), além de outros minerais em quantidades menores.

WHO (2018) reforça que o tamanho das partículas da poeira de minério de ferro também é variável, com diâmetros que podem variar de micrômetros a milímetros. As partículas mais finas, com diâmetros inferiores a 10 μm , são as mais preocupantes do ponto de vista da saúde, pois podem ser facilmente inaladas e depositadas nos pulmões, causando doenças respiratórias graves. Por esse motivo, a caracterização da poeira de minério de ferro é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de controle de poeira e mitigação de seus impactos na saúde humana e no meio ambiente. Através da análise da composição química, do tamanho das partículas e da origem da poeira, é possível identificar os riscos potenciais associados à exposição à poeira e implementar medidas de controle adequadas para minimizar esses riscos.

Outra característica relacionada com a poeira é o seu diâmetro aerodinâmico que define o quão fácil é manter uma partícula em suspensão de acordo com suas dimensões e densidade e a forma como a mesma se comporta em sua interação com o ar. É uma medida que combina a densidade, o formato e o tamanho da partícula para determinar como ela se comporta em um fluxo de ar. Ele é definido como o diâmetro de uma esfera de densidade unitária (1 g/cm^3) que apresenta a mesma velocidade de queda terminal que a partícula real. Essa medida é essencial para avaliar a capacidade de uma partícula entrar em suspensão, especialmente em contextos como controle de poeira e poluição do ar. Basicamente entende-se através dessa grandeza a relação entre a partícula com o seu comportamento dinâmico no fluido em que está levando em consideração a relação entre suas propriedades físicas, principalmente as que interferem nas relações de resistência ao movimento. Quanto menor a poeira, mais tempo fica em suspensão. Simplificando, partículas com comportamento aerodinâmico idêntico podem ser fisicamente bem diferentes. Em geral, o diâmetro aerodinâmico diminui com o tamanho da partícula e aumenta com a densidade e à medida que as partículas se tornam menos esféricas. (Halt *et al.*, 2015). A figura 2.1 descreve essa relação entre diâmetro aerodinâmico e suas características físicas e geométricas.

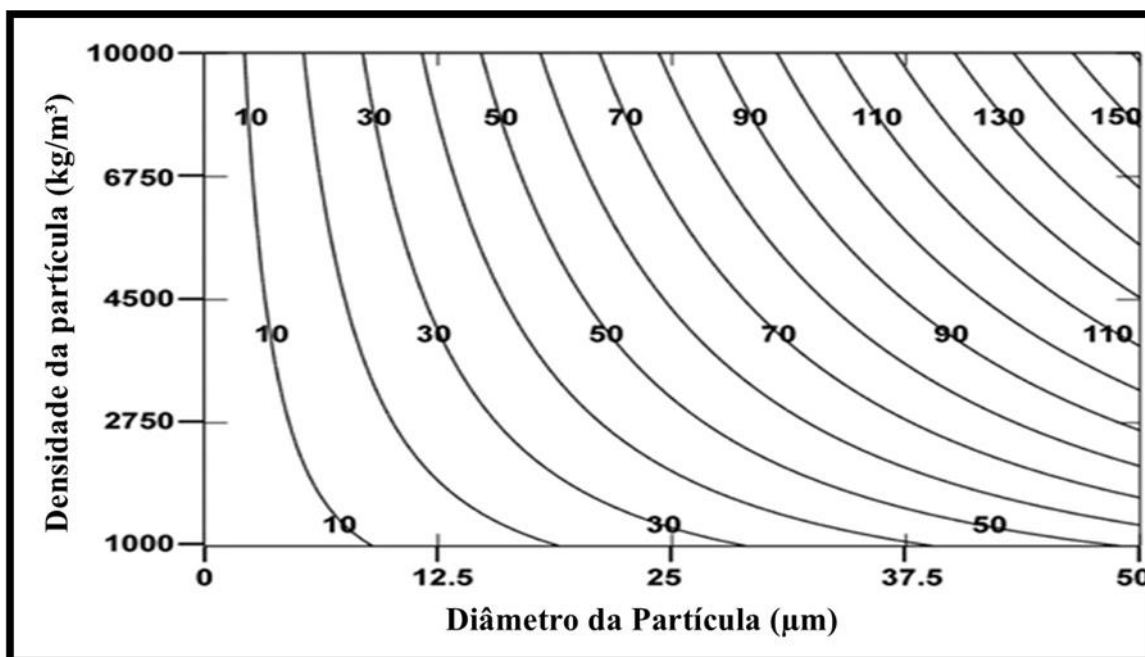


Figura 2.1 Diâmetro aerodinâmico calculado, em μm , como uma função da densidade de partículas, em kg/m^3 . Fonte: Halt (2015)

2.1.1 Velocidade terminal de uma partícula

Segundo Silva (2016), em uma condição de equilíbrio a partícula teria aceleração nula e estaria sobre a ação de três forças, a saber, a descendente força de campo gravitacional (F_c) ou força peso, e as ascendentes forças de empuxo (F_e) e Força de arrasto (F_a) conforme descrito na Figura 2.2,

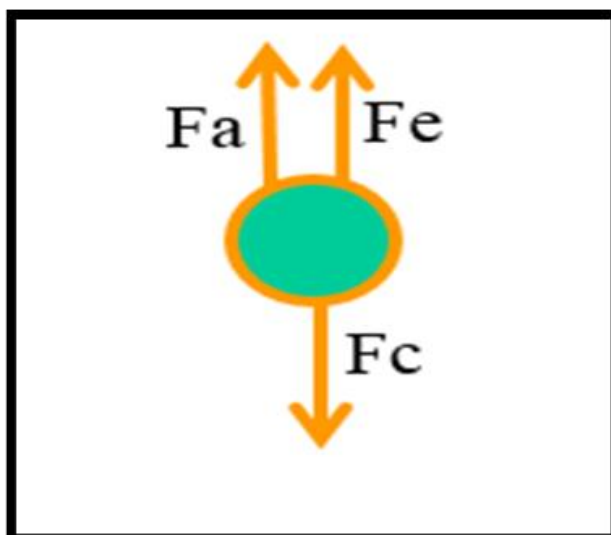


Figura 2.2. Diagrama de Corpo Livre de uma partícula em queda livre.

Fonte: Adaptado de Silva (2016)

Cada força é calculada pelas equações 1, 2 e 3 respectivamente

$$F_c = \rho_p V_p \quad (2.1)$$

Onde F_c é a Força de Campo ou força peso, ρ_p é a densidade da partícula, V_p é o Volume da partícula e g é a aceleração da gravidade.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_f A_c C_d (v_T)^2 \quad (2.2)$$

Onde F_a é a Força de Arrasto, ρ_f é a densidade do fluido, A_c é a área da seção transversal da partícula, C_d é o Coeficiente de Arrasto e v_t é a Velocidade Terminal da Partícula.

$$F_e = \rho_f V_p g \quad (2.3)$$

Onde F_e é a Força de Empuxo, ρ_f é a densidade do fluido, V_p é o Volume da Partícula e g é a aceleração da gravidade. Em uma situação de equilíbrio e aceleração nula, ou seja, força resultante nula, considerando o sentido descendente teríamos:

$$0 = F_c - F_a - F_e \quad (2.4)$$

$$0 = (\rho_p V_p g) - (1/2) \rho_f A_c C_d (v_T)^2 - (\rho_f V_p g) \quad (2.4)$$

Isolando-se V_t encontra-se:

$$v_T = \sqrt{\frac{2(\rho_p - \rho_f) V_p g}{\rho_f A_c C_d}} \quad (2.5)$$

Considerando a partícula esférica temos $A_c = \frac{\pi}{4} d_p^2$, e $V_p = \frac{\pi}{6} (D_p)^3$, onde D_p é o diâmetro da partícula, A_c é a área superficial da partícula e V_p o volume da partícula. Substituindo na Equação 4 encontramos:

$$v_T = \sqrt{\frac{4d_p g(\rho_p - \rho_f)}{3C_d \rho_f}} \quad (2.6)$$

Esta, ainda segundo Silva (2016) é a equação fundamental do movimento das partículas em um fluido. Descreve a velocidade terminal variando em função das propriedades da partícula. Neste contexto insere-se o conceito do Número de Reynolds da Partícula que é descrito através da equação 7.

$$Re_p = \frac{d_p v_p \rho_f}{\mu_f} \quad (2.7)$$

Onde, Re_p é o Reynolds da partícula, d_p é o diâmetro da partícula, v_T é a velocidade Terminal, ρ_f é a densidade do fluido e μ_f é a viscosidade do fluido.

Cremasco (2014) expõe que o Coeficiente de arrasto é uma função de Reynolds. Isso determina que para cada regime de escoamento teremos uma interação matemática diferente entre C_d e Re , conforme mostrado na figura 2.3.

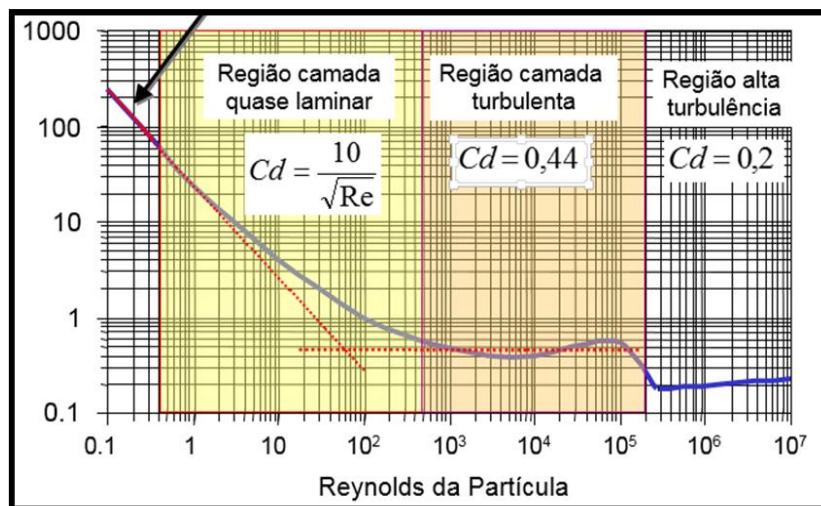


Figura 2.3. Coeficiente de arrasto em função de Reynolds da partícula.

Fonte: Adaptado de Cremasco, 2014

Sendo este o caso, substituindo os valores de Re_p em C_d para cada regime de tem-se que:

Para o regime laminar, ou seja, $Re_p < 0,4$, e $C_d = \frac{24}{Re_p}$:

$$v_T = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_p^2 g (\rho_p - \rho_f)}{\mu_f} \quad (2.8)$$

Esta equação também é chamada de Lei de Stokes para o movimento de particulados em um fluido.

Para o regime de transição, ou seja, $0,4 < Re_p < 500$, e $Cd = \frac{10}{\sqrt{Re_p}}$, têm-se que:

$$v_T = \left[\frac{4}{225} \frac{(\rho_p - \rho_f)^2}{\rho_f \mu_f} g^2 \right]^{1/3} d_p \quad (2.9)$$

Para o Regime Turbulento, ou seja $500 < Re_p < 2,5 \times 10^5$ e $Cd = 0,44$, têm-se que:

$$v_T = \left[3,1 \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\rho_f} g d_p \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

Com base nesses dados, é possível o cálculo da velocidade de três formas distintas.

A primeira consiste numa estimativa inicial de v_T na Equação 7 para obtenção de Re_p e conseqüentemente de Cd com a premissa inicial de se considerar o regime laminar, ou seja, faz-se uso da equação $Cd = \frac{24}{Re_p}$ com posterior substituição do valor de Cd na Equação 6, comparando-se os resultados de v_T . Depois disso reintroduz o resultado, caso haja diferença, criando um laço de interação até chegar no valor da mesma. Uma das conclusões desse método é que o regime é diferente do adotado e usa-se as expressões para o regime próprio de escoamento com o objetivo de refinar os resultados.

A Segunda é através do Método de Stokes, utilizando a Equação 8 com os dados das partículas e do fluido.

A terceira é o método de Massarani (1997), traduz-se no uso do coeficiente de Arquimedes $C_d \cdot Re_p^2$ que é dado pela Equação 11.

$$C_d Re_p^2 = \frac{4gd_p^3\rho_f(\rho_p - \rho_f)}{3\mu_f^2} \quad (2.11)$$

Esse coeficiente de Massarani entra no cálculo que leva em conta a esfericidade da partícula e é dada pela equação 12

$$Re_p = \left[\left(\frac{24}{k_1 C_d Re_p^2} \right)^{1,2} + \left(\frac{k_2}{C_d Re_p^2} \right)^{0,6} \right]^{-0,83} \quad (2.12)$$

Onde:

$$k_1 = 0,843 \log \left(\frac{\varphi}{0,065} \right) \text{ e } k_2 = 5,31 - 4,88\varphi \quad (2.13 \text{ e } 2.14)$$

Sendo φ a esfericidade, ou seja, a divisão da área superficial de uma esfera de igual volume a da área superficial da partícula. Nota-se, segundo este conceito que, para partículas perfeitamente esféricas temos $\varphi = 1$ (MASSARANI,1997).

As constantes adimensionais k_1 e k_2 , atuam como refinadores matemáticos que inserem proporcionalmente as nuances da inclusão da esfericidade φ . Trata-se de uma variável importante para estabelecer valores mais exatos para o caso de partículas não esféricas.

Com o número de Reynolds em mãos é possível verificar o tipo de regime é possível então determinar o valor da velocidade terminal v_T utilizando as equações correspondentes aos mesmos, ou seja, equações 8, 9 ou 10. Estes conceitos são de grande importância para entender a interação de cada partícula com o ambiente assim como para avaliar estratégias de supressão.

2.1.2 Impactos ambientais e à saúde associados à exposição à poeira de minério de ferro

Segundo Li et al (2019), a poeira de minério de ferro, gerada durante a mineração, beneficiamento e transporte do minério, representa um sério

problema ambiental e de saúde pública. Sua composição complexa, rica em ferro, sílica, manganês e outros elementos, pode causar diversos impactos negativos ao meio ambiente e à saúde humana, com efeitos de curto e longo prazo.

A poeira de minério de ferro pode alterar a composição química do solo, reduzindo sua fertilidade e afetando negativamente a produtividade agrícola (Shahab et al 2021, Ramos et al 2022). Ainda, segundo Ibrahimpour et al (2021), a sedimentação dessa poeira em corpos d'água também pode levar à eutrofização, causando o crescimento excessivo de algas e a morte de peixes, contaminar os recursos hídricos e afetar a qualidade da água potável e representar um risco à saúde pública.

No que diz respeito à saúde humana Banerjee et al (2006) demonstra que a exposição à poeira de minério de ferro pode aumentar o risco de doenças cardiovasculares, como infartos, pois, as partículas finas da poeira podem entrar na corrente sanguínea e causar danos aos vasos sanguíneos e ao coração. Também ratifica a poeira de minério de ferro como um carcinógeno humano do grupo 1 pelo fato de que a inalação prolongada dessa poeira pode aumentar o risco de câncer de pulmão, laringe e outros órgãos. Além disso, o estudo da ênfase ao fato de que a inalação crônica de poeira de minério de ferro pode causar doenças respiratórias graves, como silicose, bronquite crônica e pneumoconiose, sendo esta última objeto de estudo constante em virtude suas características cumulativas, crônicas e irreversíveis para a saúde pulmonar.

Sobre a pneumoconiose NIOSH (2021) explica que a exposição contínua a essas substâncias resulta na deposição de partículas nos pulmões, desencadeando uma série de processos inflamatórios e fibrogênicos, que por sua vez leva a uma redução significativa na capacidade pulmonar, dificultando a respiração. As consequências da pneumoconiose para os trabalhadores impactam tanto a saúde física quanto a qualidade de vida podendo desenvolver tosse persistente, falta de ar, aperto no peito e fadiga interferindo nas atividades diárias e no desempenho no trabalho, levando a uma diminuição da produtividade e qualidade de vida. A figura 2.4 expõe o contraste entre um pulmão saudável, e o resultado da pneumoconiose em estado inicial e avançado.

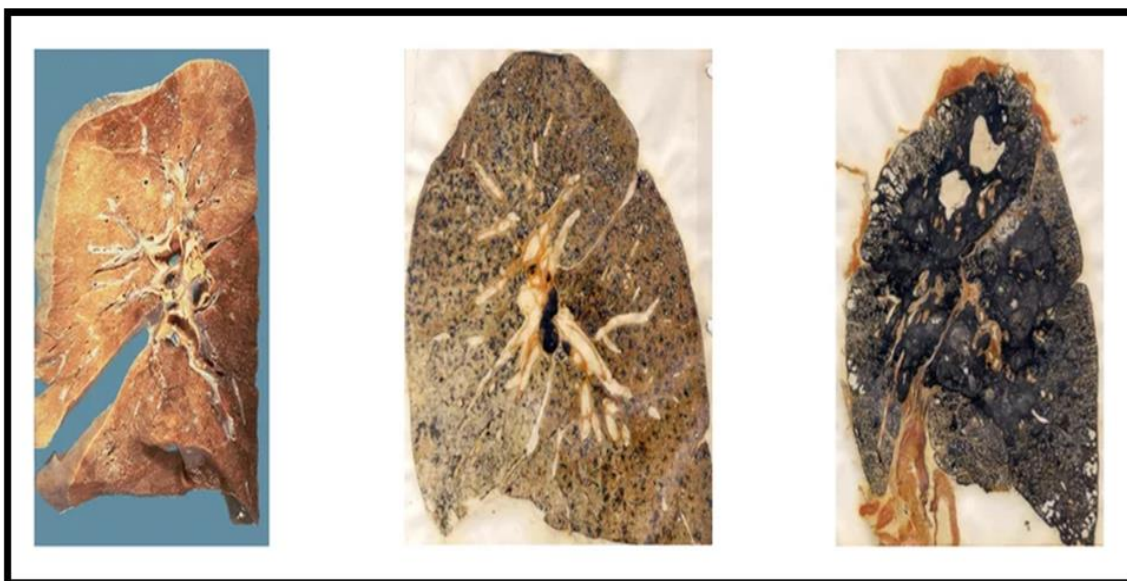


Figura 2.4. Da esquerda par a direita pulmão sadio, com pneumoconiose branda e com pneumoconiose crônica terminal. Fonte: NIOSH (2021)

2.1.3 Métodos tradicionais de controle de poeira

Zhang (2014) discute a aplicação da tecnologia de supressão de pó a seco em sistemas de transporte de carvão em usinas termelétricas, maximizando a eficácia no controle de poeira e minimizando o desgaste em equipamentos. Luo (2011) propõe um circuito de controle envolvendo sistemas de filtros de poeira, um método de filtros, condições de ciclo de limpeza e condições de parada para ajustar as condições de início e parada predeterminadas com base no estado do sistema de filtro de poeira. Parvej et al. (2021) destacam que os supressores de poeira podem reduzir o pó fugitivo em estradas não pavimentadas por meio da higroscopicidade, ou seja, a capacidade de absorver umidade atmosférica e/ou aglomeração, que é a capacidade de cimentar as partículas de poeira umas nas outras.

Huang et al. (2020) desenvolveram um supressor de poeira químico composto ambientalmente amigável e eficaz para supressão de poeira em estradas de uma mina de cobre, usando uma mistura de poliacrilato de sódio, carbonato de sódio, polietileno glicol e alquil poliglicosídeo como matérias-primas. Outra solução, abordada por Fang Chen *et al.* (2019) é a tecnologia de controle de poeira baseada em um sistema de longa pressão e curta bombagem para reduzir eficazmente a concentração de poeira na superfície de trabalho, demonstrando redução significativa da poeira e dos riscos ocupacionais.

Hussein (2022) relata uma nova solução de supressão de poeira aplicada às pilhas de estoque usando equipamentos de empilhadeira e recuperadora, formando uma crosta branca que reduziu as taxas de emissão de poeira em aproximadamente 75% na área do pátio.

2.2 Tecnologia de Pulverização de Bicos

Entende-se então que pulverização de água ou soluções supressoras de poeira por bicos de spray é uma técnica eficaz para controlar a exposição à poeira em ambientes de trabalho (Swanson&Langefeld, 2015). Com base nos princípios de simplicidade, economia e eficiência, a supressão de poeira por pulverização é atualmente um dos principais métodos para prevenção e controle de poeira. Para esta tecnologia, o efeito de atomização, ou seja, a diminuição do fluxo em microgotas, é o parâmetro-chave que caracteriza o efeito de redução de poeira, e geralmente define outras características do spray como o ângulo de atomização, a pressão de pulverização e consequente tamanho da gota, ângulo de pulverização, geometria do spray formado e sua consequente área de cobertura. Todas essas características são de importância para o controle de mensuração da eficiência de bicos no abatimento de poeira (Li *et al.*, 2021).

Gholami et al. (2020) citam que a pulverização de água ou soluções supressoras de poeira por bicos de spray gera gotas que capturam partículas de poeira no ar. As gotas de água aumentam o peso das partículas de poeira, fazendo com que elas se aglutinem e caiam no solo, removendo-as da zona de respiração dos trabalhadores. Ainda, segundo Thejas e Hossiney (2022), a pulverização de água ou soluções supressoras de poeira por bicos de spray é uma técnica amplamente utilizada na indústria para mitigar os efeitos adversos da exposição à poeira em ambientes de trabalho. Os autores enfatizam que eficácia da pulverização de água ou soluções supressoras de poeira por bicos de spray depende de vários fatores, incluindo a qualidade da água ou solução utilizada, a pressão e o padrão de pulverização dos bicos, a frequência e a quantidade de aplicação, e as condições ambientais, como a velocidade do vento e a umidade relativa do ar.

Nesta linha, Ibrahimpour *et al.* (2021) ressaltam que a escolha da solução supressora de poeira adequada é crucial para garantir a eficácia da técnica de

pulverização pois existem várias opções disponíveis, incluindo soluções à base de água, polímeros sintéticos, compostos orgânicos e aditivos químicos. Cada tipo de solução supressora de poeira possui suas próprias propriedades físicas e químicas, e a seleção da solução mais apropriada deve levar em consideração o tipo de poeira a ser suprimida, as condições ambientais e os requisitos específicos da aplicação. Os autores enfatizam que além da escolha da solução supressora de poeira adequada, a calibração correta dos bicos de spray é essencial para garantir uma distribuição uniforme da solução e uma cobertura eficaz da área de trabalho. A pressão e o padrão de pulverização dos bicos devem ser ajustados de acordo com as características da poeira e as condições ambientais para maximizar a eficiência da supressão de poeira.

