



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

DANIELLE VITORIA BAIA RODRIGUES
JHULLYE MARESSA TRINDADE GONÇALVES

**ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE
BICOS DE SPRAY NO ABATIMENTO DE POEIRA DE MINÉRIO**

TUCURUÍ- PA

2025

DANIELLE VITORIA BAIA RODRIGUES
JHULLYE MARESSA TRINDADE GONÇALVES

**ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE
BICOS DE SPRAY NO ABATIMENTO DE POEIRA DE MINÉRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia Civil, pela
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Me. Danilo Silva Santos
Coorientadora: Prof. Me. Grazielle Tigre de Souza

TUCURUÍ - PA

2025

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

- B152e Baia Rodrigues, Danielle Vitória.
Elaboração de uma metodologia para a análise da eficiência de
bicos de spray no abatimento de poeira de minério / Danielle
Vitória Baia Rodrigues, Jhullye Maressa Trindade Gonçalves. —
2025.
58 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Me. Danilo Silva Santos
Coorientador(a): Prof^a. MSc. Grazielle Tigre de Souza
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do
Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia
Civil, Tucuruí, 2025.

1. Supressão. 2. Particulados. 3. Pellet feed. I. Título.

CDD 622

DANIELLE VITÓRIA BAIA RODRIGUES
JHULLYE MARESSA TRINDADE GONÇALVES

**ELABORAÇÃO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE
BICOS DE SPRAY NO ABATIMENTO DE POEIRA DE MINÉRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito parcial para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Civil, na Faculdade de Engenharia Civil, pela
Universidade Federal do Pará.

Orientador: Prof. Me. Danilo Silva Santos
Coorientadora: Prof. Me. Grazielle Tigre de Souza

Data da aprovação: 24/02/2025

Conceito: Excelente

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



DANILO SILVA SANTOS

Data: 13/03/2025 11:39:46-0300

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

Orientador: Prof. Me. Danilo Silva Santos

FEM/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente



GRAZIELLE TIGRE DE SOUZA

Data: 16/03/2025 15:45:46-0300

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

Coorientadora: Prof. Me. Grazielle Tigre de Souza

FEC/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente



DEBORA DIAS COSTA MOREIRA

Data: 20/03/2025 13:58:24-0300

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

Examinadora Interna: Prof. Dr. Débora Dias Costa Moreira

FEC/CAMTUC/UFPA

Documento assinado digitalmente



ARTHUR DOS REIS LEMOS FONTANA

Data: 14/03/2025 12:10:41-0300

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

Examinador Externo: Prof. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana

Fluidpar/TECNOLAGO/UFPA

Dedicamos este trabalho às nossas famílias, cujo apoio e incentivo foram fundamentais ao longo deste desafio. Aos amigos, que trouxeram alegria nos momentos mais difíceis. E, acima de tudo, a Deus, por nos permitir alcançar esta conquista.

AGRADECIMENTOS – Danielle Rodrigues

Agradeço à Deus, em primeiro lugar por essa vitória tão importante na minha vida.

À minha família, que foi minha maior motivação todos esses anos. À minha amada mãe, Francinete que sempre orou por mim, me incentivou e me deu muito amor. À minha amada irmã, Fernanda, que me incentivou e me ajudou nessa jornada. À minha avó/mãe querida, que também foi uma das incentivadoras nessa caminhada. Ao meu avô/pai, Raimundo, que não está mais conosco, mas é por mim sempre lembrado, por seu amor e carinho. Ao meu pai, Manoel, pelo apoio e amor.

À minha amiga, colega de quarto e parceira de trabalho Jhullye Maressa. Obrigada pela compreensão, por toda a dedicação empenhada e por todo companheirismo durante esses anos de graduação. À minha amiga e colega de quarto, Natali Pinheiro, pelo companheirismo e amizade durante esses anos. Vocês foram essenciais para o meu conforto e alegria nessa cidade.

Aos meus queridos amigos, Daniela Baena, Madalena Silva, Thayson Assunção, Ryts Diemes e Carla Nonato. Muito obrigada por me acolherem, os fardos dessa caminhada se tornaram leves com vocês. Aos meus queridos amigos, Marcos, Welberth e Luan pelos bons momentos vividos pelos Chiquititas. Aos meus queridos amigos Matheus, Victória, Alan, Viliê e Dimilson, que me incentivaram e mantiveram sua amizade desde o ensino médio.

Ao meu amado namorado, Hermeson Wanzeler, pelo companheirismo, amizade e amor e pela felicidade que você tem me proporcionado nessa cidade.

Ao Laboratório Fluidpar e a sua equipe Prof. André Mesquita, Prof. Arthur Fontana, Prof. Luiz e Prof. Danilo, que me proporcionaram grandes experiências e a realização desta pesquisa.