A frequência e a quantidade de aplicação da solução supressora de poeira também são aspectos importantes a serem considerados. Em ambientes de trabalho com alta geração de poeira, pode ser necessário aplicar a solução com mais frequência e em maior quantidade para manter a eficácia da supressão de poeira ao longo do tempo. Além disso, a aplicação da solução supressora de poeira deve ser realizada de forma consistente e sistemática para garantir uma proteção contínua dos trabalhadores contra a exposição à poeira. As condições ambientais, como a velocidade do vento e a umidade relativa do ar, também podem influenciar a eficácia da técnica de pulverização de água ou soluções supressoras de poeira. Em condições de vento forte, as gotas de água podem ser dispersas antes de atingirem as partículas de poeira, reduzindo a eficiência da supressão de poeira e terem seu ângulo de cone desestruturado, o que prejudica sua eficiência. Da mesma forma, em condições de baixa umidade relativa, as gotas de água podem evaporar rapidamente, limitando sua capacidade de capturar e aglutinar as partículas de poeira (Gleekia *et al.*, 2016).

2.2.1 Princípios de funcionamento dos bicos de pulverização

Abubaker *et al.* (2018) esquematiza o mecanismo de formação de um spray padrão do tipo cone cheio. A figura 3 demonstra a influência de cada parte construtiva do bico na formação geométrica do cone formado pelas gotículas na saída do bico. Nota-se que a água que vem passa por palhetas que têm forma helicoidal. Isso aumenta um componente tangencial de velocidade do fluxo de entrada. Isso produz um fluxo giratório dentro de uma câmara de turbulência.

Devido às altas forças centrífugas, os fluxos são empurrados em direção às bordas e produzem um ângulo de cone quando o fluxo de água sai poro fechado. A velocidade das gotas depende do tamanho da gota. Gotas menores terão uma velocidade maior inicialmente, mas reduzida mais rápida. Gotas maiores podem viajar por distâncias maiores sem redução de velocidade.

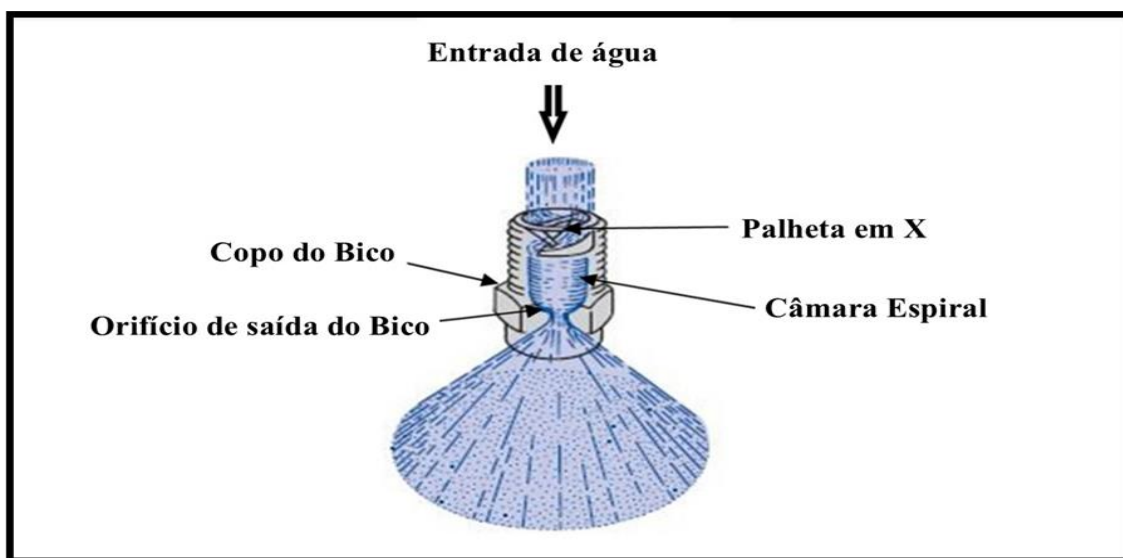


Figura 2.5. Mecanismo de formação do spray por meio do bico.
Fonte: Abubker et al. (2018)

Segundo Nie et al. (2024) o processo de formação do spray por meio de um bico possui dois estágios. O primeiro é a fragmentação do jato de líquido que leva à criação de um filme ou coluna de líquido. O segundo é seguido pela fragmentação e divisão adicionais das gotículas inicialmente atomizadas em gotículas de líquido mais finas, conforme exemplificado na figura 2.6. Desta forma, a geometria do spray e o tamanho da gota dependerão da relação entre a vazão, a pressão e a geometria do bico.

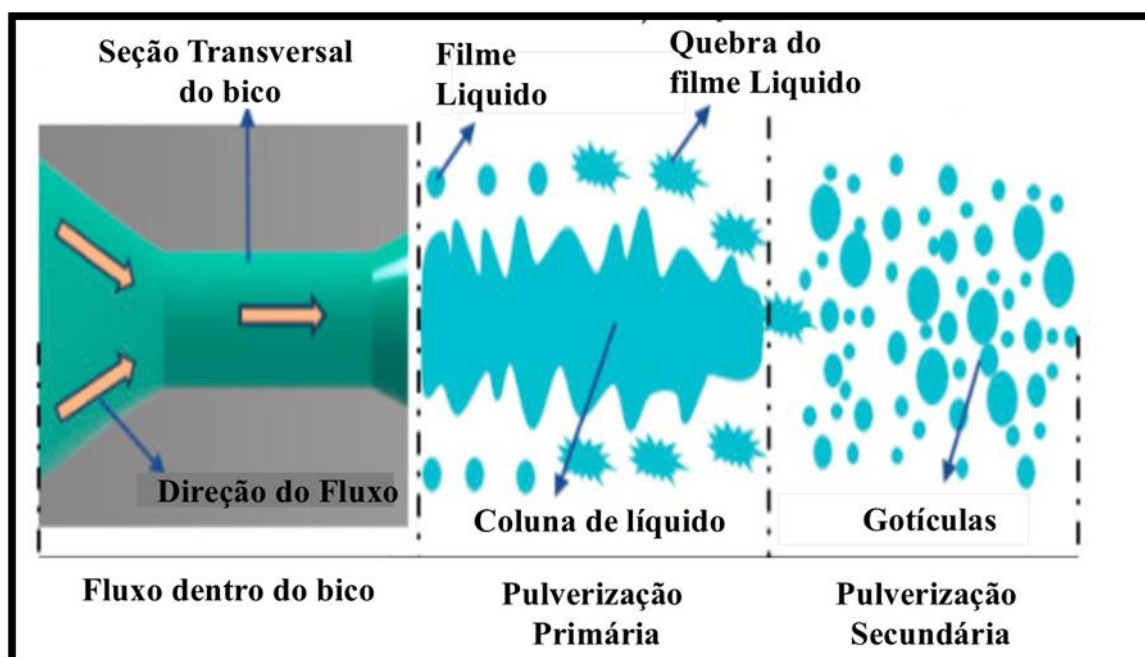


Figura 2.6. Estágios de geração das gotas por meio de um bico de pulverização.
 Fonte Nie et al. (2024)

Segundo Wang et al. (2019), o fluido é ejetado em alta velocidade e é quebrado em coluna líquida ou filme líquido em pedaços no primeiro estágio e no segundo estágio forma pequenas gotas devido à diferença de velocidade entre o líquido e o ar neste processo. Nie et al. (2024) acrescenta que a quebra primária faz com que o líquido contínuo se quebre em numerosas gotículas de névoa discretas, aumentando significativamente a área total da superfície do líquido. Durante o jato de gotículas, a tensão superficial força as gotículas de líquido a adotarem uma forma esférica com a energia superficial mínima necessária, enquanto a viscosidade do líquido ajuda a estabilizar a forma da gotícula. Gerar um número maior de gotículas menores requer mais fragmentação e, portanto, mais energia. Os autores ainda citam que o tamanho final da gotícula e a distribuição de tamanho formada pela atomização do jato dependem do tamanho da gotícula formada na fase primária e do processo de fragmentação posterior, no segundo estágio, do líquido do jato. Gotículas ou aglomerados de líquidos formados por meio da atomização primária sofrerão mais fragmentação sob as forças aerodinâmicas do fluxo de ar circundante, formando gotículas ainda menores. A eficácia da atomização secundária de gotículas também depende do padrão de fluxo do espaço circundante: os mecanismos e processos de fragmentação de gotículas em ambientes de fluxo de ar laminar e turbulento são significativamente diferentes.

Sijs et al. (2019), nesta linha de entendimento, citam que a formação de gotículas de sprays resulta da ruptura de estruturas líquidas semelhantes a fios chamadas ligamentos. Os bicos proporcionam ondas na superfície de uma lâmina líquida, produzidas por atrito com o ar circundante que gera o mecanismo de ruptura do volume do ar à jusante do bico. Essas ondas crescem em amplitude, causando modulações de espessura da lâmina até o ponto de ruptura. Os autores mostraram isso usando uma câmera ultrarrápida conforme mostrado na figura 2.7.

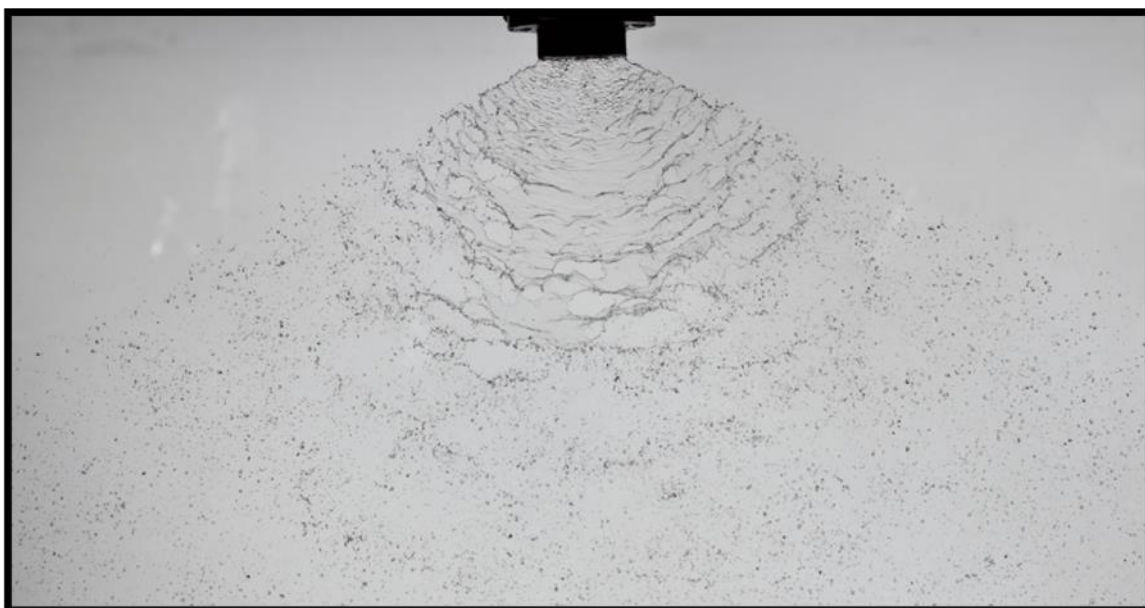


Figura 2.7. Fases do rompimento do fluido em gotas em um bico de *spray*. Fonte Sijs et al. (2019).

2.2.2 Mecanismo de supressão de poeira

Liao et al. (2019) descreve o processo de captura de uma partícula de poeira por uma gota pode ser descrito pela figura 2.8 que mostra quatro fases para este mecanismo. Primeiramente, na fase um, a gota molha a partícula quando ocorre a colisão entre elas. A partícula molhada pode então colidir com outras partículas molhadas ou secas o que provavelmente fará com que eles adiram umas às outras para formar um aglomerado poroso maior devido ao pontes líquidas entre si. Com maior contato com as gotículas, na fase dois, o poroso aglomerado cresce para um aglomerado saturado, quando os espaços entre as partículas são totalmente preenchido com líquido. Pontes líquidas podem então ser criadas entre aglomerados saturados, na fase três, para

formam um aglomerado maior. Se um aglomerado de estado 3 colidir continuamente com gotículas, a porosidade do novo aglomerado será de um estado de dispersão sólido líquido.

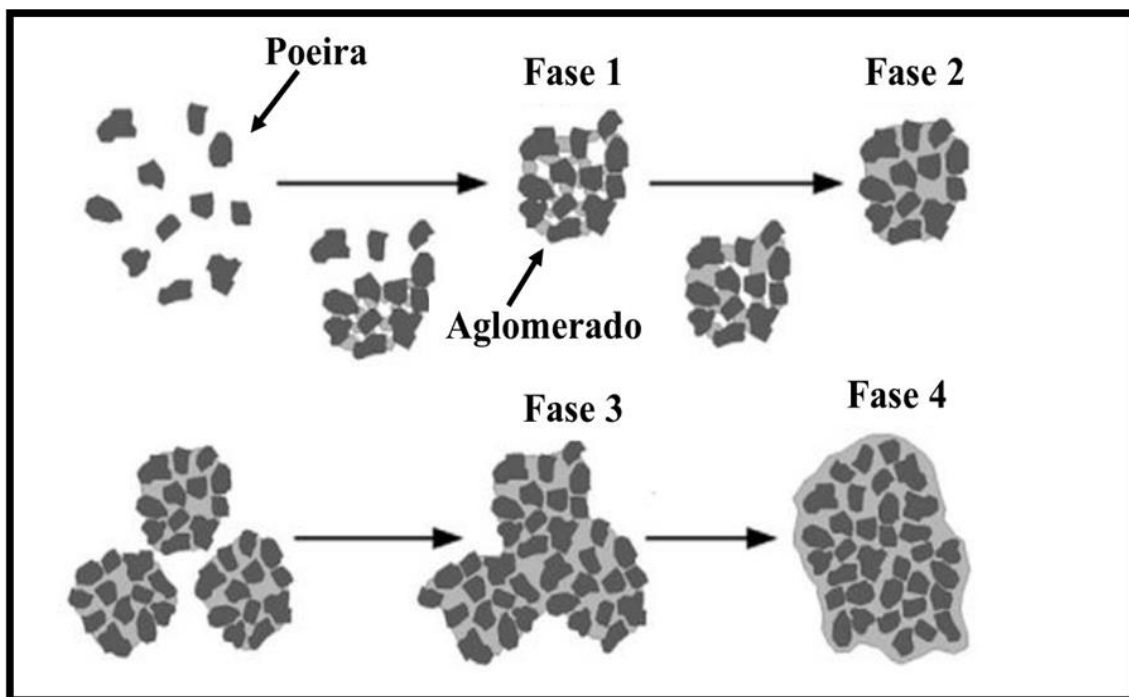


Figura 2.8. Estágios de interação entre partículas e gotas. Fonte: Liao et al. (2019)

Segundo Roberts et al. (2023), os mecanismos de captura de supressão de poeira no ar usando sprays incluem colisão e condensação. Os autores destacam que a colisão ocorre quando a gota de spray colide com partículas de poeira e o aglomerado de partículas e gotas então se deposita no chão ou é coletado pela superfície de objetos próximos. Já no mecanismo de condensação ocorre quando a fase de uma gota muda, especialmente com gotas finas, por evaporação, o que eleva a umidade relativa acima de 100% e a água então se liquefaz diretamente nas partículas de poeira, gerando umidade superficial suficiente propícia para, com contato com partículas em igual situação, produzir aglomerados e estes, por chegarem a um tamanho suficientemente grande, são abatidos por gravidade ou por contato com uma gota.

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 2.9. 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.

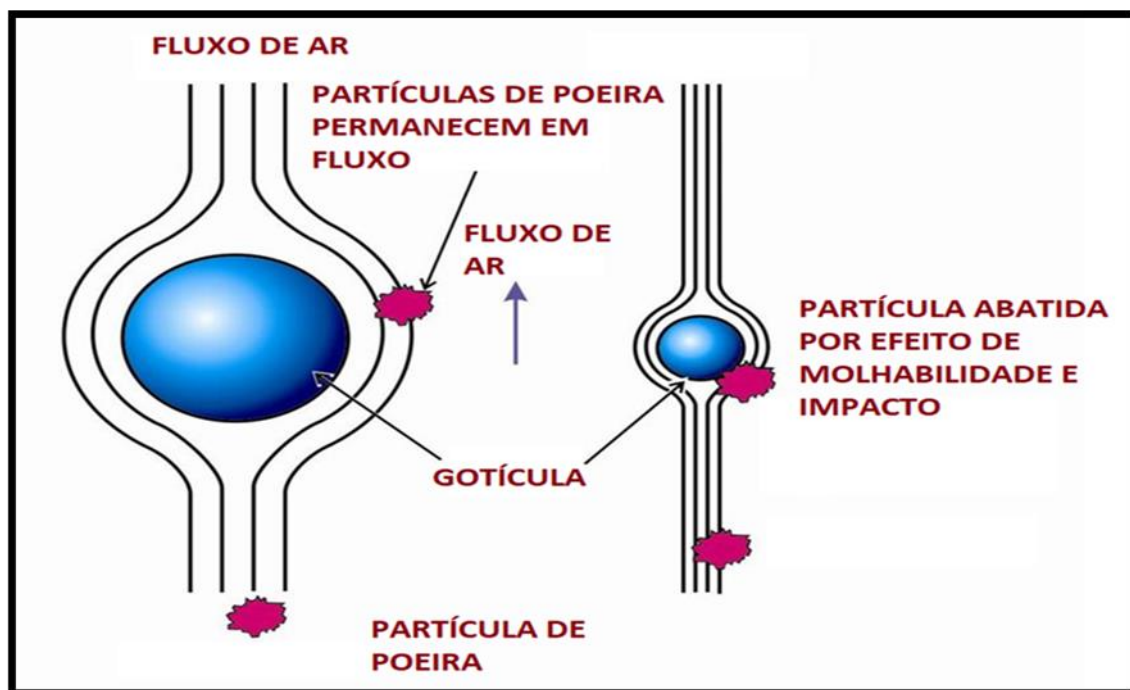


Figura 2.9. Relação entre tamanho da gota e da poeira interferem no processo na geração de impacto entre elas. Fonte: Roberts et al. (2016)

Sobre o impacto, Liao et al.(2020), explicam que há três importantes interações entre gota e poeira que podem ocorrer para efetividade do abatimento de poeira. A colisão de gotículas e partículas pode ser causada por impacto inercial, interceptação e difusão browniana. Quando um fluido em movimento se aproxima de um objeto, como uma gota, as linhas de fluxo divergem em torno desse objeto, conforme mostrado na figura 2.10. O impacto inercial pode ocorrer quando uma partícula não segue o fluxo devido à sua inércia. A interceptação ocorre quando uma pequena partícula com baixa inércia pode seguir a linha de corrente e tender a passar pelo objeto, mas atinge o objeto porque seu raio é maior do que a distância entre a superfície do objeto e a linha de corrente. Quando uma partícula é suficientemente pequena, as colisões com moléculas de ar aleatórias envolvem mudanças de momento que não são totalmente desprezíveis em comparação com a força de arrasto ou gravidade da partícula; como resultado, a partícula exhibe movimentos aleatórios, conhecidos como

movimento browniano, que podem resultar em impacto com o objeto. Entre esses mecanismos, a impactação inercial desempenha um papel importante na captura de partículas maiores que $5,0\mu\text{m}$, enquanto a difusão browniana é essencial para a captura de partículas menores que $0,5\mu\text{m}$.

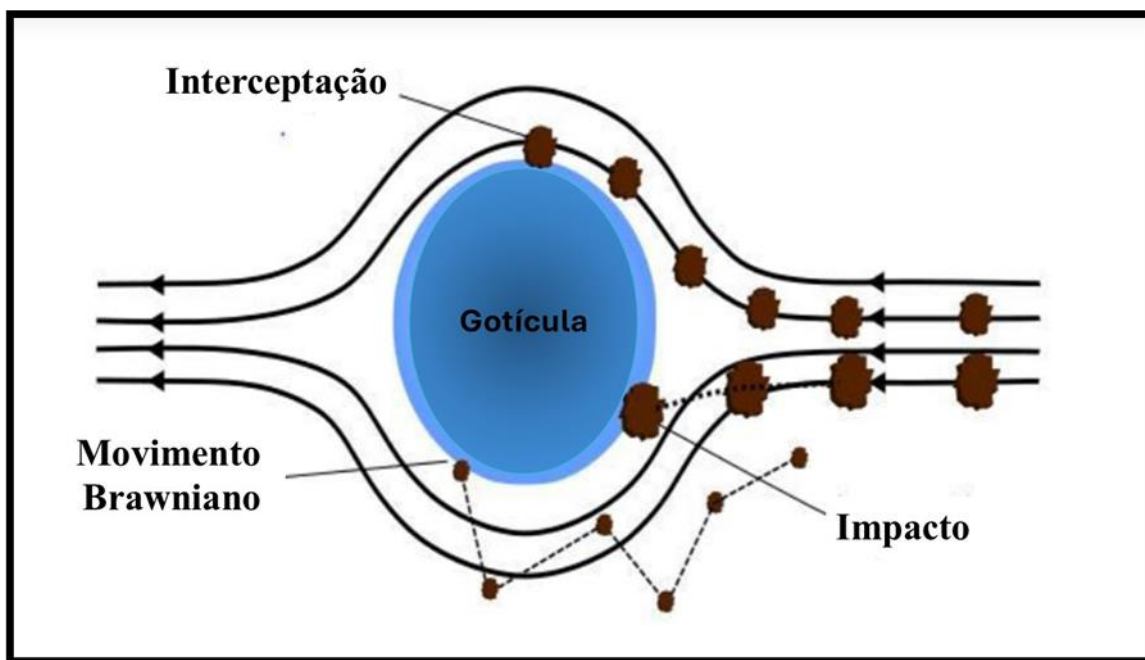


Figura 2.10. Tipos de supressão no contato gota partícula de acordo com o tamanho e a trajetória. Fonte: Liao et al.(2020)

2.2.3 Tipos de bicos de pulverização utilizados no controle de poeira em operações de mineração

Segundo Colinet (2021), o tipo de bico é um componente crítico na determinação do sucesso relativo de cada aplicação de pulverização para controle de poeira, dependendo do método desejado. O autor destaca que, devido a isso, algumas configurações de geometria de cones foram testadas e mais bem adaptadas para o processo de abatimento de poeira.

Bicos de pulverização de cone cheio, destacado na figura 2.11, produzem um padrão de pulverização sólido em forma de cone, tipicamente com uma área de impacto redonda. Esses sprays produzem tamanhos de gotas médios a grandes que podem viajar por distâncias maiores e por isso, são normalmente usados quando os sprays precisam ser localizados mais distantes da fonte de poeira ou quando um padrão de umedecimento uniforme é desejado. Os sprays de cone cheio estão disponíveis em uma ampla gama de pressões e fluxos

operacionais e são úteis para umedecer na prevenção da geração de poeira ou abatê-la em caso de manuseio mineral (Colinet, 2021).

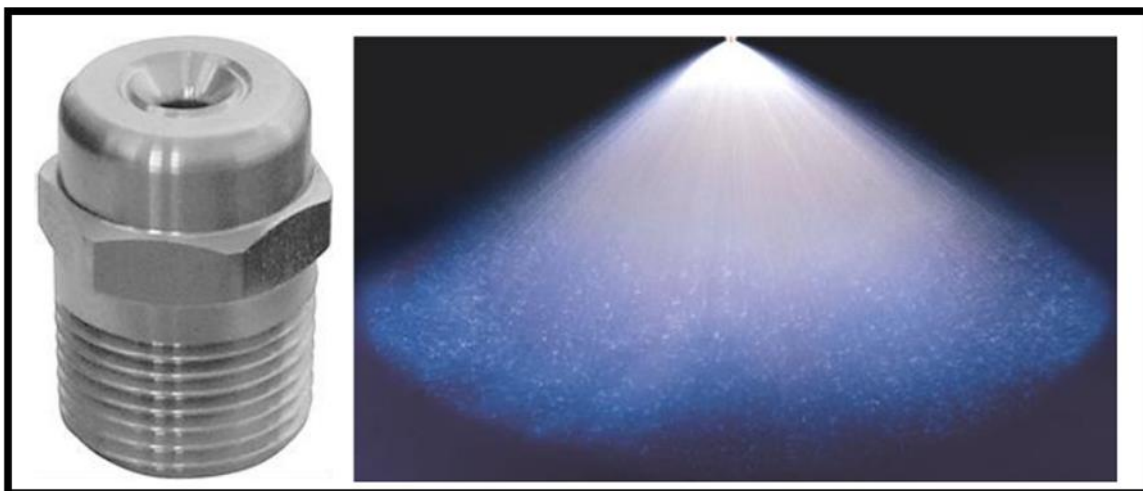


Figura 2.11. Bico Cone Cheio. Fonte: Colinet 92021).

Segundo Pollock e Organiscak (2007), bicos de pulverização de cone oco, destacado na figura 2.12, produzem um padrão de pulverização circular de anel externo composto de gotículas menores em tamanho. Os autores citam que este tipo de bico produz gotículas de movimento mais rápido que aumentam a captura de poeira, além de induzir mais movimento do fluxo de ar do que a maioria dos outros bicos discutidos. Devido aos seus orifícios maiores, esses bicos são menos prováveis de entupir e tem sido, segundo os autores, uma escolha popular no abatimento de poeira gerada.



Figura 2.12. Bico Cone Oco. Fonte: Colinet (2021)

Colinet (2021) cita que os bicos do tipo cone leque, destacados na figura 2.13, produzem um padrão de jato fino e retangular, e geram gotículas de tamanho médio com uma distribuição uniforme pelo padrão. Os bicos do tipo cone leque oferecem uma ampla gama de fluxos e ângulos de jato e podem ser usados como um meio de contenção de poeira gerando a formação das cortinas de água e oferecem melhor adaptação na contenção de poeira em espaços com cantos vivos, como em viradores de vagões e carregadores de navios.



Figura 2.13. Bico Cone Leque. Fonte: Colinet (2021)

Colinet (2021), sobre os bicos atomizadores de ar (figura 2.14), destaca que os mesmos usam ar comprimido para atomizar a água e produzir gotículas muito finas menores e com maior velocidade do que aquelas produzidas pela maioria dos outros bicos e podem, desta forma, produzir padrões de pulverização cônica ou plana, e normalmente em baixas taxas de fluxo de água. E tem uma aplicabilidade de abatimento de poeiras de diâmetros bem menores, principalmente as de diâmetro respirável.

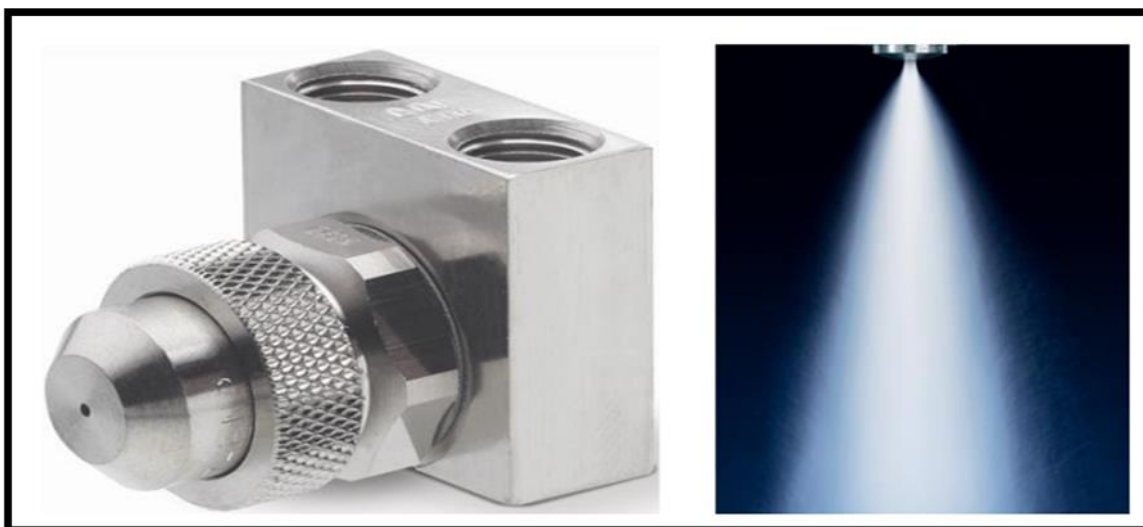


Figura 2.14. Fatores que influenciam a eficiência dos bicos de pulverização no controle de poeira. Fonte: Colinet (2021)

2.3 Fatores que influenciam a eficiência dos bicos de pulverização no controle de poeira.

Liao et al. (2019) citam que os fatores relacionados à eficiência de captura de poeira incluem as propriedades do spray, da poeira, e as condições ambientais. Os autores destacam que as características de um spray que podem impactar sua eficiência de captura incluem a orientação e posição do spray, pressão da água, tamanho e velocidade das gotas. Além disso, os mesmos acrescentam que a molhabilidade da poeira tem um impacto significativo na eficiência de captura de poeira e o tamanho da poeira também afeta o desempenho de um sistema de spray. Pollock e Organiscak (2007) colaboram com este entendimento incluindo que condições ambientais, como umidade e vento cruzado, também podem afetar a eficiência de supressão de poeira por spray. Os autores acrescentam que a direção de um spray pode impactar na eficiência de captura de poeira. Os mesmos notaram que os sprays de alta pressão aumentam a redução de poeira respirável destacando que o motivo reside na velocidade e atomização das gotículas, mas também é responsável pela geração de gotículas menores, que por sua vez, eleva a eficiência de abatimento de poeira.

Neste sentido, Colinet (2021), comparou a eficiência destes bicos variando a pressão e o resultado é expresso na figura 2.15. Os autores demonstram justamente que pressões maiores associados a bicos que

produzem gotas menores, para as mesmas condições de emissão, geram uma eficiência maior de supressão de poeira com destaque para o bico atomizado e o cone oco.

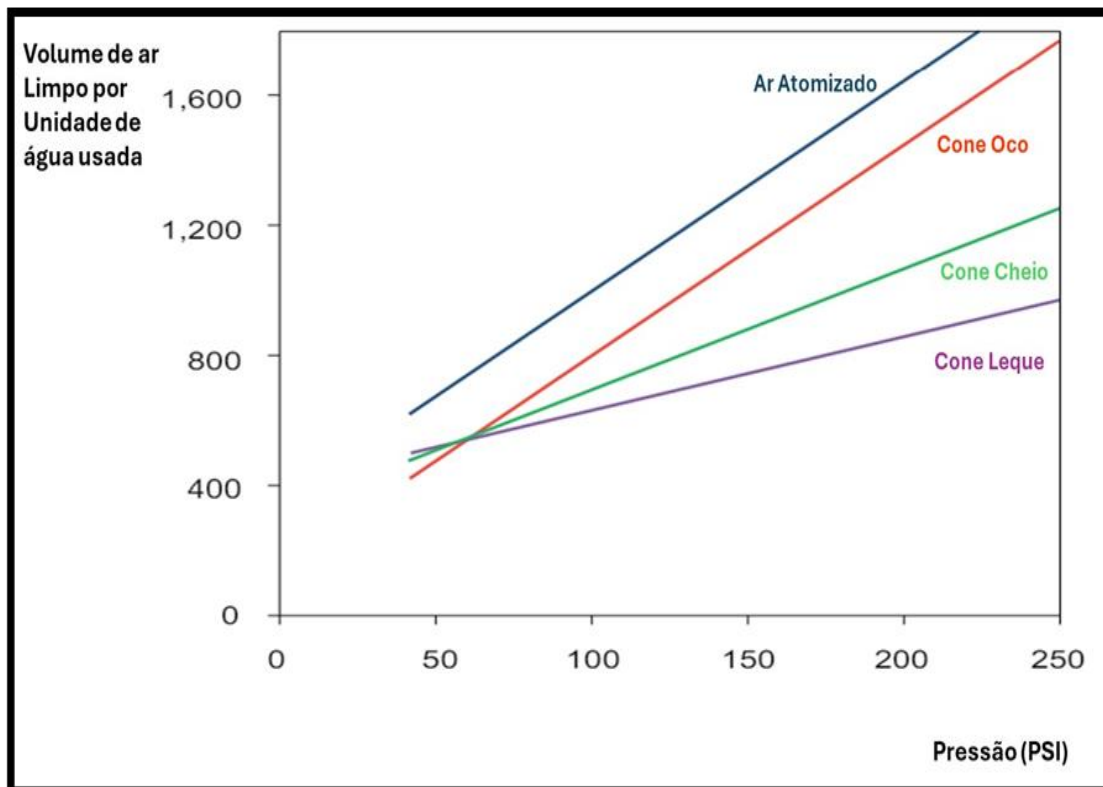


Figura 2.15. Relação entre pressão e eficiência de abatimento

Mecanismos adicionais potencializam a eficiência de supressão como o uso de aditivos (Parvej et al., 2021), uso de água magnetizada (Zhou et al., 2019), uso de geração ultrassônica de gotas (Okawa et al., 2017; Xie et al., 2022), o carregamento eletrostático das gotas (Han et al. 2024). Zhang et al. (2022) resume bem estes meios de incremento da eficiência de bicos de aspersão no abatimento de poeira, conforme descrito na figura 2.16.

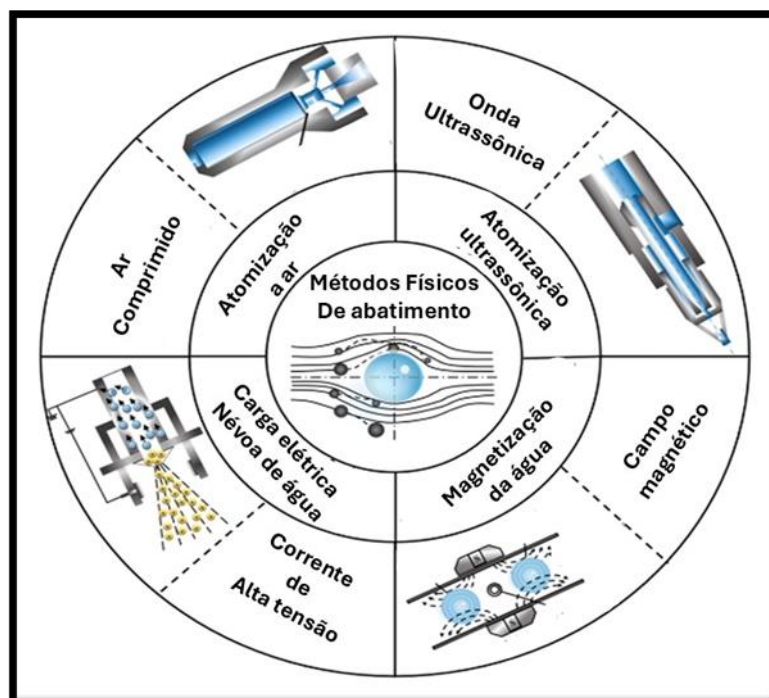


Figura 2.16. Mecanismos para potencializar a eficiência de bicos de pulverização. Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2022).

Para mensuração da eficiência destes bicos em suas atuações, métodos como modelos industriais em escala (Beck et al., 2018, Yang et al. 2019; Liu et al., 2023, Castro, 2022), aplicações em campo (wang et al., 2022; Nie et al., 2017; Liu et al., 2023); estudos numéricos (Xu et al., 2019; Mo, 2024; Ren et al., 2024), caixa de poeira (Grundnig et al., 2006; McCoy et al., 2010) e túneis de vento (Fontana et al., 2024; Furtado et al., 2023; Zhang et al., 2022). O presente trabalho se concentrará nas metodologias de uso de túneis de vento para mensuração da eficiência dos bicos de pulverização.

2.4 Uso de Túneis de Vento Para Avaliação de Eficiência de Bicos

Nos últimos anos, diversas pesquisas usaram túneis de vento avaliando no entendimento de diferentes frentes da eficiência dos mecanismos de supressão da poeira gerada no manuseio do minério (Fontana et al., 2024). Cejpek et al. (2020) citam que túneis de vento são usados para pesquisa de fluxo de fluidos, por exemplo, para investigações de spray sob condições de quase qualquer estudo de fluxo, por exemplo, interação entre o fluido e a poeira. Os

autores acrescentam que esta metodologia de análise é bem-sucedida pela capacidade que um túnel de vento tem em replicar os fenômenos que giram em torno da geração de poeira e do uso dos sprays como forma de controle da emissão dos particulados.

Aboalez *et al.* (2024) destaca que a utilidade de ambientes especializados, como túneis de vento de poeira ou sistemas consistentes de entrega de partículas. Suas descobertas demonstram como tais configurações controladas podem refinar estratégias de controle de poeira ao replicar de perto as condições do mundo real, melhorando assim os padrões de saúde e segurança em operações de mineração. Os autores destacam ainda mais a importância de ambientes controlados, como túneis de vento, para o desenvolvimento, teste e otimização de tecnologias de controle de poeira através de mecanismos de pulverização, pois os mesmos permitem a manipulação e o monitoramento das variáveis que influenciam o comportamento da poeira, o que é crucial para o seu controle nos vários ambientes industriais. 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) explicam 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 onde os testes 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, o aparelho de pulverização de água, o equipamento de monitoramento de poeira e uma unidade de coleta de poeira de cauda. Este esquema é mostrado na figura 2.17.

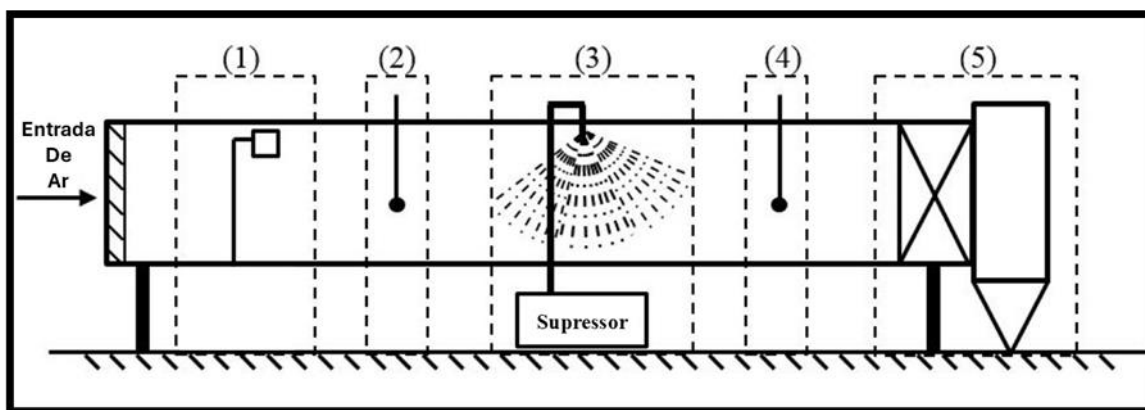


Figura 2.17. Esquema típico de um túnel usado para estudo de abatimento de poeira via sprays. (1) Geração de poeira, (2) e (4) Amostragem, (3) bicos de spray e (5) coletor de poeira não abatida.

2.4.1 Revisão de estudos anteriores

Xu et al. (2019) usaram um túnel de vento, mostrado na figura 2.18, para estudar a influência da concentração de diferentes surfactantes na eficiência de um sistema de pulverização no controle de poeira. Os surfactantes utilizados eram os aniônicos, catiônicos, não iônicos e água deionizada. O túnel incluía um exaustor como fonte de controle da velocidade de vento, um gerador de aerossol para o controle das emissões, um bico de interesse de avaliação de eficiência e um tanque de armazenamento das soluções. A eficiência foi medida por meio de contadores de partículas antes e depois do spray.

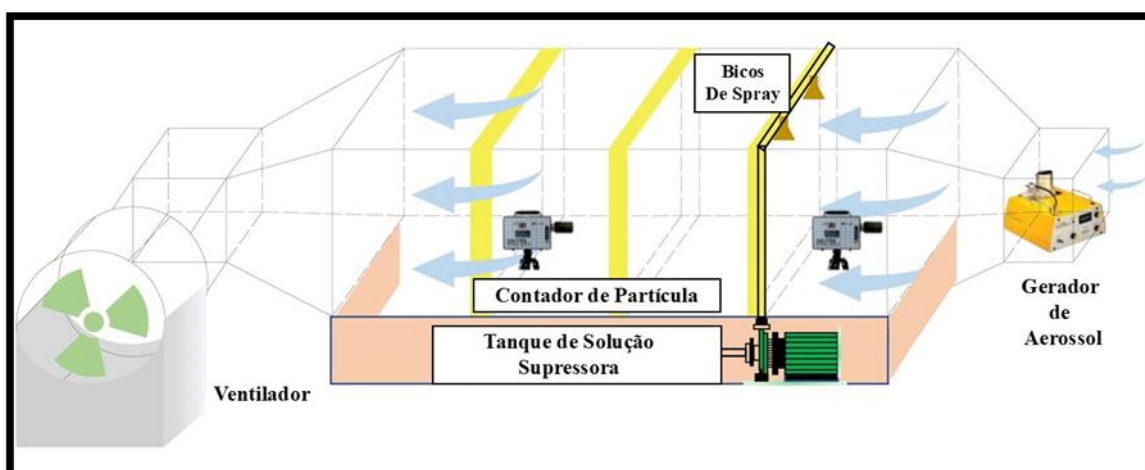


Figura 2.18. Túnel utilizado em estudo de concentração de surfactantes no abatimento de poeira. Fonte: Xu et al. (2019)

Guo et al.(2020) fizeram uso de um túnel de vento (figura 2.19) 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. Alguns microdados, incluindo o tamanho da gota e a velocidade da gota, foram medidos por um interferômetro Doppler de fase (PDI). Os resultados alimentaram dados para uma aplicação de um modelo CFD aplicado a uma máquina de cominuição de mina de minério de ferro indicando os bicos mais eficientes para a aplicação nos testes posteriores em campo.

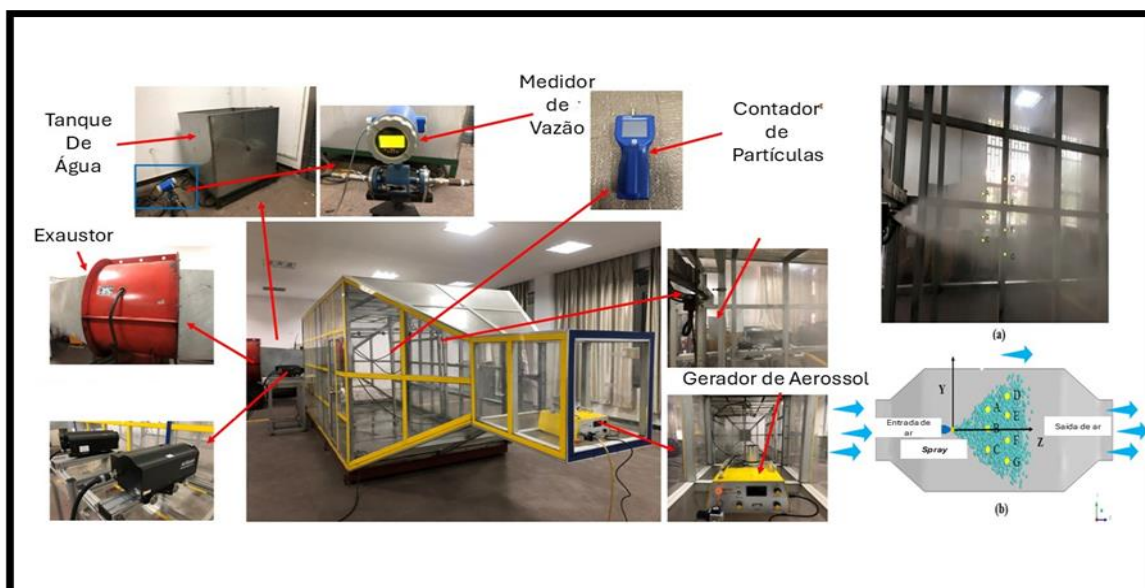


Figura 2.19. Túnel usado em teste de eficiência de bicos em máquina de fragmentação de minério.

Klenk (2012), usou um túnel (figura 2.20) 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. Poeira de carvão, alimentada por um bico injetor, foi usada nos ensaios. A quantidade de particulados foi medida separadamente de acordo com PM10, PM2,5 e PM1 antes e depois da seção de pulverização por meio de contadores de partículas. Os autores concluíram qual bico era mais eficiente para cada um dos cenários avaliando a vazão ótima para se ter uma boa relação entre consumo de água e despoeiramento por pulverização.



Figura 2.20. Túnel de avaliação da relação entre vazão e abatimento. Fonte: Klenk (2012)

Swanson e Langefeld (2015) usaram um túnel de vento, mostrado na figura 2.21, para recriar as condições subterrâneas de uma mina subterrânea. O túnel usou de controle psicrométrico podendo, desta forma, variar temperaturas e umidade para efeito de construção de mesmas condições da mina. O mesmo possui uma seção transversal quadrada de um metro de lado e é dotado de um ventilador que pode produzir velocidades de ar de até 6 m/s. A concentração da poeira foi controlada em um alimentador helicoidal, que direcionava o material a um injetor de ar para dispersão no ar de ventilação. Vários bicos foram testados nas condições de emissão desejadas para uma análise da eficiência dos mesmos em pressões de operação entre 5 bar e 40 bar.



Figura 2.21. Túnel de avaliação de eficiência de bicos em minas subterrâneas. Fonte: Swanson e Langefield (2015)

Um túnel de vento (figura 2.22) é usado por Zhao *et al.* (2021) para avaliação comparativa entre estes dinâmicos e estáticos do efeito de soluções de controle de poeira. Os autores construíram seu túnel com seis seções, incluindo (a) uma seção de geração de poeira, que espalha partículas de carvão no fluxo de ar; (b) o túnel de vento principal, onde as partículas de carvão e as gotículas da solução surfactante interagem; (c) uma seção de pulverização da solução surfactante, onde a solução surfactante é pulverizada de um bico conectado a uma bomba; (d) um ponto de medição da concentração de aerossol, onde um monitor de aerossol é usado para medir as concentrações de poeira; (e) uma seção de descarte, onde a solução residual é coletada e descartada após as principais seções de teste; e (f) um coletor de poeira, que coleta as partículas de carvão restantes na saída do túnel de vento. Os testes correlacionaram a diminuição da tensão superficial e molhabilidade consequente com a eficiência supressiva dos bicos usando essas soluções. Os resultados indicaram uma relação direta entre essas propriedades medidas separadamente. Mostraram quais as concentrações ótimas para cada surfactante usado assim como uma avaliação comparativa entre diferentes surfactantes indicando qual o mais eficiente no controle de poeira durante o manuseio mineral.