Aos meus queridos professores Grazielle Tigre, Carol Coelho, Davi Barbosa, Manoel Mangabeira, Shara Portilho e Fernanda Gouveia, pelos seus ensinamentos, paciência e compreensão ao longo do curso.

A todos, os meus sinceros votos de agradecimento.

AGRADECIMENTOS – Jhullye Maressa Gonçalves

Agradeço à Deus, em primeiro lugar por essa vitória tão importante na minha vida.

Agradeço a minha família, que foi minha maior motivação todos esses anos, à minha amada mãe Marília Trindade, que sempre orou por mim e sonhou comigo por esse momento, é a pessoa que mais acredita em mim nesse mundo, ao meu irmão Gustavo Trindade, por ser um grande incentivador e ao meu pai Marivaldo Gonçalves por ser o provedor dos meios que me ajudaram a concluir essa jornada, sem vocês, nada disso seria possível – ou sequer faria sentido. Aos meus familiares que sempre me apoiaram e acreditaram no meu potencial: meu tio Sebastião, minha tia Simone e minha prima Bruna, muito obrigado por fazerem parte dessa conquista.

Às luzes da minha vida, Maria Alice e Lis Helena, que, em um momento difícil, trouxeram, esperança e motivação para continuar, vocês são a razão de muitos dos meus sorrisos.

Em especial, gostaria de expressar a minha gratidão infinita, pela amizade e parceria da minha colega de quarto, que não só dividiu a casa comigo, mas as adversidades, as alegrias, o pão e até mesmo o colchonete, e que nesta ocasião escolheu dividir esse grande momento de sua vida comigo, por você tenho uma eterna admiração e gratidão. À minha amiga e colega de quarto, Natali Pinheiro, pelo companheirismo e irmandade durante todos esses anos. À minha amiga de infância Keiliane Góes, que mesmo distante consegue se fazer presente em minhas conquistas.

Aos meus queridos amigos, Daniela Baena, Madalena Silva, Thayson Assunção, Ryts Diemes, Carla Nonato e Hermerson Wanzeler, muito obrigada por me acolherem e dividirem o fardo dessa caminhada, só foi possível e leve por ter vocês. Aos meus queridos amigos, Marcos, Welberth e Luan pelos bons momentos vividos pelo grupo carinhosamente nomeado por “Chiquititas”.

Ao Laboratório Fluidpar e a sua equipe Prof. André Mesquita, Prof. Arthur Fontana, Prof. Luiz e Prof. Danilo, que me proporcionaram grandes experiências e a realização desta pesquisa.

Aos meus queridos professores Grazielle Tigre, Carol Coelho, Davi Barbosa, Manoel Mangabeira, Shara Portilho e Fernanda Gouveia, pelos seus ensinamentos, paciência e compreensão ao longo do curso.

A todos, os meus sinceros votos de agradecimento.

“O Senhor, pois, é aquele que vai adiante de ti; ele será contigo, não te deixará, nem te desampará; não temas, nem te espantes.”
(Deuteronômio 31:8)

RESUMO

A dispersão de poeira durante o manuseio de minérios é um problema crítico na indústria mineral, pois compromete a qualidade do ar, impacta o meio ambiente e pode causar danos à saúde ocupacional. Métodos de supressão, como a pulverização com bicos de spray, são amplamente utilizados, mas a eficiência desses dispositivos pode variar conforme as condições operacionais. No entanto, a falta de uma metodologia padronizada para avaliar seu desempenho dificulta a escolha do sistema mais adequado, tornando necessário um estudo detalhado sobre sua eficácia. Este trabalho realizou ensaios experimentais em um túnel de vento para analisar a eficiência de diferentes bicos de pulverização no abatimento de poeira gerada pelo manuseio de pellet feed. Foram avaliados parâmetros como tipo de bico, pressão de pulverização e velocidade do fluxo de ar. Os resultados indicaram que bicos atomizadores apresentaram maior eficiência na captura de partículas em suspensão, especialmente sob pressões moderadas. Já os bicos convencionais, como os de cone cheio e cone oco, tiveram sua eficiência reduzida em condições de alta velocidade do ar. Além disso, verificou-se que pressões elevadas melhoram a atomização e a captura de partículas finas nos bicos atomizadores, enquanto bicos convencionais sofrem perda de eficiência acima de 3 bar devido à dispersão das gotas. A metodologia desenvolvida permitiu a comparação objetiva entre diferentes tecnologias de supressão de poeira, auxiliando na escolha de soluções mais eficazes para aplicações industriais. Dessa forma, este estudo contribui para o aprimoramento das estratégias de controle de poeira na mineração, oferecendo uma abordagem padronizada para a avaliação da eficiência de bicos de spray e subsidiando a implementação de medidas mais eficientes e sustentáveis.

Palavras-chave: supressão; particulados; pellet feed.