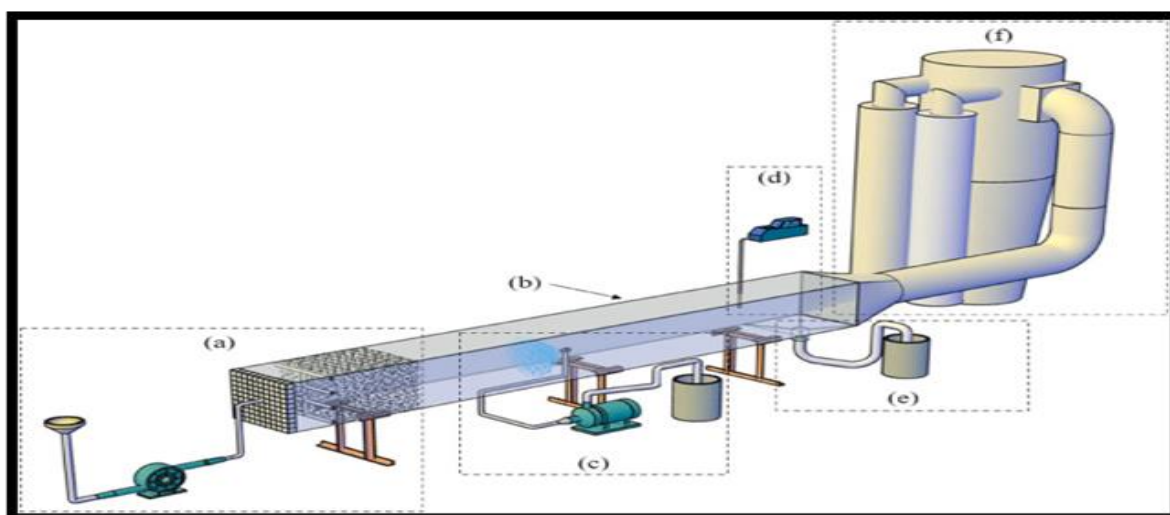


Figura 2.22. Túnel de vento usado comparando testes dinâmicos e estáticos na eficiência soluções surfactantes pulverizadas por bicos de spray para fins de abatimento de poeira. Fonte: Zhao *et al.* (2021).

Chang *et al.* (2019) usaram um túnel de vento construído com a estrutura de ferro e plástico acrílico com seção transversal de 0,5 m × 0,5 m e um

comprimento de 4,5 m, conforme mostrado na figura 2.23. A estrutura básica do túnel de vento inclui três seções: seção do gerador de pó, sistema de pulverização de água e coleta de poeira com o exaustor. Após o exaustor funcionar por 5 min, o gerador de pó começou a funcionar. O trabalho se baseou na 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. Os resultados do experimento sugerem que os surfactantes aniônicos e não iônicos são úteis para melhorar a eficiência de supressão, enquanto o surfactante catiônico não conseguiu aumentá-la.



Figura 2.23. Túnel usado na validação de estudo numérico de supressão de poeira. Fonte: Chang *et al.* (2019)

Zhou *et al.* (2017) fizeram uso de um túnel de vento de seção quadrada para realizar experimentos de supressão de poeira em escala de laboratorial para simular uma mina de carvão real. O túnel tem uma seção de teste de comprimento de 6 metros e uma seção quadrada de lado igual a 1,2 metros construída de vidro e aço, com um difusor de ar de 1,7 metros de comprimento. O método de amostragem de ar usou um contador de poeira e, por meio desse, a eficiência do controle de poeira pode ser medida através da diferença percentual das concentrações antes e depois da ação do bico de pulverização. A figura 2.24 mostra o túnel usado pelos pesquisadores. Os pesquisadores determinaram as melhores condições operacionais de bicos de pulverização

assim como as melhores condições de dosagem e amplitude do campo magnético imposto às soluções usadas no abatimento de poeira.

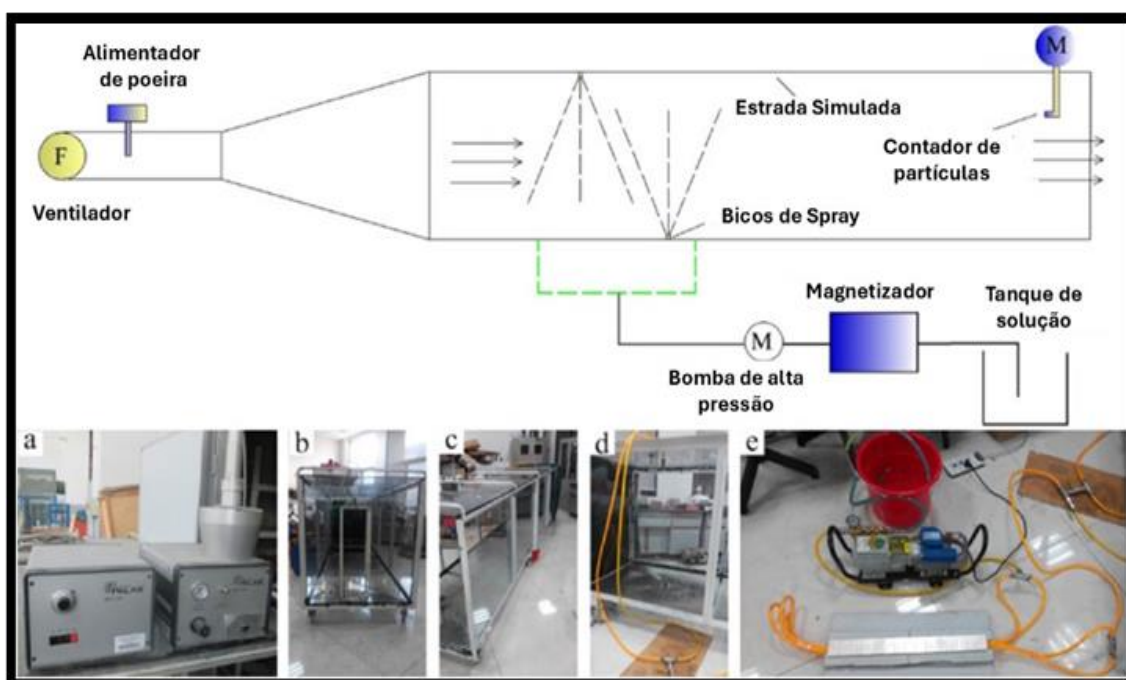


Figura 2.24. Túnel usado para avaliar o efeito da magnetização da solução a ser pulverizada no processo de abatimento. Fonte: Zhou et al. (2017).

Entende-se, desta forma, que os túneis de vento são ferramentas importantes para a ciência e largamente usados no âmbito do entendimento dos fatores de avaliação da eficiência de bicos de pulverização no abatimento de poeira.

É uma ferramenta que pode produzir diferentes dados para análise 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. Ressalta-se também a oportunidade de gerar fenômenos de emissão e abatimento em escala para aplicações reais na indústria.

Justifica-se desta forma o uso deste estado da arte na construção de um túnel exclusivamente usado para o desenvolvimento do entendimento do fenômeno de abatimento e melhoria da eficiência de bicos de pulverização no laboratório de fluidodinâmica e particulados.

3 ESTRUTURA DA BANCADA

O FLUIDPAR, estabeleceu uma frente ampla de estudos para entendimento dos processos de geração e abatimento de poeira. Alguns estudos fizeram uso de bicos de pulverização para avaliação tecnológica destes bicos em aplicações específicas no âmbito do manuseio mineral do minério de ferro. Como exemplo, Castro *et al.* (2023) avaliou uma aplicação tecnológica do uso de bicos de pulverização para o controle de poeira em um chute de transferência de um transportador de correia em escala. Os resultados identificaram importantes dados no processo de abatimento, mas mostraram também a necessidade de melhor classificar os bicos de pulverização.

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 granéis 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 3.1.

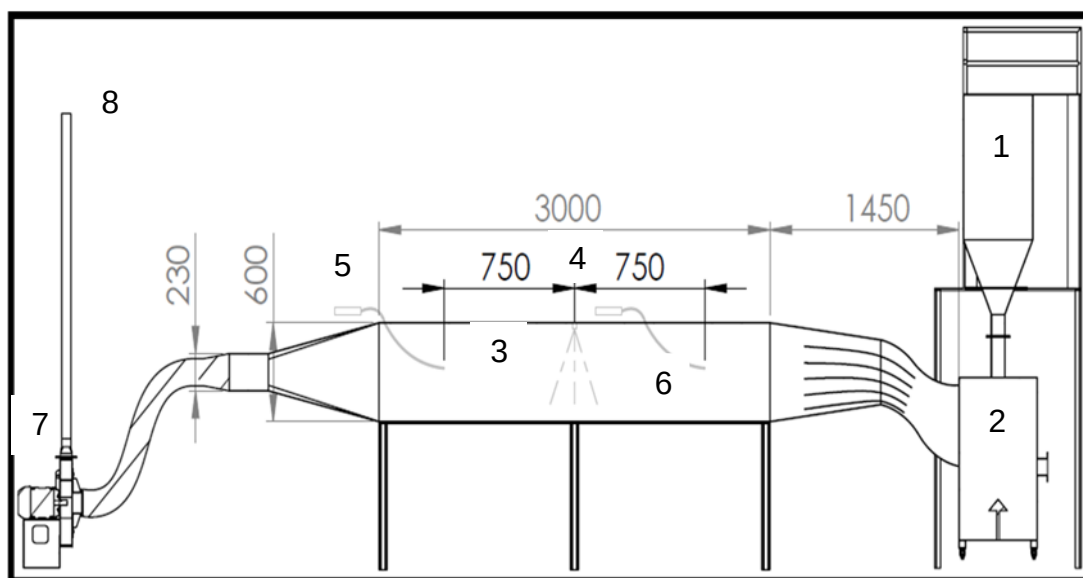


Figura 3.1. Desenho esquemático com medidas (mm) do túnel de vento. (1) Silo alimentação. (2) Caixa de geração de poeira. (3) Seção de teste. (4) Bico alimentado por máquina de spray. (5) Contador de partícula 2 [com aquecimento]. (6) Contador de partícula 1 [sem aquecimento]. (7) Exaustor controlado por inversor de frequência. (8) Exaustão e controle de poeira.

3.1 Seção de Geração de Poeira

Para gerar a poeira foi construída uma caixa de poeira de $0,36 \text{ m}^3$ de volume. A mesma é alimentada por um silo com $0,22 \text{ m}^3$ de autonomia. O material cai por acionamento de uma válvula do tipo guilhotina com uma altura de queda de $0,90 \text{ m}$. 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 $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$. 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 3.2)

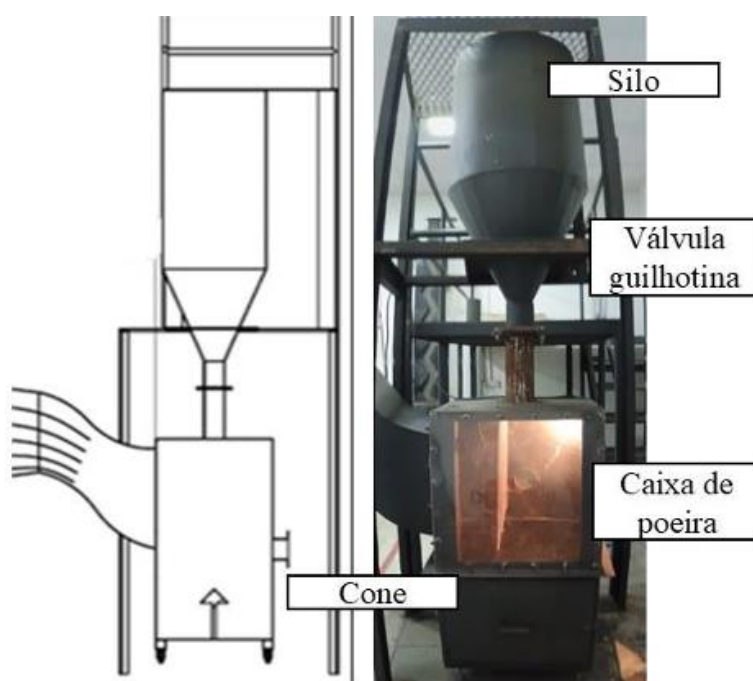


Figura 3.2. Sistema de geração de poeira.

3.2 Seção de Teste

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 de abatimento dos mesmos. A seção de teste possui portas de acesso em acrílico que mantem o estanque com gaxetas de vedação e uma iluminação interna em LED para

visualizar as condições de geração do spray e do transporte da poeira. 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 3.3).



Figura 3.3. Seção de teste. (1) Sonda com aquecimento. (2) Sonda sem Aquecimento. (3) Bico de pulverização. (4) Janela de visualização.

3.2.1 Contador de Partícula

Para a avaliação da eficiência dos bicos de *spray*, dois contadores de partículas foram usados sendo ambos do modelo CPT-100 (figura 3.4) 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 3.4. Contador de partículas CPT-100.

3.3 Seção de controle de Spray

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, conseqüentemente, 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 3.6.



Figura 3.5 Controlador de pulverização AutoJet 1550+

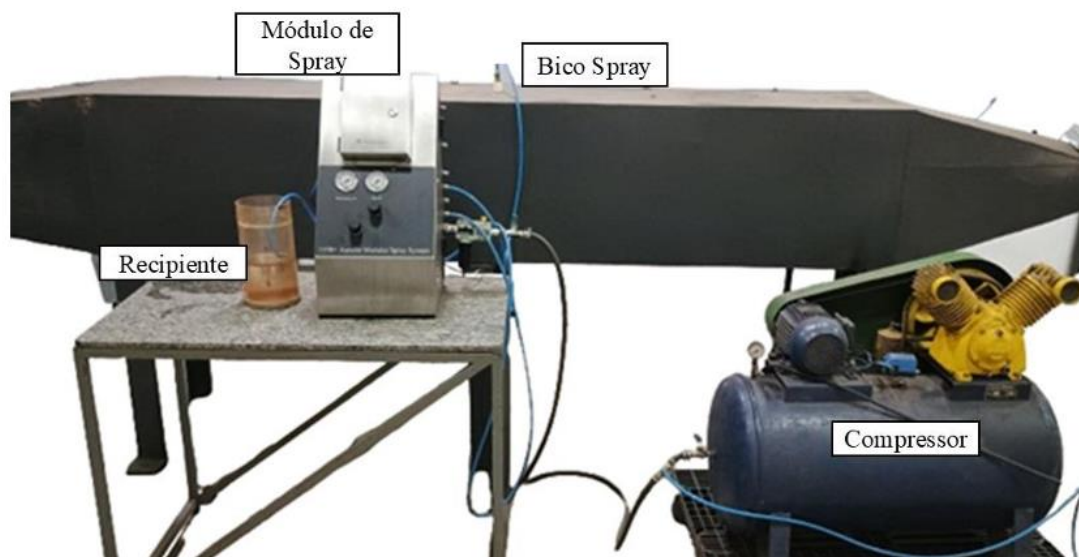


Figura 3.6 Sistema de controle de pulverização.

A continuidade desta pesquisa avaliará a influência de diferentes aditivos na eficiência de cada bico testado.

4 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS ENSAIADOS

A caracterização dos materiais é necessária neste estudo para compreender os parâmetros que influenciam a geração de poeira. A metodologia de ensaio de caracterização incluem granulometria por peneiramento, determinação da massa específica real por picnometria e a massa específica aparente.

4.1 Recebimento e Secagem

Para a validação da metodologia dos ensaios de abatimento, foram utilizados dois tipos de minério, Pellet Feed e Sínter Feed, fornecidos da mesma mina que chegaram ao laboratório em tambores de 200 litros fechados hermeticamente com o objetivo de mantê-los sem contato com o ambiente externo durante seu transporte e, portanto, com as mesmas características nas quais foram coletadas em campo. Esta análise está destacada na tabela 4.1

Tabela 4.1. Quantidades e umidades de recebimento dos materiais ensaiados.

Material Recebido*	Quantidade (kg)	Umidade
<i>Pellet Feed</i>	409,25	7,62 %
<i>Sínter Feed</i>	413,12	6,13 %

Os recebidos foram quarteados e levados a estufas por 24 horas para serem secos a temperaturas de no mínimo 110 °C e depois conduzidos às próximas etapas de caracterização. Os materiais estão descritos na figura 4.1.



Figura 4.1 Granéis usados nos ensaios

4.2 Granulometria

A granulometria foi obtida via peneiramento do material seco obedecendo A norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). Após a análise das maiores partículas contidas nas amostras, estabeleceu-se a massa mínima de amostra necessária para realização do ensaio, que foi de 1 kg para o pellet feed e 2kg para o sinter feed. Com o material seco e à temperatura ambiente, iniciou-se o peneiramento por meio de uma peneira vibratória atuando à uma amplitude de vibração de 1 mm por 15 min. Os produtos retidos nas peneiras foram pesados utilizando uma balança de precisão com capacidade máxima de 5000 g e resolução de 0,01 g. Determinou-se a porcentagem em relação à massa inicial. Os resultados estão descritos nas figuras 4.2 e 4.3.

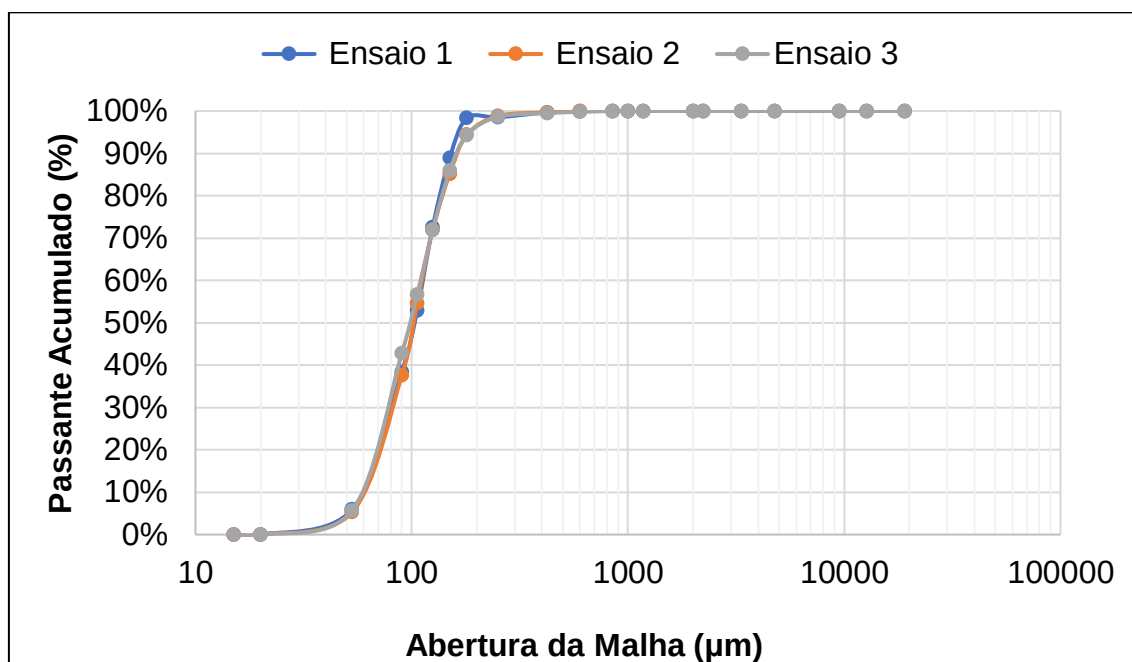


Figura 4.2. Granulometria em triplicata do pellet feed

As curvas geradas no ensaio de peneiramento para o pellet feed mostram uma regularidade granulométrica característica deste insumo da mineração do minério de ferro, assim como um grande percentual de finos, com ênfase ao fato de que o D50 (Diâmetro médio) é da ordem dos 100µm. Partículas respiráveis, abaixo de 20µm, equivalem a cerca de 2,5% do material manuseado. Ao analisarmos as quantidades em toneladas nas quais esse granel é manuseado na indústria, nota-se o grande potencial de geração de nuvens de poeira respirável em seu manuseio em caso de não ser suprimida.

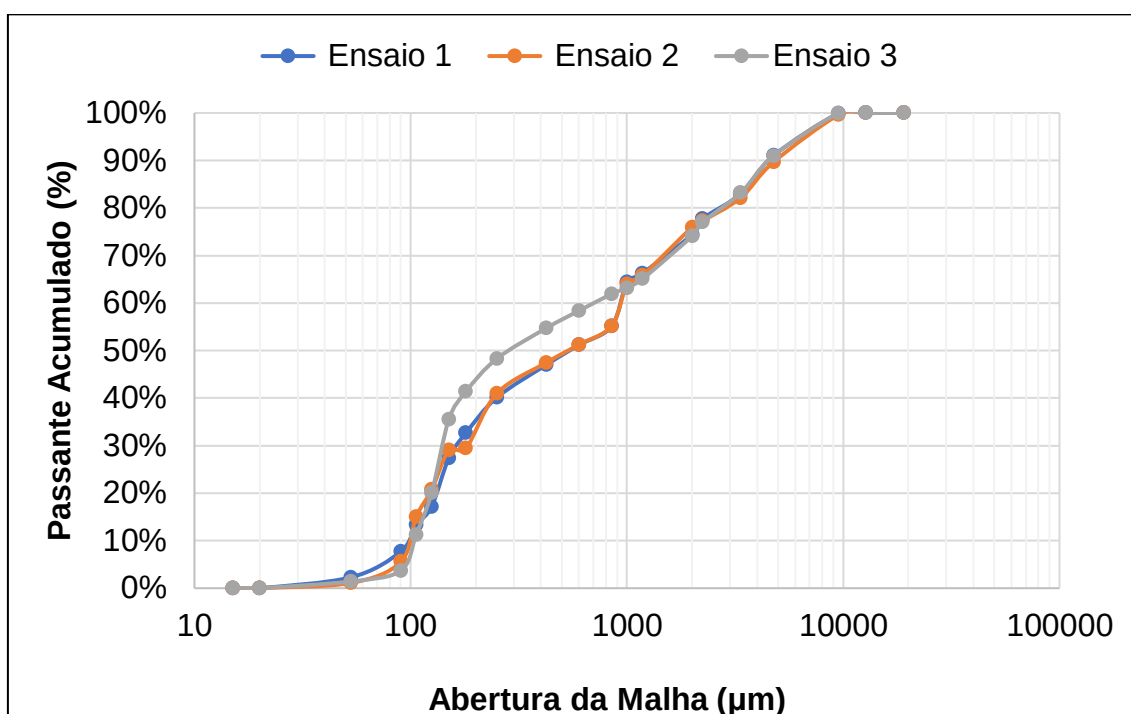


Figura 4.3 Granulometria em triplicata para o sínter feed.

Já no caso do sínter feed, nota-se que, por meio dos dados resultantes do ensaio de granulometria, possui um D50 na ordem de 600µm. É um material com granulometria mais irregular e com menos finos. Diferente do pellet feed, cerca de 1% do material ensaiado possui granulometria abaixo dos 20µm. Espera-se desta forma uma emissão mais moderada deste granel durante os ensaios de abatimento dos particulados gerados em seu manuseio.

4.3 Massa específica aparente.

No intuito de avaliar o comissionamento dos materiais ensaiados, foi realizado o ensaio de massa específica aparente onde se determina o quanto de volume que uma quantidade específica de um material ocupa a uma determinada umidade. Para este fim preencheu-se um cilindro cerâmico que possui o volume (V_c) de $1000 \text{ cm}^3 \pm 0,3 \text{ cm}^3$ com cada um dos materiais na condição seca, que será a condição dos ensaios. O procedimento está registrado na figura 4.4. O ensaio é realizado em triplicata com o auxílio de uma balança de precisão de modelo já citado neste trabalho.



Figura 4.4 Recipiente utilizado na metodologia de aquisição da massa específica aparente de cada material.

Seguiu-se a seguinte metodologia nos ensaios:

1. Pesagem da massa do cilindro vazio para efeito de tara;
2. Preencheu-se o cilindro em camadas com o material esquartejado e seco para evitar espaços vazios;
3. Utilizando um raspador, o material em excesso ao volume do cilindro foi removido;
4. Pesou-se, em triplicata, a massa do cilindro com os dois materiais;
5. Calculou-se para cada ensaio a massa aparente seguindo a seguinte equação:

$$\rho_{\text{aparente}} = \frac{\text{Massa Do cilindro com Material} - \text{Massa Do Cilindro}}{\text{Volume do Cilindro}} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad (4.1)$$

O resultado dos ensaios em triplicata para cada material está na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Massa específica aparente dos materiais (g/cm³)

Material *	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
<i>Pellet Feed</i>	1,83	1,92	1,87	1,87
<i>Sínter Feed</i>	2,41	2,39	2,46	2,42

4.4 Massa específica real

Para a aquisição da massa específica real (ρ_s) das amostras de minério de ferro foi utilizada o método de picnometria que é definida pelos seguintes passos:

1. Pesou-se o picnômetro (Figura 4.5) vazio (P1), previamente limpo e seco, em estufa, a 100°C e resfriado em dessecador;



Figura 4.5. Procedimento de picnometria

2. O picnômetro foi preenchido com água até transbordar, secou-se a água da superfície externa do mesmo e, em seguida, pesou-se o picnômetro com a água (P4);
3. A diferença entre os pesos do picnômetro com água e sem água é a massa de água utilizada. Sabendo-se o volume de água colocada no picnômetro pode-se determinar a massa específica da água ou de outro líquido utilizado;
4. Adicionou-se a amostra de sólido no picnômetro e, em seguida, pesou-se todo o conjunto (vidro+água+sólido), obtendo-se o valor de (P2);

5. A massa de água adicionada ao picnômetro com amostra foi determinada pela diferença entre a massa do picnômetro com a amostra e água (P3) e a massa do picnômetro com a amostra (P2);
6. O volume de água adicionado foi 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 foi determinado pela diferença entre o volume total do picnômetro e o volume de água adicionada (etapa 6);
8. A massa específica da amostra foi 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, realizou-se todos os ensaios dos materiais em triplicata.
10. Anotou-se os dados obtidos e realizou-se os cálculos da massa específica do material utilizando a Equação (4.2).

$$\rho_s = \frac{(P_2 - P_1)}{((P_4 - P_1) - (P_3 - P_2))} \quad (4.2)$$

Os valores de massa específica real para cada amostra de minério de ferro utilizada neste estudo, conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 1. Massa específica real dos materiais (g/cm³)				
Material *	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
<i>Pellet Feed</i>	4,83	4,72	4,77	4,77
<i>Sínter Feed</i>	4,21	4,29	4,17	4,22

5 METODO DO ENSAIO DE MEDIÇÃO DE EFICIÊNCIA DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO

Com o objetivo de estudar a eficiência operacional de diferentes bicos de spray em diferentes condições operacionais fez-se uso do túnel de abatimento anteriormente mostrado no presente trabalho para aferir a capacidade de

redução de poeira no manuseio de pellet feed e sinter feed. O objetivo é simular o manuseio destes granéis para gerar poeira que será encaminhada a ação dos bicos previamente instalados e operados a diferentes pressões para análise de sua eficiência. Para consolidação destes ensaios, alguns testes de comissionamento foram necessários, como cálculo de velocidades de transporte das partículas de interesse, uma análise do fluxo via CFD e teste de perfil de emissão para localização de pontos críticos para possíveis zonas de emissão dentro da seção de teste.

5.1 Velocidades de Testes

As velocidades de ensaios foram determinadas a partir da escolha do diâmetro de interesse. Para este fim, avaliou-se, com base nas condições de contagem do contador de partícula CPT-100 que mede partículas de no máximo 10µm, que para fins de cálculo, o diâmetro seria o de 50µm, que aumenta em 500% a capacidade de arraste das partículas de interesse, o que compensaria a expansão no interior da seção do túnel assim como sua eventual perda de carga e precipitação das partículas. O granel base para os cálculos foi o pellet feed, que possui uma massa específica maior. Nestes parâmetros as partículas dos dois granéis seriam aere transportadas para a seção de teste nas condições do ensaio.

Desta forma, usando-se a equação 2.7 temos as seguintes variáveis:

Diâmetro da partícula (d_p) = 50µm = 50×10^{-6} m.

Densidade da partícula (ρ_p) = 4,77 g/m³ = 4220 kg/m³

Densidade do ar (ρ_f) = 1,1415 kg/m³ (aproximado para 30°C);

Viscosidade do ar (μ) = $1,89 \times 10^{-5}$ Pa·s (aproximado para 30°C);

Gravidade (g) = 9,81m/s

Nestes parâmetros encontra-se a velocidade terminal:

$$v_t = \frac{1}{18} \cdot \frac{d_p^2 g (\rho_p - \rho_f)}{\mu_f} = \frac{3,402 \times 10^{-4}}{1,1694 \times 10^{-4}} = 0,344 \frac{m}{s}$$

Calcula-se a força de campo gravitacional, ou peso, usando-se a equação 2.1, temos:

$$F_{cg} = \rho_p \cdot \left(\frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_p}{2} \right)^3 \right) = (4220 \times \left(\frac{4}{3} \pi \left(\frac{50 \times 10^{-6}}{2} \right)^3 \right)) \times 9,81 = 3,06 \times 10^{-10} \text{ N}$$

E por último calculou-se a velocidade capaz de arrastar a partícula horizontalmente com as características geométricas e físicas determinadas usando-se a equação 2.2

$$v_a = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{cg}}{C_d \cdot \rho_f \cdot A_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 3,06 \times 10^{-10}}{24 \times 1,145 \times 1,963 \times 10^{-9}}} = 0,337 \text{ m/s}$$

Com estes dados em mãos, foram realizados testes de velocidade para definir o range de operação do túnel comparados com os parâmetros de capitação de partícula de minério de ferro e para definição dos protocolos iniciais de teste para a obtenção dos resultados. Para este fim foram utilizados um tubo de pitot associado a um manômetro digital. A conclusão é que, para o diâmetro de interesse definido em 50µm para o pellet feed, os testes mostraram que as velocidades mínimas de capitação das partículas são alcançadas satisfatoriamente e a velocidade máxima na seção de teste é de 1,4 m/s. Estes testes foram importantes para comparar os limites de velocidade alcançados na seção de teste e avaliar, com base no diâmetro de interesse, se o ventilador conseguiria atender as condições de suspensão e transporte dessas partículas. Estes resultados são mostrados na figura 32, que mostra que a velocidade de interesse para o transporte a partícula de 50µm é da ordem de 0,337 m/s. Como as velocidades tanto da seção de testes como na seção de geração de poeira são alcançadas satisfatoriamente, as partículas podem ser transportadas eficientemente até os pontos de atuação dos diferentes bicos sprays usados para efetiva mensuração de suas eficiências. Além disso, testes adicionais em outras velocidades podem ser realizados a fim de se obter o grau de efetividade de abatimento em outras condições de contorno.

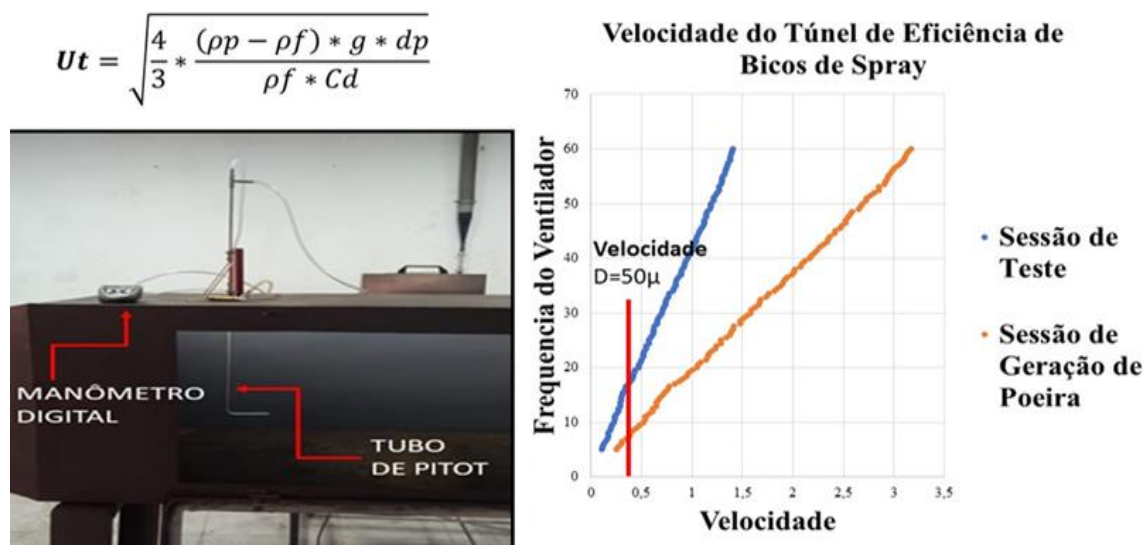


Figura 5.1. Velocidade de transporte x velocidade do túnel de abatimento

Com estes dados foram definidos duas velocidades para a realização dos ensaios que são 0,6 m/s que é imediatamente maior que a velocidade de corte calculada e 1,4 m/s que é a velocidade máxima. É importante ressaltar que estas velocidades foram realizadas, pelo menos em parte, em estudos como o de Swanson e Lagefeld (2021) e Fritz *et al.* (2010) que focaram especificamente em emissões com fluxo de ar em baixas velocidades. No caso dos mesmos fizeram a avaliação dos bicos de interesse para as velocidades de 1,0 m/s entre outras. Isto mostra que é possível construir um protocolo de ensaio em baixas velocidades, mas que também em um segundo momento, esta pesquisa precisa continuar com foco em mudanças estruturais da bancada para aumento das velocidades de testes da mesma.

5.2 Simulação CFD nas Velocidades de Ensaio

Para analisar o perfil de velocidade na seção de testes, foi realizada uma simulação de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) utilizando o software ANSYS Fluent. O objetivo foi verificar a distribuição de velocidade em diferentes pontos do duto sob as duas condições de escoamento pré-definidas. A simulação considerou um escoamento de ar a uma temperatura constante de 30°C, modelado como incompressível, que são condições normais no escoamento do ensaio em suas condições. O modelo de turbulência adotado foi

o SST (Shear Stress Transport). As condições de contorno foram definidas da seguinte forma:

- Entrada: Pressão estática de 0 Pa, garantindo que o escoamento fosse impulsionado pela diferença de pressão gerada pela vazão mássica de saída.
- Saída: Vazão mássica definida para alcançar velocidades médias de 0,6 m/s e 1,4 m/s na seção de análise do duto.
- Paredes: Consideraram-se condições de não deslizamento (*no-slip*) e isothermicidade.
- O domínio do problema foi discretizado utilizando uma malha não estruturada com volumes tetraédricos. A análise foi realizada em regime estacionário, e o solver adotado foi baseado no método de volumes finitos. Para garantir a convergência, foram monitorados os resíduos com critério de parada em 10^{-5} para o momento e continuidade.

Os dados apresentados na figura 5.2 indicaram que a distribuição do perfil de velocidade na seção de teste não é uniforme devido às características construtivas dele. Observou-se que, para o caso com velocidade média de 0,6 m/s, o perfil de velocidade apresentou valores mais baixos na parte inferior do duto, sugerindo uma possível assimetria no escoamento causada por efeitos de entrada. Já no caso de velocidade média de 1,4 m/s, foi identificado um comportamento inverso, com valores de velocidade mais elevados na região superior do duto. Esse comportamento pode estar relacionado ao aumento da intensidade, de turbulência em maiores velocidades, que tende a redistribuir a energia cinética do escoamento além de efeitos secundários devido à forma da entrada e saída do duto.

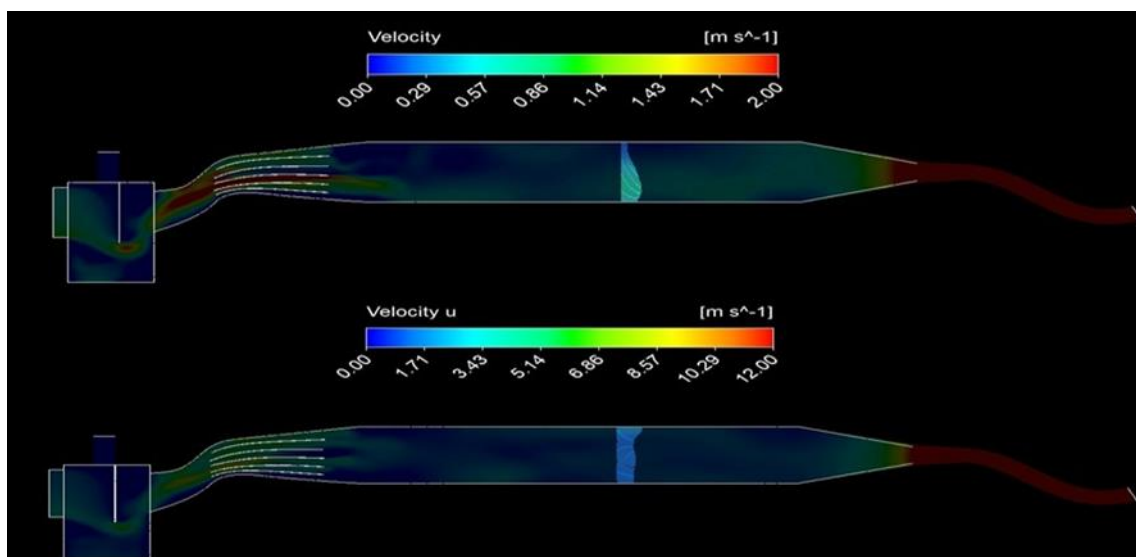


Figura 5.2. Simulação de escoamento para construção de perfil de escoamento para 0,6 m/s (acima) e 1,4 m/s (abaixo).

Espera-se com base nos dados obtidos que, pelo fato da partícula ter o comportamento de acompanhar o fluxo do ar, que as maiores emissões estejam na parte de baixo, para a velocidade de 0,6 m/s na parte de cima para a velocidade de 1,4 m/s. Um teste de perfil de emissão seria necessário para isso.

5.3 Teste de Emissão

Com base nos resultados da simulação, foram realizados uma análise do perfil de emissão no centro da seção de teste e na mesma posição do bico de spray. Partindo-se da parede inferior da seção de teste, variou-se as medidas escalonando as mesmas de 100mm em 100mm. Foram realizados estes testes para as velocidades de 0,6 m/s e 1,4 m/s. Conforme mostrado na figura 5.3, demonstrou que a 0,6 m/s a maior emissão ocorre a 100 mm do fundo da seção de teste enquanto a 1,4 m/s a maior emissão é a 500 mm do mesmo. Portanto, estes são os pontos críticos para as velocidades em questão e os ensaios posteriores usarão estas posições para a sonda dos contadores de partículas durante os testes de eficiência.

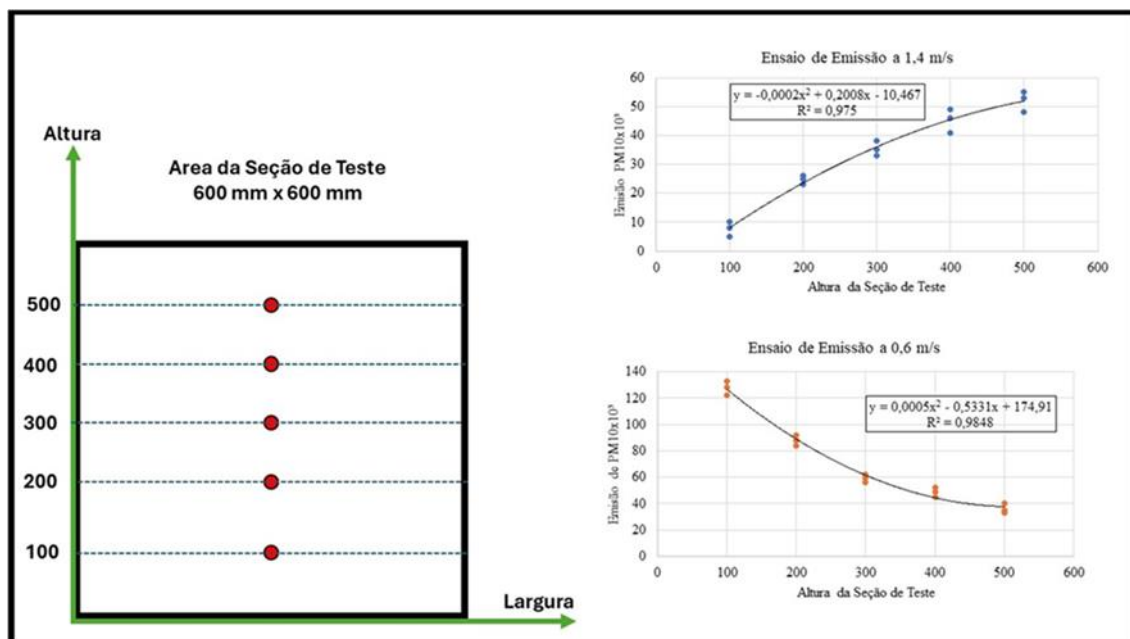


Figura 5.3. Construção do perfil de emissão para as velocidades de 0,6 m/s e 1,4 m/s

O próximo passo era o comissionamento dos contadores de partículas para a finalidade de avaliação dos bicos. Se fez uma análise de interação dos mesmos com o ambiente interno com a influência dos bicos de *spray*.

5.4 Teste de Contagem de Partículas na Zona de Pulverização da Seção de Teste

Foram realizados testes que avaliaram o comissionamento geométrico dos bicos na seção de teste com o fim de analisar configuração de posicionamento no mesmo. Ao mesmo tempo foi analisado a interação de gotas com o contador de partículas. O resultado identificou que o *spray* preenche satisfatoriamente a seção de teste, porém, o contador de partículas identifica as gotas como partículas, como mostrado na Figura 5.4. Isto interferiria nos resultados da avaliação dos bicos já que gotas e partículas seriam contabilizadas pelos contadores.

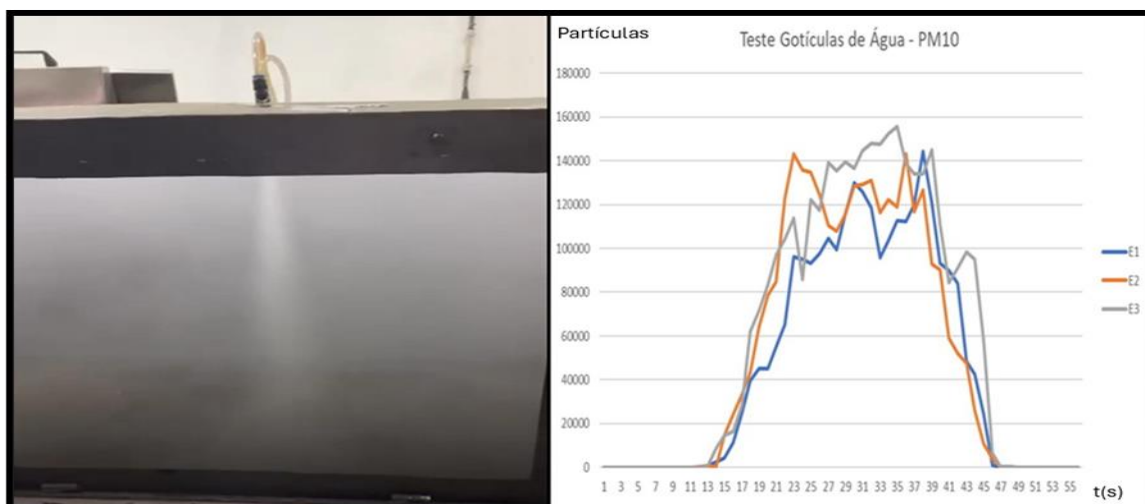


Figura 5.4 Teste de avaliação do contador de partícula em ambiente da seção de teste dos bicos de spray.

Desta forma haveria duas formas de tratar o ar aspirado que seria por evaporação por geração de uma câmara de desumidificação química ou por elevação da temperatura. Dadas as condições de comissionamento, optou-se por avaliar uma solução via aquecimento.

Uma abordagem é a lei do diâmetro quadrado que descreve a relação entre a taxa de evaporação de uma gota esférica e a variação do quadrado do seu diâmetro ao longo do tempo. Aplicando essa lei ao problema de uma gota com diâmetro conhecido passando por um tubo aquecido, pode-se determinar a taxa de evaporação ao longo de sua trajetória.

À medida que a gota se desloca no tubo e recebe calor do ambiente, seu diâmetro diminui proporcionalmente ao tempo de exposição ao calor. A Lei do Diâmetro Quadrado permite prever o tempo necessário para a completa evaporação da gota, fornecendo um modelo matemático que relaciona a redução do diâmetro da gota com o processo de transferência de calor. A mesma é definida por:

$$D^2_0 = D^2_d + K_d \cdot t_e \quad (5.1)$$

Onde:

- D_0 é o diâmetro inicial da gota
- D_d é o diâmetro final da gota
- K é a constante de evaporação
- t_e é o tempo de evaporação.

Quando o objetivo é a evaporação total D_d é igual a zero e a fórmula simplifica-se da seguinte forma:

$$t_e = \frac{D_0^2}{K_d} \quad (5.3)$$

A mesma foi abordada por estudos de Chaves (2021) e Pinheiro et al. (2018). Os autores avaliaram a evaporação de gotículas geradas por bicos de spray para aplicações tecnológicas específicas. Para fins de simplificação, os autores consideraram a simetria esférica da gota, propriedades de transporte constantes, temperatura da gota uniforme e constante e a desconsideração dos efeitos da radiação. Aplicando-se ao túnel da presente pesquisa, foi avaliado uma sonda de 0,8m de comprimento com 10mm de diâmetro seria aquecida por uma resistência a uma temperatura de 170° a uma taxa de evaporação, levando em condições da água como fluido nas temperaturas do ensaio, estimada em $1,16 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (Lefebvre e McDonell, 2017). A gota é a maior gerada entre os bicos usados nos ensaios que é de 400µm.

As condições de contorno são:

Q – Vazão do Contador de partículas

v - Velocidade da partícula na sonda

D_s – Diâmetro da sonda

L - Comprimento da sonda

D_0 - Diâmetro inicial da gota

t_e - Tempo de evaporação

Realizando os cálculos com base nos dados obtêm-se:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_s^2} = \frac{4 \cdot 4,71 \cdot 10^{-5}}{\pi \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2} = 0,6 \text{ m/s}$$

$$t = \frac{L}{v} = \frac{0,8}{0,6} = 1,33 \text{ s} \quad (5.4)$$

Este é o tempo que a gota percorre normalmente nas condições de vazão impostas pela aspiração do contador de partículas.

Aplicando-se as condições simplificadas da Lei do Diâmetro quadrado e a metodologia de Chaves (2021) temos que:

$$t_e = \frac{D_0^2}{K_d} = \frac{(400 \cdot 10^{-6})^2}{1,16 \cdot 10^{-5}} = 0,0137s \quad (5.5)$$

Como $t_e < t$, entende-se que esta gota para as condições de transporte da mesma evaporar-se-ia antes do fim do percurso. Para consolidação deste modelamento foi realizado um teste de contagem usando-se uma fita resistiva para o aquecimento da sonda de amostragem nas condições estipuladas. O resultado é demonstrado na figura 5.5. Nas duas velocidades, foram feitos em três cenários que seriam ensaio em vazio, ou seja, sem *spray* apenas aspirando o ar nas condições internas do túnel limpo; com a geração do *spray* e sem aquecimento e, por último, com *spray* e aquecimento nas condições determinadas. 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. O próximo passo é construir um protocolo de ensaio para a finalidade perfil de emissão do túnel para avaliação os pontos de maior emissão no mesmo. Isto garantirá para a metodologia a avaliação da eficiência de abatimento de poeira do minério de ferro nas condições críticas, o que alimenta o *status* inicial das análises para esta pesquisa em consolidação no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados e encorpar a pesquisa no âmbito do manuseio mineral com ênfase na redução de emissão.

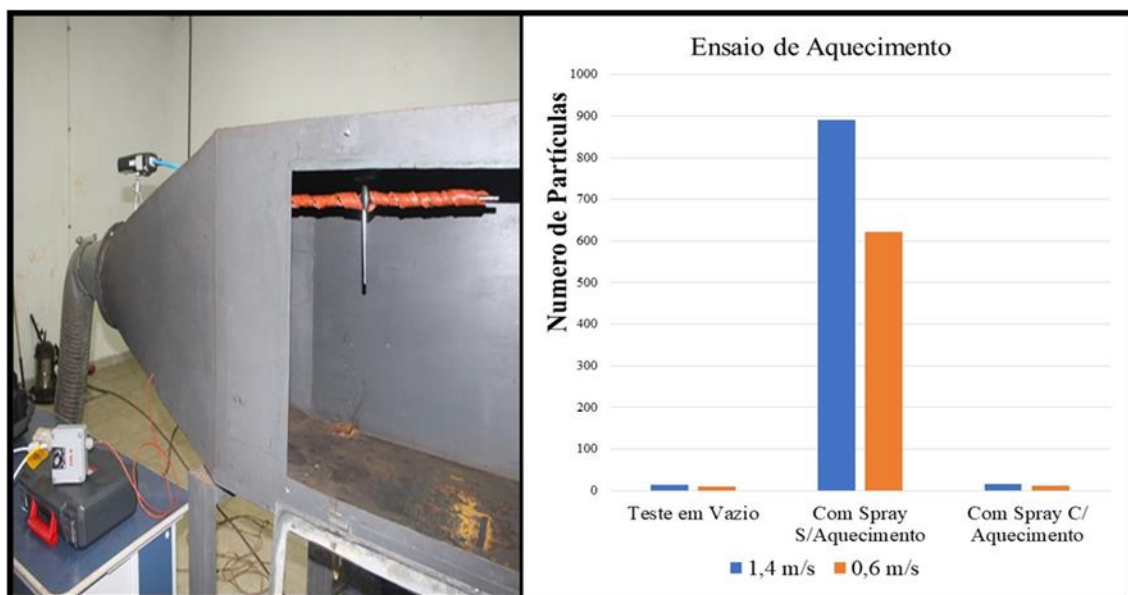


Figura 5.5. Ensaio de evaporação no sistema de amostragem e contagem de partículas.

5.5 Protocolo de Ensaio

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 com a posição das sondas dos contadores localizadas nos pontos críticos encontrados no teste do perfil de emissão. 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 5.6 mostra de forma esquemática esta metodologia.

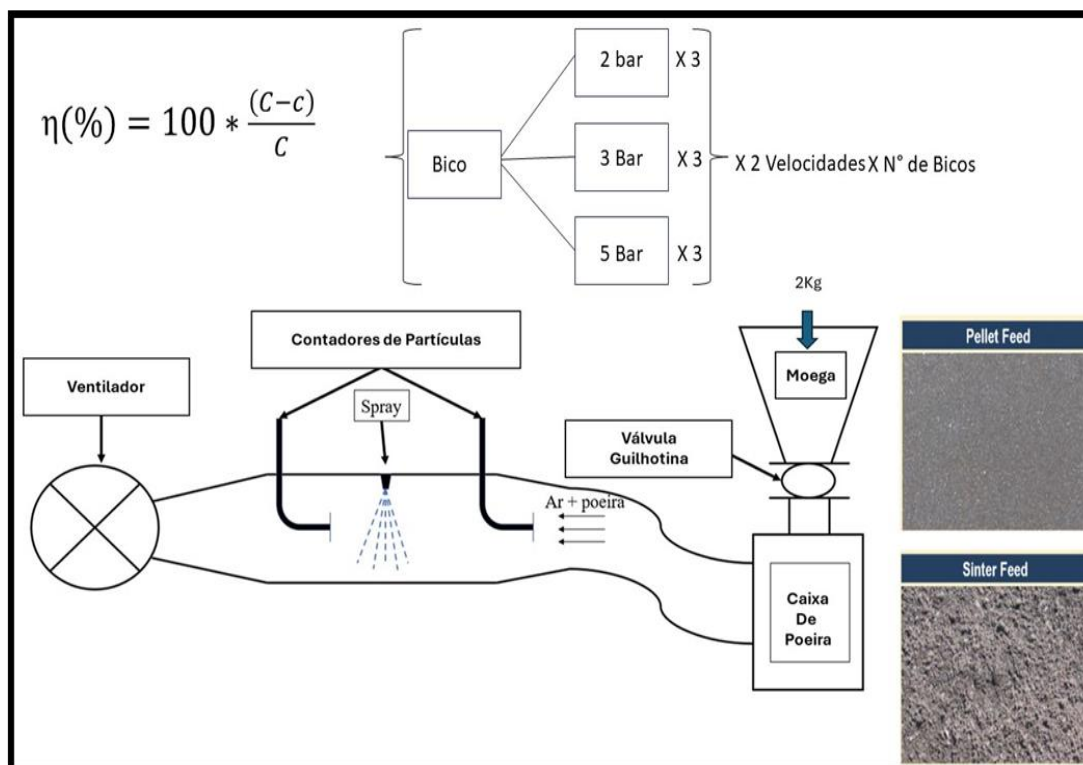


Figura 5.6 Diagrama esquemático da metodologia de ensaio de eficiência de bicos de spray em um túnel de vento

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

- 1- Realizar limpeza e aspiração do ambiente para evitar sujeiras que influenciem nos resultados dos ensaios.
- 2- Faz-se o teste em vazio para verificação de PM10 abaixo das 10 partículas para consideração de ambiente limpo do ponto de vista metodológico. Caso não esteja, refazer (1) até o alcance desta condição de limpeza.
- 3- Alimenta-se o silo com 2kg do material a ser ensaiado previamente seco.
- 4- Alimenta-se o reservatório do sistema de pulverização *Autojet 1550+* com água suficiente para uma triplicata e configura-se a máquina para a pressão de ensaio correspondente.
- 5- Aquece-se a resistência até a temperatura interna da sonda de amostragem equivaler a 170° ou mais na entrada da mesma.
- 6- Liga-se o spray
- 7- Liga-se os contadores 3 segundos de *delay* de contagem pré-programados e contagem efetiva por 15 segundos.

- 8- Aciona-se a válvula guilhotina para a queda do material.
- 9- Limpa-se silo, guilhotina e caixa de poeira retirando-se totalmente o material ensaiado e aspira-se para evitar particulados que prejudiquem os demais ensaios.
- 10- Repete-se (1) e (2) para a finalização do ensaio e em preparação aos que se seguem.

A figura 5.7 sintetiza os procedimentos desta metodologia.

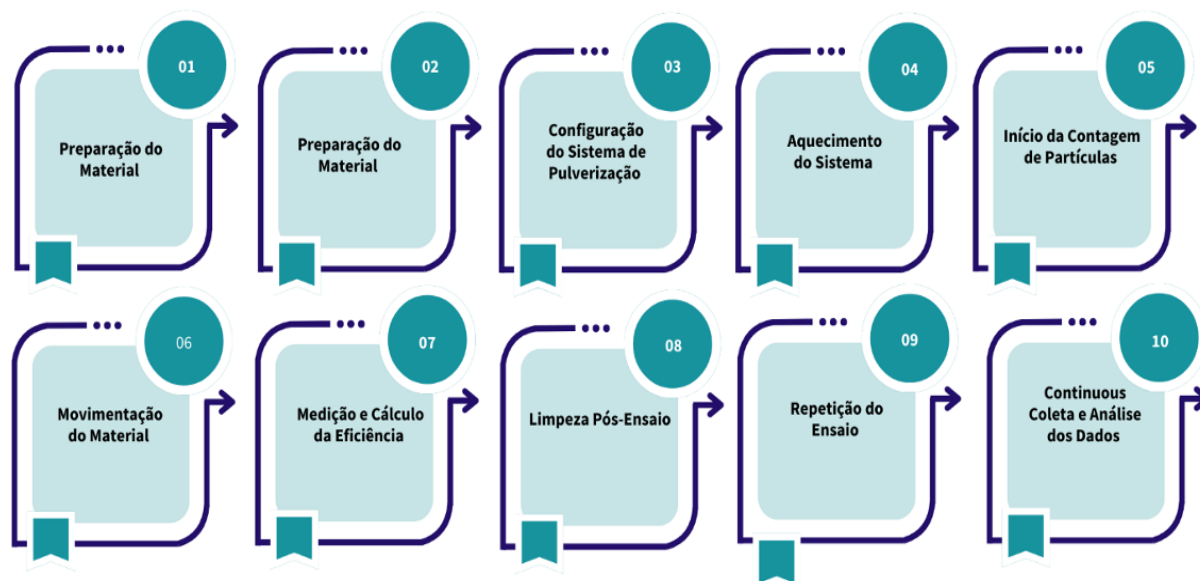


Figura 5.7 Sequência de atividades da metodologia de ensaio.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a aplicação da metodologia criada foram separados 5 diferentes tipos de bicos com características próprias para abater poeira dos dois granéis preparados nas mesmas condições, ou seja, mesma quantidade, mesma umidade, mesma altura de queda e mesmas velocidades de transporte da nuvem de poeira, a saber, 0,6 m/s e 1,4 m/s. 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 6.1 mostra os bicos escolhidos para os ensaios. São eles, cone cheio, cone oco cone leque, cone névoa (cone múltiplo) e bico atomizado a ar. Este último operou nas três pressões de água anteriormente citadas a uma pressão constante de ar de 3,0 bar. O tratamento dos dados usou uma linha de tendência polinomial de 2ª ordem. Os resultados estão demonstrados nas próximas seções deste capítulo.



Figura 6.1. Bicos utilizados nos ensaios.

6.1 Emissão de Pellet Feed

Na figura 6.2 pode-se observar a comparação da eficiência de abatimento de poeira de um bico do tipo "Cone Cheio" em função da pressão da água, considerando nas duas velocidades de transporte da poeira.

Para a velocidade de 0,6 m/s, a eficiência de abatimento atinge o pico (cerca de 43%) em uma pressão próxima de 2 bar. Para a velocidade de 1,4 m/s, o pico de eficiência ocorre em torno de 3 bar, com valor máximo de aproximadamente 35%. A eficiência de abatimento é maior para a velocidade de 0,6 m/s em pressões mais baixas (até 2 bar). Em pressões mais altas (acima de 3 bar), a eficiência para 1,4 m/s começa a diminuir mais rapidamente do que para 0,6 m/s, indicando que pressões elevadas podem ser menos eficazes para partículas com maior velocidade.

Os coeficientes de determinação (R^2) indicam que os ajustes polinomiais se adequam bem aos dados ($R^2 > 0,91$), reforçando a confiabilidade das tendências observadas. Nenhuma das configurações testadas ultrapassa a eficiência de 50%, sugerindo que o bico pode ter limitações em condições específicas em velocidades de partículas mais altas e pressões de spray mais elevadas.

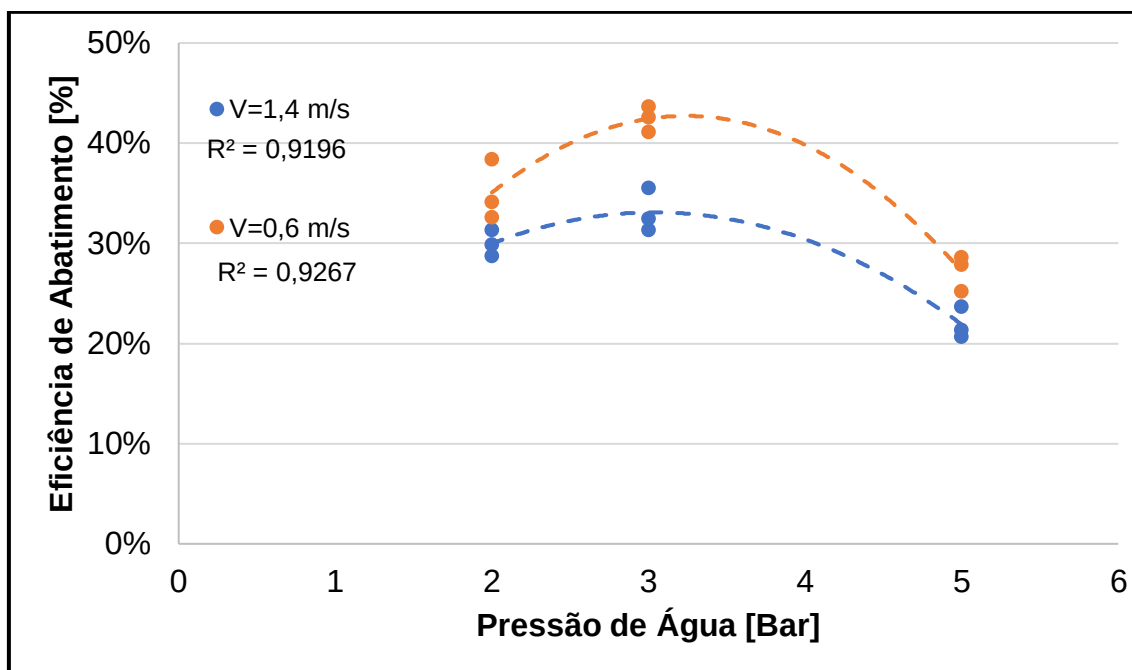


Figura 6.2. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone cheio em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida.

A figura 6.3 mostra a eficiência de abatimento de poeira de um bico do tipo "Cone Oco", em função da pressão da água, para as duas velocidades. Para a velocidade de 0,6 m/s, a eficiência de abatimento atinge seu pico (aproximadamente 75%) a uma pressão de 2 bar.

Para a velocidade de 1,4 m/s, o pico de eficiência é ligeiramente inferior, atingindo cerca de 70% na mesma pressão (2 bar). A eficiência para 0,6 m/s é superior à de 1,4 m/s em pressões mais baixas (2 bar), mas ambas as curvas apresentam um comportamento semelhante. A eficiência para a velocidade de 1,4 m/s diminui mais rapidamente quando a pressão ultrapassa 3 bar, enquanto para 0,6 m/s a eficiência se mantém mais estável em pressões mais altas.

Os coeficientes de determinação (R^2) indicam que os ajustes polinomiais são adequados para ambos os conjuntos de dados ($R^2 > 0,91$), sugerindo um bom nível de confiança nas tendências observadas. O bico "Cone Oco" demonstrou uma eficiência de abatimento superior ao "Cone Cheio", atingindo picos de eficiência de até 75% a 2 bar, o que pode indicar uma maior eficácia de captura de poeira nesse tipo de bico. O bico "Cone Oco" apresenta uma maior eficiência de abatimento em comparação ao "Cone Cheio", especialmente em pressões de 2 bar, onde a eficiência atinge 75% para 0,6 m/s. Para pressões mais altas, a eficiência diminui, especialmente para velocidades de 1,4 m/s.

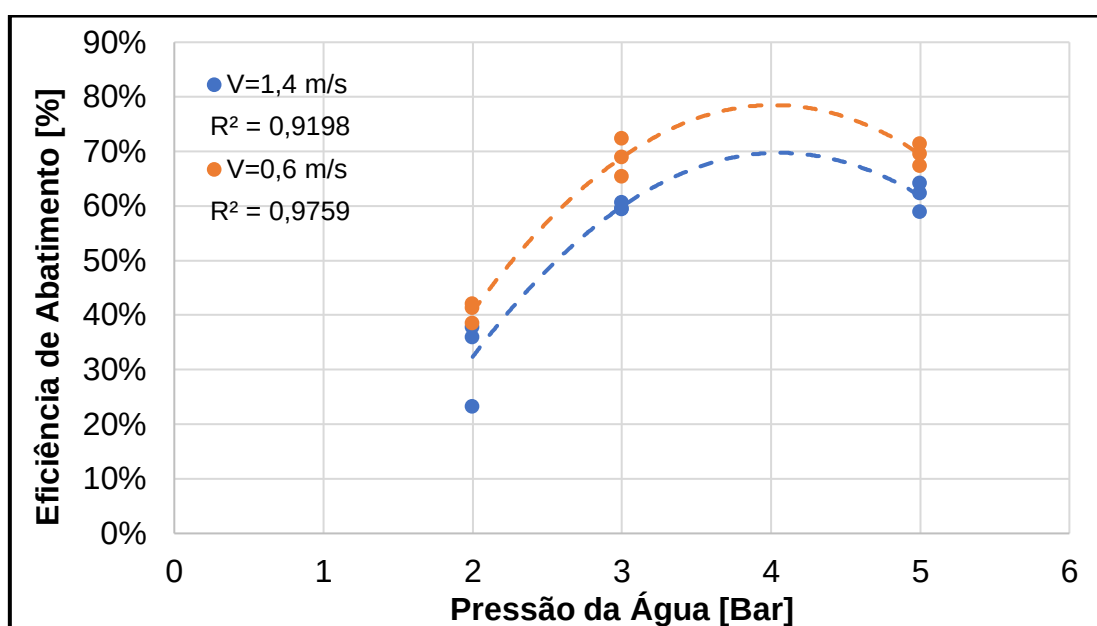


Figura 6.3. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone oco em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida.

O gráfico apresentado na figura 6.4 mostra a eficiência de abatimento de poeira de um bico do tipo "Cone Leque", em função da pressão da água, para duas velocidades. Para a velocidade de 0,6 m/s, a eficiência de abatimento atinge aproximadamente 93% a 2 bar. Para a velocidade de 1,4 m/s, a eficiência de abatimento atinge cerca de 83% a 2 bar, sendo menor que a eficiência observada para 0,6 m/s.

O coeficiente de determinação (R^2) para ambas as curvas é um pouco mais baixo do que nos gráficos anteriores, mas ainda razoavelmente bom (R^2 entre 0,85 e 0,88), indicando uma boa, mas menos precisa, adequação da curva polinomial aos dados.

O bico se destaca com a maior eficiência de abatimento entre os bicos testados, alcançando até 93% a 2 bar para partículas com velocidade de 0,6 m/s. Isso sugere que o "Cone Leque" é mais eficaz, assim como os demais, para partículas de poeira com menor velocidade e para pressões de água mais baixas.

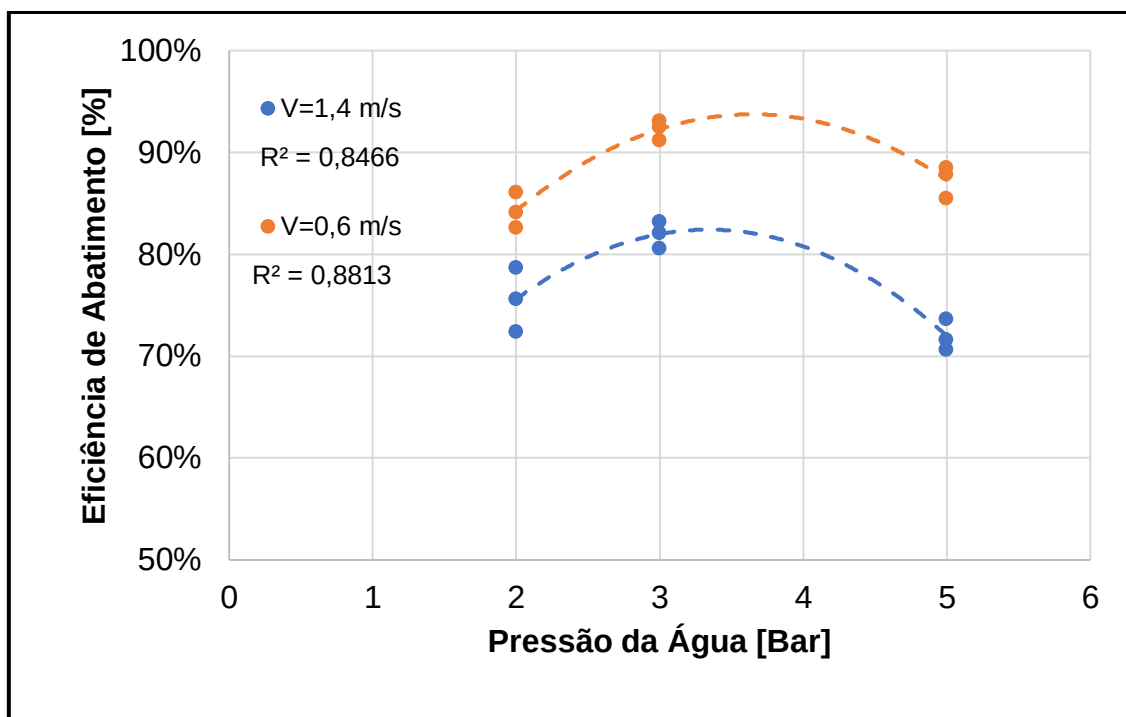


Figura 6.4. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone leque em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida.

O gráfico apresentado na figura 6.5 mostra a eficiência de abatimento de poeira de um bico do tipo "Cone Névoa", em função da pressão da água, para

as duas velocidades. Para a velocidade de 0,6 m/s, a eficiência de abatimento atinge aproximadamente 90% a 5 bar. Para a velocidade de 1,4 m/s, a eficiência de abatimento atinge cerca de 81% a 5 bar, sendo menor que a eficiência observada para 0,6 m/s.

Os coeficientes de determinação (R^2) indicam que os ajustes polinomiais são adequados para ambos os conjuntos de dados ($R^2 > 0,91$), sugerindo um bom nível de confiança nas tendências observadas. O bico "Cone Névoa" se destaca pela alta eficiência de abatimento entre os bicos testados, alcançando até 90% a 2 bar para partículas com velocidade de 0,6 m/s.

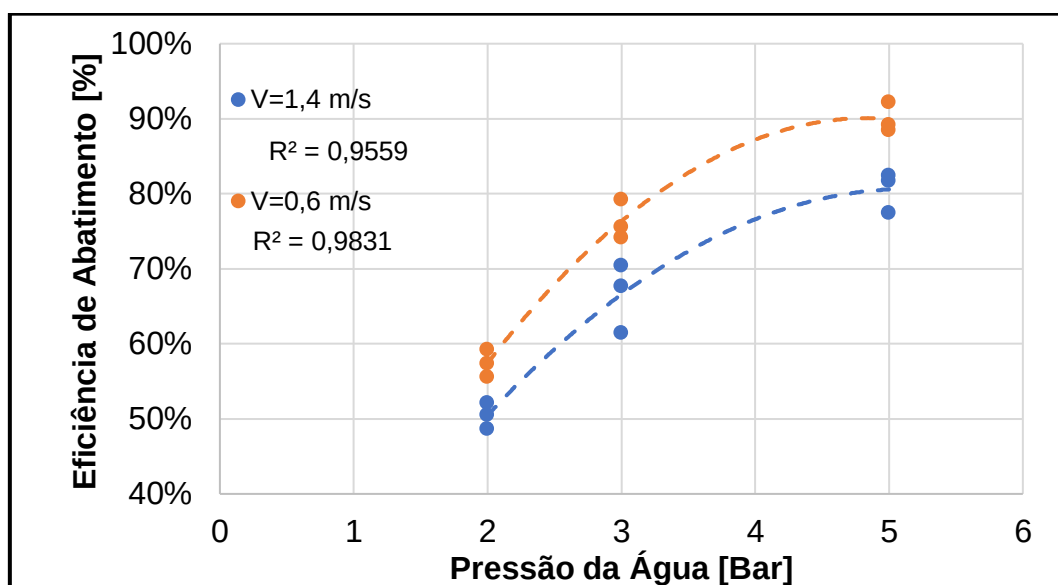


Figura 6.5. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone névoa em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida.

A figura 6.6 mostra o gráfico da eficiência de abatimento de partículas de pellet feed com a pressão da água para o bico atomizador, considerando duas velocidades diferentes do fluxo de ar: 1,4 m/s e 0,6 m/s. Para a velocidade de 1,4 m/s a eficiência de abatimento aumenta à medida que a pressão da água nos bicos aumenta, alcançando um máximo de cerca de 96% a 5 bar de pressão de água. Já para a velocidade de 0,6 m/s: a eficiência de abatimento também cresce com o aumento da pressão da água, alcançando valores ligeiramente superiores à condição de 1,4 m/s, especialmente em pressões mais altas (acima de 4 bar).

Os coeficientes de determinação (R^2) indicam que os ajustes polinomiais são adequados para ambos os conjuntos de dados ($R^2 > 0,91$), sugerindo um

bom nível de confiança nas tendências observadas. O bico "Cone Atomizado" se destaca pela mais alta eficiência de abatimento entre os bicos testados, alcançando até 96% a 5 bar de pressão de água e 3,0 bar de pressão de ar atomizador para partículas com velocidade de 0,6 m/s.

O gráfico demonstra que a eficiência de abatimento de partículas pelo bico atomizador é influenciada pela pressão da água e pela velocidade do ar. Pressões mais altas resultam em maior eficiência, independentemente da velocidade do ar. No entanto, velocidades de ar mais baixas favorecem a eficiência, particularmente em pressões menores. O ajuste polinomial apresenta boa concordância com os dados experimentais, com R^2 superiores a 0,88 em ambas as condições. Esses resultados são úteis para otimizar o uso de bicos atomizadores em sistemas de controle de poeira, considerando diferentes condições operacionais.

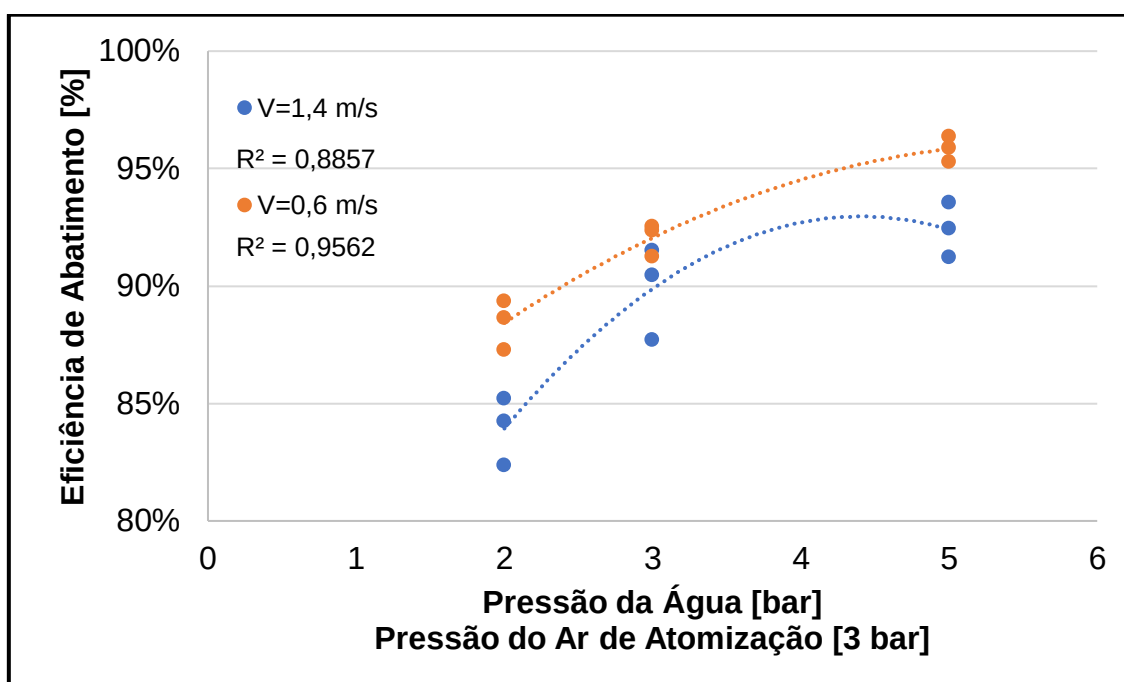


Figura 6.6. Análise comparativa da eficiência de abatimento do bico atomizado em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida e com pressão de ar atomizado constante.

A figura 6.7 mostra o gráfico que compara os melhores desempenhos de cinco tipos de bicos na eficiência de abatimento de poeira 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%.

Este resumo destaca a superioridade dos bicos Atomizado e Névoa para o controle de poeira, especialmente em condições de menor velocidade de transporte.

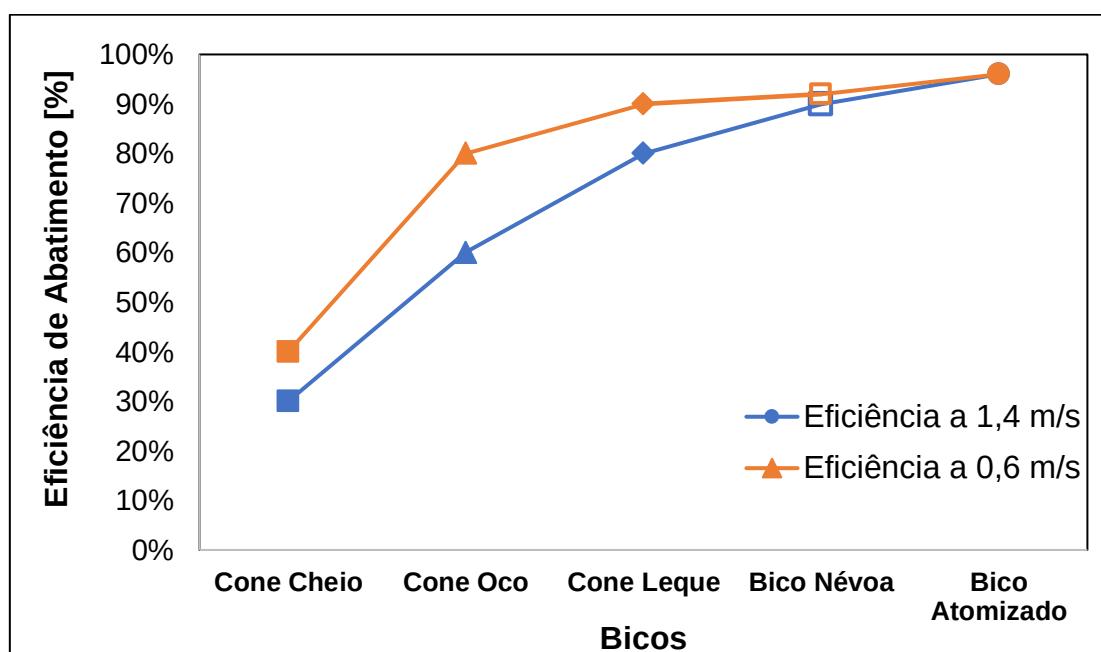


Figura 6.7. Análise comparativa da eficiência do melhor desempenho de cada bico em cada uma das velocidades de emissão para o pellet feed.

6.2 Emissão de Sínter Feed

O gráfico apresentado na figura 6.8 analisa a eficiência de abatimento de partículas no bico tipo Cone Cheio para o Sínter Feed, variando a pressão da água (em bar) e considerando as duas velocidades de transporte de poeira. A eficiência de abatimento aumenta com o incremento da pressão da água,

atingindo valores máximos próximos de 35% para ambas as velocidades. Em velocidades mais baixas (0,6 m/s), a eficiência é ligeiramente superior em comparação com 1,4 m/s, especialmente em pressões intermediárias (3 a 4 bar). A diferença entre as eficiências para as duas velocidades se torna menos significativa em pressões mais altas (5 bar), indicando que o aumento da pressão diminui o impacto da velocidade do transporte de poeira.

Os ajustes polinomiais com coeficientes de determinação (R^2) de 0,929 para 1,4 m/s e 0,9523 para 0,6 m/s, reforçam a confiabilidade dos modelos. O bico apresenta eficiência moderada para o Sínter Feed, com desempenho máximo de 35% em ambas as velocidades. Velocidades mais baixas favorecem a captura de partículas, o que sugere que a eficiência pode ser otimizada ajustando a pressão da água, principalmente em sistemas com velocidades de transporte mais reduzidas.

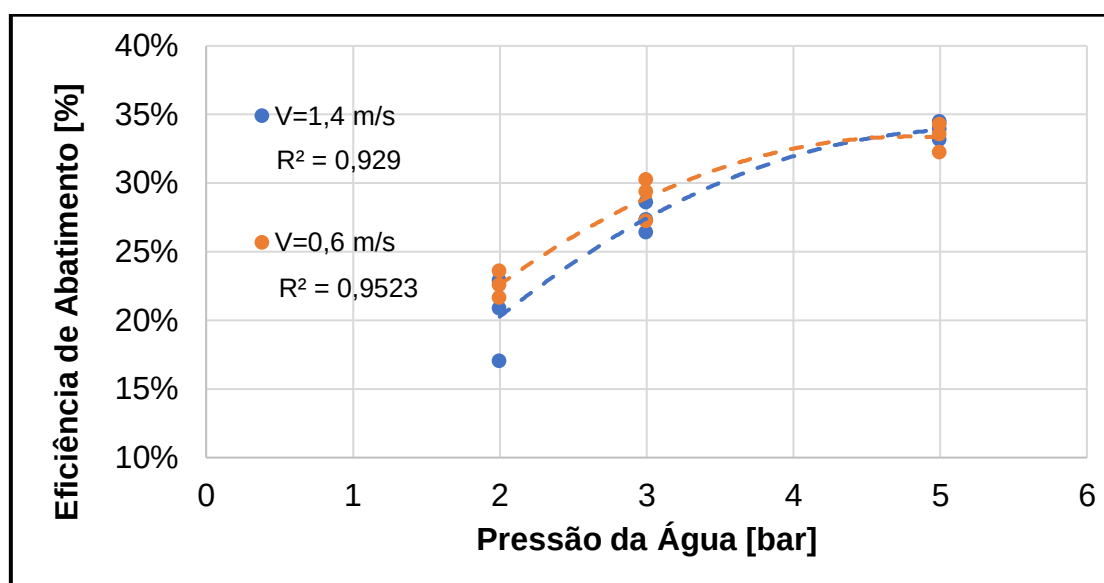


Figura 6.8. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone cheio em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida no manuseio do sínter feed.

O gráfico mostrado na figura 6.9 analisa a eficiência de abatimento de partículas no bico Cone Oco para o Sínter Feed, considerando a variação da pressão de água das duas velocidades de transporte. Nota-se que a eficiência de abatimento aumenta inicialmente com o aumento da pressão, atingindo um pico ao redor de 3 a 4 bar, antes de declinar em pressões mais altas (5 bar). Essa tendência sugere que há uma pressão ótima de operação onde a atomização da água é mais eficiente para captura de partículas.

A velocidade de 0,6 m/s apresenta melhor eficiência de abatimento em todas as pressões, atingindo um pico próximo a 58% (pressão de 3-4 bar). A velocidade de 1,4 m/s tem eficiência menor, com um pico em torno de 50%, indicando que velocidades mais altas dificultam a captura de partículas pelas gotas de água. Após o pico, a eficiência diminui em ambas as velocidades, possivelmente devido à formação de gotas menores ou à dispersão ineficaz das partículas em pressões mais altas.

Os ajustes polinomiais apresentam boa correlação com os dados, com R^2 de 0,9013 para 1,4 m/s e R^2 de 0,956 para 0,6 m/s. Isso reforça a confiabilidade do modelo para descrever o comportamento observado.

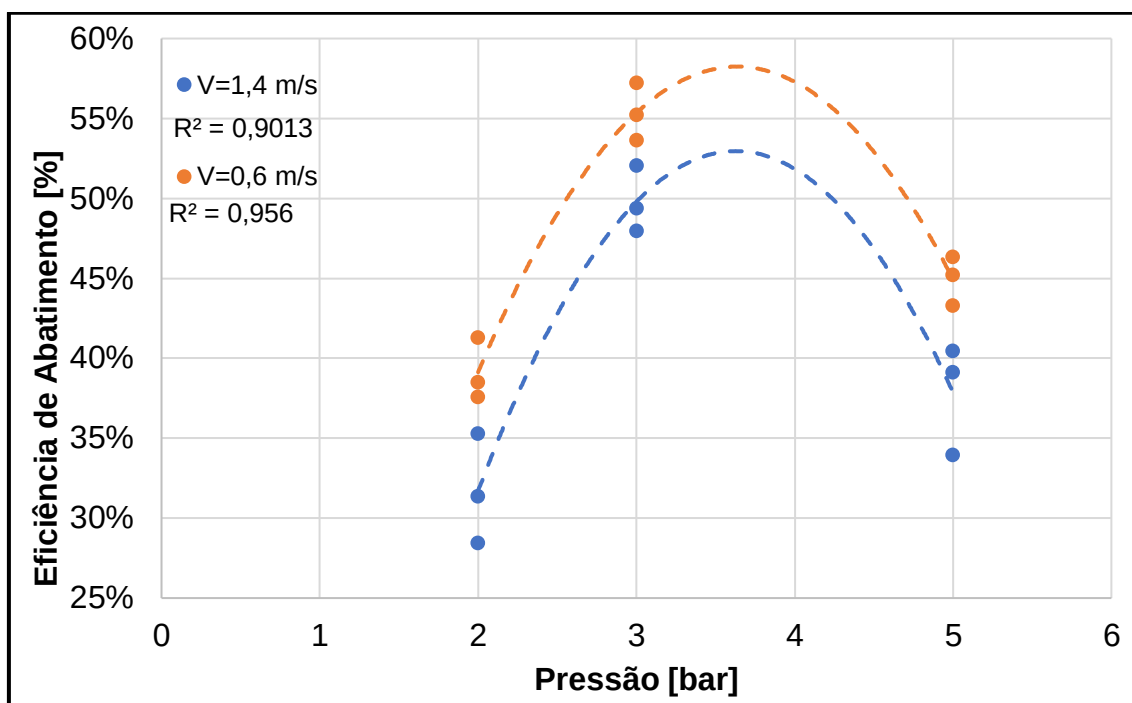


Figura 6.9. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone oco em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida no manuseio de sinter feed.

O gráfico mostrado na figura 6.10 mostra a eficiência de abatimento de partículas no bico Cone Leque para o Sinter Feed (PM10), avaliando diferentes pressões de água nas velocidades. A eficiência de abatimento aumenta com o aumento da pressão da água, alcançando um pico em torno de 3-4 bar. Em pressões mais altas (5 bar), a eficiência tende a diminuir ligeiramente, indicando que existe uma faixa de pressão ideal para o funcionamento do bico. A velocidade de 0,6 m/s apresenta maior eficiência em todas as pressões, atingindo um pico próximo a 90% em pressões intermediárias. A velocidade de

1,4 m/s tem uma eficiência máxima um pouco menor, em torno de 85%, e apresenta uma leve queda em pressões mais altas. A diminuição da eficiência após o pico pode estar associada a fenômenos como a perda de uniformidade na atomização.

Os ajustes polinomiais descrevem bem o comportamento observado, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,9486 para 1,4 m/s e 0,9178 para 0,6 m/s. Pode-se dizer que o bico cone leque apresenta excelente eficiência de abatimento de partículas PM10, especialmente em velocidades mais baixas (0,6 m/s) e pressões intermediárias (3-4 bar

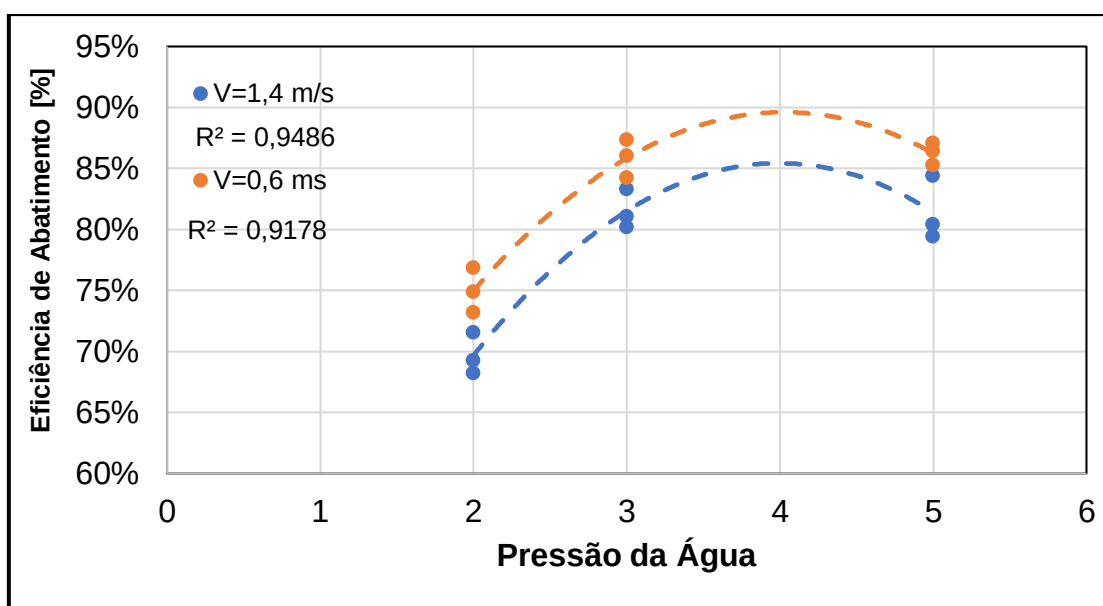


Figura 6.10. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone leque em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida.

A figura 6.11 mostra o gráfico que avalia a eficiência de abatimento de partículas no bico cone névoa para o sínter feed (PM10), considerando a variação da pressão da água nas duas velocidades de transporte de partículas. A eficiência de abatimento aumenta de forma consistente com o aumento da pressão da água com a maior eficiência é atingida em torno de 5 bar, com valores próximos a 90% para 0,6 m/s e 75% para 1,4 m/s.

A velocidade de 0,6 m/s apresenta eficiência significativamente superior em todas as pressões, alcançando valores de até 90% em pressões mais altas. A velocidade de 1,4 m/s é menos eficiente, com a eficiência máxima próxima de 75%, mostrando que velocidades mais altas dificultam o abatimento de

partículas. Ao contrário de outros bicos, o Cone Névoa não apresenta queda na eficiência em pressões altas (5 bar), sugerindo que ele mantém boa atomização e dispersão das partículas mesmo em condições de maior pressão.

Os ajustes polinomiais descrevem bem o comportamento observado, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,9245 para 1,4 m/s e 0,9379 para 0,6 m/s, indicando boa adequação dos modelos.

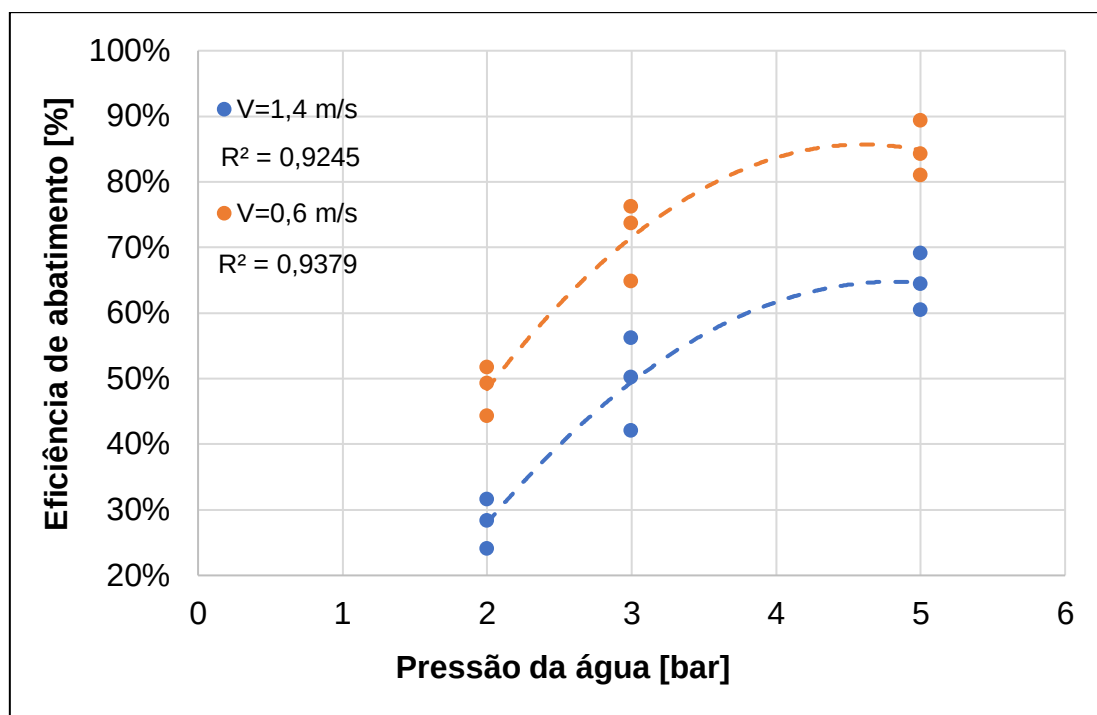


Figura 6.10. Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone névoa em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida.

O gráfico da figura 6.11 analisa a eficiência de abatimento de partículas no bico atomizado para o Sínter Feed (PM10), avaliando o impacto da pressão da água e duas velocidades de transporte de partículas a uma pressão fixa de ar de atomização de 3 bar. Nota-se que a eficiência de abatimento aumenta com o aumento da pressão da água, atingindo valores máximos em torno de 95-96%. Este comportamento mostra que o bico atomizado se beneficia do incremento na pressão da água, especialmente em pressões superiores a 3 bar.

A velocidade de 0,6 m/s apresenta maior eficiência em todas as condições, com eficiência próxima de 96% em pressões mais altas. A velocidade de 1,4 m/s é menos eficiente, com o valor máximo em torno de 93%, evidenciando o impacto adverso de velocidades mais altas no transporte de partículas. Em ambas as velocidades, a eficiência se estabiliza em pressões

mais altas (5 bar), indicando que o bico atinge um limite máximo de desempenho devido a uma atomização otimizada. Este bico mantém alta eficiência mesmo em condições adversas, sendo adequado para aplicações que exigem alta performance no controle de poeira.

Os ajustes polinomiais apresentam boa adequação aos dados, com coeficientes de determinação (R^2) de 0,895 para 1,4 m/s e 0,8656 para 0,6 m/s, demonstrando que o modelo descreve bem a tendência.

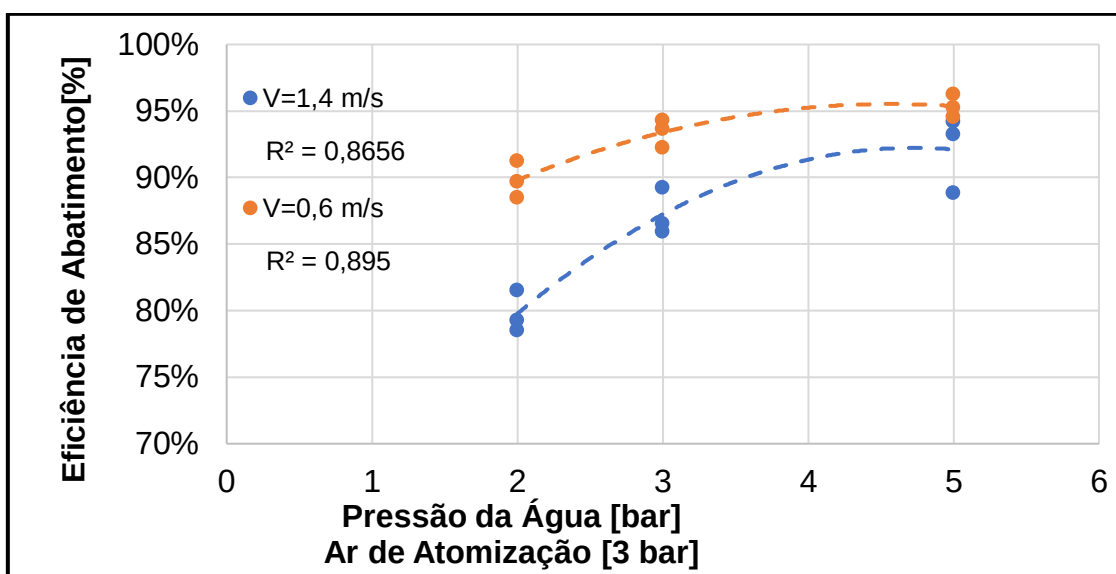


Figura 6.12. Análise comparativa da eficiência de abatimento do bico atomizado em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida com pressão de ar de atomização constante.

O gráfico da figura 6.13 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. 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. A diferença de desempenho entre as velocidades é mais evidente em bicos menos eficientes, como o cone cheio.

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.

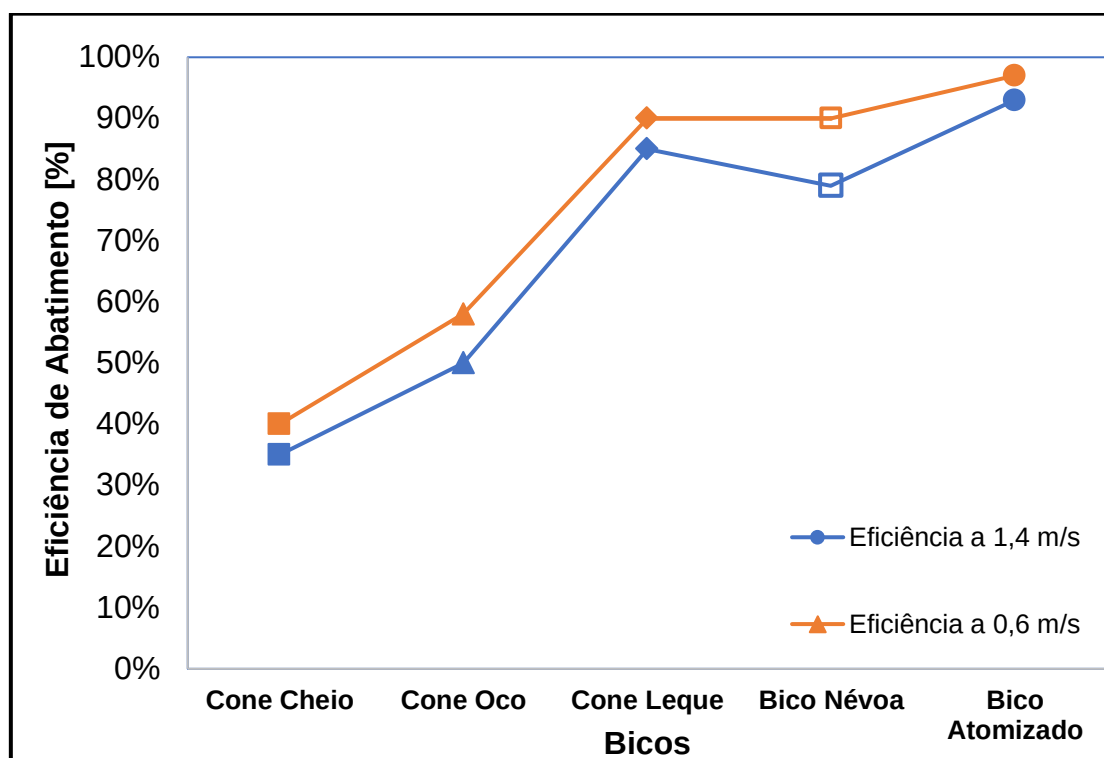


Figura 6.13. Análise comparativa da eficiência do melhor desempenho de cada bico em cada uma das velocidades de emissão para o sínter feed.

7 CONCLUSÃO

Construiu-se um túnel experimental, considerando os requisitos técnicos necessários para simular as condições de manuseio do minério em diferentes condições de velocidade e capaz de avaliar diferentes bicos em condições operacionais diferenciadas e 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 consolidada de entendimento no laboratório de fluidodinâmica e particulados.

Desenvolveu-se uma metodologia para medição da eficiência de bicos de pulverização, incluindo a taxa de supressão de poeira com base nas condições operacionais do túnel incluindo seus limites operacionais e as características inerentes ao minério de ferro e aos bicos testados nesta metodologia. 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 dados comparativos já são um dado de entrada para as condições futuras. Os testes também revelaram necessidades comparativas extras como, o consumo energético, hídrico e análise comparativa de custo.

Analisou-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. Constitui-se dessa forma como 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.

7.1 Sugestões para trabalhos futuros

Este estudo analisou o desempenho de cinco diferentes bicos operando em três regimes de pressão e atuando em duas velocidades diferentes de poeira de minério de ferro. Dadas as condições do ensaio e os resultados gerados se sugere para futuras complementações deste trabalho:

- Aumentar o tempo de contagem de partículas com uma vazão de material constante que permita de uma avaliação de mais tempo de ensaio. Sugere-se acima de 3 minutos para consolidação do perfil de emissão e evitar uma possível perda dos picos de emissão no manuseio.

- Aumentar o *range* das velocidades de testes para encorpar os resultados com outras situações que envolvem transporte, queda de material e cargas de

vento. Para isso é importante trocar o ventilador por um que possua uma vazão mais adequada a estas velocidades de interesse.

- Comparar testes estáticos, como influência da diminuição da tensão superficial, neutralização do PH (potencial zeta) e avaliação do ângulo de contato comparando com os resultados dos testes dinâmicos

- Realizar ensaios com a câmera ultrarrápida para avaliação das nuances diferenciais entre os bicos na forma como o spray se consolida variando pressão e verificando o efeito das correntes de ventos transversais e do uso de aditivos potencializadores do efeito de supressão. Pode-se também realizar estes ensaios na caixa de poeira para efeito da geração da nuvem de poeira e visualização cuidadosa da qualidade da sua transposição para a seção de abatimento.

- Avaliar resultado de supressão das outras faixas de tamanho de partículas respiráveis e verificar possível replicação dos resultados para o PM10.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aboelezz, A., Beltran, M., Hargather, M. J., Hassanalian, M., & Roghanchi, P. (2024). **Comprehensive design and performance validation of a wind tunnel for advanced respirable dust deposition investigations.** *Journal of Hazardous Materials*, 478, 135516.

ABUBAKER, Harish et al. **Optimization of design parameters of CIP spray cleaning nozzle using genetic algorithm.** In: *Recent Advances in Computational Engineering: Proceedings of the 4th International Conference on Computational Engineering (ICCE 2017)* in Darmstadt 4th. Springer International Publishing, 2018. p. 1-14.

BANERJEE, Kishore Kumar; WANG, He; PISANIELLO, Dino. **Iron-ore dust and its health impacts.** *Environmental Health*, v. 6, n. 1, p. 11-16, 2006. ISSN (print):1444-5212 | ISSN:1832-3367.

Beck, T. W., Seaman, C. E., Shahan, M. R., & Mischler, S. E. (2018). **Open-air sprays for capturing and controlling airborne float coal dust on longwall faces.** *Mining engineering*, 70(1), 42.

Castro, Maycon Magalhães 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.

CEJPEK, Bc Ondřej; JEDELSKÝ, Jan. **Design and realization of an aerodynamic tunnel for spraying nozzles.** Diploma thesis, 2020.

CHANG, Keh-Chin; KUO, Jia-Wen; CHUNG, Yi-Da. **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.

Chaves, L. F. R. **Sensitivity analysis and uncertainty propagation in droplet evaporation.** 2021. 103 f. Master Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia.

Colinet, J., Halldin, C. N., & Schall, J. (2021). **Best practices for dust control in coal mining.**

Cremasco, marco a. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos.** 2. Ed. São paulo: blucher, 2014.

IBRAHIMPOUR, Shahab et al. **Dust-related impacts of mining operations on rangeland vegetation and soil: a case study in Yazd province, Iran.** Environmental earth sciences, v. 80, n. 14, p. 467, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-245412/v1>

Han, H., Wang, H., Zhang, Q., Yang, T., Li, X., Zhang, C., & Terbish, N. (2024). **Experimental study on the charge characteristics and dust reduction performance of inductive electrostatic dual-fluid nozzle for dust pollution control.** Powder Technology, 434, 119343.

Fang Chen, S. Zhang, W. Ma, J. Mo. (2019). **Research and application of dust control technology based on long pressure and short pumping system in mechanized tunneling face of coal roadway.** doi:10.1088/1742-6596/1300/1/012058

Fontana, A. D. R. L., da Silva, A. J. C., Pontes, L. S., Mesquita, A. L. A., Martins, M. F., & dos Santos Junior, R. M. (2024). **Wind tunnel study of iron ore dust emissions from stockpile and train wagons.**

Furtado, M. D. C., Silva, A. J. C. D., Fontana, A. D. R. L., Mesquita, A. L. A., & Junior, R. M. D. S. (2023). **Numerical and experimental study on the drying process of iron ore in wagons.** Drying Technology, 41(11), 1783-1802.

Fritz, B. K., Hoffmann, W. C., Birchfield, N. B., Ellenberger, J., Khan, F., Bagley, W. E., ... & Hewitt, A. (2010). **Evaluation of spray drift using low-speed wind tunnel measurements and dispersion modeling.**

Gholami A, Tajik R, Atif K, Zarei AA, Abbaspour S, Teimori-Boghsani G, Attar M. **Respiratory Symptoms and Diminished Lung Functions Associated with Occupational Dust Exposure Among Iron Ore Mine Workers in Iran.** Open Respir Med J. 2020 Jan 23;14:1-7. doi: 10.2174/1874306402014010001.

GLEEKIA, A. M. G. D.; PRADHAN, D. S.; SAHU, H. B. **Impacts of Iron Ore Mining on Water Quality and the Environment in Liberia.** In: 6th Asian Mining Congress. 2016. p. 371-380.

Guo, C., Nie, W., Xu, C., Peng, H., Zhang, C., Li, S., ... & Li, M. (2020). **A study of the spray atomization and suppression of tunnel dust pollution based on a CFD-based simulation.** Journal of Cleaner Production, 276, 123632.

Halt, J. A., Nitz, M. C., Kawatra, S. K., & Dubé, M. (2015). **Iron Ore Pellet Dustiness Part I: Factors Affecting** Dust Generation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(4), 258–266. <https://doi.org/10.1080/08827508.2014.928876>

Huang, Z.-a., Zhao, W., Yang, Z., Zhang, J., Gao, Y., Shao, Z., Zhang, Y., Zhang, L., & Wen, S. (2020). **Preparation and characterization of an environmentally friendly compound chemical agent for road dust suppression in a copper mine.** <https://doi.org/10.1002/ep.13532>

Hussein, S. (2022). **Dust Cruster Application at Vale Oman** Stockyard Area. doi:10.1088/1755-1315/1055/1/012008

Klenk, U., Parey, M., & Schmidt, E. (2012). **Use of water droplets and additives for dust control.** Bergische Universität Wuppertal.

Li, Tianxin et al. **Mining of the association rules between industrialization level and air quality to inform high-quality development in China.** *Journal of environmental management*, v. 246, p. 564-574, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.022>

Liao, R. et al. (2020). **‘Computational prediction of Dust suppression efficiency os spray system – A review.** *The international conference on powder, granule and bulk solids: innovations and applications.* Thapar Institute pf Engineering & Technology, Patiala, India, p.8.

Liao, R., Wypych, P. W., Pan, R., Hastie, D. B., & Roberts, J. M. (2019, January). **Dust suppression efficiency of spraying systems-a review.** In 13th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation (ICBMH 2019).

Liu, N., Chen, K., Deng, E., Yang, W., & Wang, Y. (2023). **Study on dust suppression performance of a new spray device during drilling and blasting construction in the metro tunnel.** *Tunnelling and Underground Space Technology*, 133, 104975.

Massarani, g. **Fluidodinâmica em sistemas particulados.** Editora UFRJ, rio de janeiro, 1997

MME (Ministério de minas e energia) 2023. **A EXTENSÃO DA CADEIA PRODUTIVA DA ECONOMIA MINERAL NO PIB BRASILEIRO**. Repositório do conhecimento Ipea.

Mo, J. (2024). **A Numerical Study on Dust Control: Evaluating the Impact of Spray Angle and Airflow Speed in the Coalescence of Droplets and Dust**. Processes, 12(5), 937.

Nabeel, M., Karasev, A., & Jönsson, P. (2017). **Friction Forces and Mechanical Dust Generation in an Iron Ore Pellet Bed Subjected to Varied Applied Loads**. https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/57/4/57_ISIJINT-2016-514/_article

Nie, W., Liu, Y., Wang, H., Wei, W., Peng, H., Cai, P., ... & Jin, H. (2017). **The development and testing of a novel external-spraying injection dedusting device for the heading machine in a fully-mechanized excavation face**. Process Safety and Environmental Protection, 109, 716-731.

Okawa, H., Nishi, K., Kawamura, Y., Kato, T., & Sugawara, K. (2017). **Utilization of ultrasonic atomization for dust control in underground mining**. Japanese Journal of Applied Physics, 56(7S1), 07JE10.

Parvej, S., Naik, D. L., Sajid, H. U., Kiran, R., Huang, Y., & Thanki, N. (2021). **Fugitive Dust Suppression in Unpaved Roads: State of the Art Research Review**. <https://doi.org/10.3390/su13042399>

PINHEIRO, A. P. et al. **Lagrangian modeling of droplet evaporation**. Universidade Federal de Uberlândia, 2018. 12, 22, 47, 70, 88, 102, 103

Pollock D, Organiscak J [2007]. **Airborne dust capture and induced airflow of various spray nozzle designs**. Aer Sci Tech 41(7):711–720.

McCoy, J. F., Schroeder, W. E., Rajan, S. R., Ruggieri, S. K., & Kissell, F. N. (1985). **New laboratory measurement method for water spray dust control effectiveness**. American Industrial Hygiene Association Journal, 46(12), 735-740.

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). (2011). **[Occupational Recommendation Criteria for Iron Ore Dust]**. <https://www.cdc.gov/niosh/regulations.html>

Ramos, S.J., Gastauer, M., Martins, G.C. et al. **Changes in soil properties during iron mining and in rehabilitating minelands in the Eastern Amazon.** Environ Monit Assess 194, 256 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09892-y>

Sijs, R., Kooij, S., & Bonn, D. (2021). **How surfactants influence the drop size in sprays from flat fan and hollow cone nozzles.** Physics of Fluids, 33(11).

Silva, Eduardo r. **Análise experimental e numérica do sistema de separação via elutriação de sedimento de drenagem.** P. 88, dissertação (mestrado) - programa de pós-graduação em engenharia química, universidade federal do rio grande, rio grande, 2016.

Song, B., Dong, C., Wang, X., & Guo, C. (2020). **Atomization performance of Tiantaishan tunnel spray dust reduction.** <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/741/1/012034>

Swanson, J.G.; Langefeld, O. **Fundamental research in water spray systems for dust control.** Mining Technology, v. 124, n. 2, p. 78-82, 2015.

Ren, S., Jing, D., Ge, S., Chen, Y., Meng, X., & Chang, P. (2024). **Experimental and numerical evaluation of the dust suppression efficiency of an innovative vortex pneumatic fog screen dust control device.** Scientific Reports, 14(1), 13423.

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.

THEJAS, H. K.; HOSSINEY, Nabil. **A short review on environmental impacts and application of iron ore tailings in development of sustainable eco-friendly bricks.** Materials Today: Proceedings, v. 61, p. 327-331, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.09.522>

World Health Organization (WHO)). (2018). **Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide.** https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69477/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Roberts, J. M., Liao, R., Wypych, P. W., Qiao, M., & Hastie, D. B. (2023, January). **Recommendations for the design of effective water spraying airborne dust**

suppression systems. In ICBMH2023: 14th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation: 14th International Conference on Bulk Materials Storage, Handling and Transportation (pp. 92-100). Wollongong, NSW: The Institution of Engineers, Australia.

Wang, Y., Jiang, Z., Zhang, F., Lu, Y., & Bao, Y. (2022). **Study on dust diffusion characteristics of continuous dust sources and spray dust control technology in fully mechanized working face.** Powder Technology, 396, 718-730.

Wang et al., 2019i, P. Wang, Y. Shi, L. Zhang, Y. Li. **Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air assisted atomizer nozzle.** Process Saf. Environ., 128 (2019), pp. 316-328, 10.1016/j.psep.2019.06.014

Yang, S., Nie, W., Lv, S., Liu, Z., Peng, H., Ma, X., ... & Xu, C. (2019). **Effects of spraying pressure and installation angle of nozzles on atomization characteristics of external spraying system at a fully-mechanized mining face.** Powder Technology, 343, 754-764.

Xie, Z., Huang, C., Zhao, Z., Xiao, Y., Zhao, Q., & Lin, J. (2022). Review and prospect the development of dust suppression technology and influencing factors for blasting construction. Tunnelling and Underground Space Technology, 125, 104532.

Xu, G., Chen, Y., Eksteen, J., & Xu, J. (2018). **Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors.** Science of the Total Environment, 639, 1060-1076.

Xu, C., Nie, W., Liu, Z., Peng, H., Yang, S., & Liu, Q. (2019). **Multi-factor numerical simulation study on spray dust suppression device in coal mining process.** Energy, 182, 544-558.

Zhang, Q., Fan, L., Wang, H., Han, H., Zhu, Z., Zhao, X., & Wang, Y. (2022). **A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction.** Process Safety and Environmental Protection, 166, 86-98.

Zhang, Y. (2014). **Application of Dry Fog Dust Suppression Technology in the Coal Conveyer Belt System of Thermal Power Plants.** <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076.733>

Zhao, Z., Chang, P., Xu, G., Ghosh, A., Li, D., & Huang, J. (2021). **Comparison of the coal dust suppression performance of surfactants using static test and dynamic test.** *Journal of Cleaner Production*, 328, 129633.

Zhou, Q., Qin, B., Ma, D., & Jiang, N. (2017). **Novel technology for synergetic dust suppression using surfactant-magnetized water in underground coal mines.** *Process Safety and Environmental Protection*, 109, 631-638.

Zhou, Q., Qin, B., Wang, F., & Wang, H. (2019). **Experimental investigation on the performance of a novel magnetized apparatus used to improve the dust suppression ability of surfactant-magnetized water.** *Powder Technology*, 354, 149-157.