ABSTRACT

The dispersion of dust during ore handling is a critical issue in the mining industry, as it affects air quality, impacts the environment, and poses occupational health risks. Dust suppression methods, such as spray nozzles, are widely used, but their efficiency varies depending on operational conditions. However, the lack of a standardized methodology for evaluating their performance makes it difficult to select the most suitable system, highlighting the need for a detailed study on their effectiveness. This study conducted experimental tests in a wind tunnel to assess the efficiency of different spray nozzles in controlling dust generated by pellet feed handling. Parameters such as nozzle type, spray pressure, and airflow velocity were evaluated. The results indicated that atomizing nozzles achieved higher efficiency in capturing airborne particles, especially under moderate pressure conditions. In contrast, conventional nozzles, such as full-cone and hollow-cone types, exhibited reduced efficiency under high airflow velocities. Additionally, it was found that higher pressures improved atomization and fine particle capture in atomizing nozzles, while conventional nozzles showed a drop in efficiency above 3 bar due to concentrated droplet dispersion. The developed methodology enabled an objective comparison between different dust suppression technologies, aiding in the selection of more effective solutions for industrial applications. Thus, this study contributes to the improvement of dust control strategies in mining by providing a standardized approach for evaluating the efficiency of spray nozzles and supporting the implementation of more effective and sustainable measures.

Keyword: suppression; particulates; pellet feed.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Local de deposição das frações inaláveis, torácicas e respiráveis no sistema respiratório	23
Figura 2 – a) carregamento de vagão; b) correia transportadora; c) empilhamento de minério; d) recuperadora de pilhas.....	25
Figura 3 – a) correia transportadora b) virador de vagão); c) pilha de minério de ferro d) leito de minério em vagões.	28
Figura 4 – Ilustração da formação do cone do spray.	28
Figura 5 – Bico cone cheio	30
Figura 6 – Bico atomizado.....	30
Figura 7 – Bico cone oco	31
Figura 8 – Bico tipo leque.....	31
Figura 9 – Relação de captura de poeira em relação ao tamanho de gota	32
Figura 10 – Desempenho dos bicos em relação ao abatimento de poeira	33
Figura 11 – 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	36
Figura 12 – Fluxograma da metodologia de trabalho.	36
Figura 13 – Diagrama esquemático e seção geradora de poeira.....	38
Figura 14 – Seção de teste	38
Figura 15 – Contador de partículas.....	39
Figura 16 – Sistema de abastecimento do spray	39
Figura 17 – Validação da velocidade.....	41
Figura 18 – Resumo do processo experimental	45
Figura 19 – a) Bico cone cheio; b) bico cone oco; c) bico atomizado	46
Figura 20 – Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone cheio em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida	47
Figura 21 – Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone oco em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida	48
Figura 22 – Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone cheio em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FLUIDPAR – Laboratório de fluidodinâmica e particulados

UFPA – Universidade Federal do Pará

NBR – Norma brasileira regulamentadora

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

MCF – Minério concentrado de Ferro

HP – Cavalos de potência

PTS – partículas totais em suspensão

BAR – Unidade de pressão

CTP-100 – Contador de partículas

MP – Material particulado

LISTA DE SÍMBOLO

g – Gravidade

P_p – Densidade da partícula.

g – Aceleração da gravidade.

L/min – Litros por minuto.

d_p – Diâmetro da partícula

μm – Micrômetro

R^2 – Coeficiente de determinação

P_f – Densidade do ar.

Kg/m^3 – Quilograma por metro cúbico

mm – Milímetro

nm – Nanômetro

Pa/s – Pascal por segundo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Justificativa.....	19
1.2 Objetivos.....	20
1.2.1 Objetivo geral.....	20
1.2.2 Objetivo específicos	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1 Poeira e seus impactos negativos	20
2.2 Impactos negativos da emissão de poeira na saúde humana	22
2.3 Impactos negativos da emissão de poeira no meio ambiente.....	23
2.4 Impacto negativos da emissão de poeira na indústria.....	24
2.5 Controle de Poeira - Técnicas e Tecnologias	25
2.6 Aspersão com Bicos Spray no Controle de Poeira.....	27
2.7 Princípios de funcionamento dos bicos de spray.....	28
2.8 Classificação e Funcionamento dos Bicos de Pulverização	29
2.9 Fatores que influenciam a eficiência dos bicos de spray	32
2.10 Aplicação de Túneis de Vento no Controle e Análise da Poeira.....	34
3 METODOLOGIA	36
3.1 Levantamento e análise da literatura.....	37
3.1.1 Bancada experimental utilizada no desenvolvimento da metodologia.....	37
3.1.2 Determinação da pressão de pulverização dos bicos para elaboração da metodologia...	40
3.1.3 Determinação da velocidade de fluxo do ar para a elaboração da metodologia.....	40
3.1.4 Determinação do Bicos de pulverização para a elaboração da metodologia.....	42
3.1.5 Determinação das métricas de eficiência para a elaboração da metodologia.....	42
3.2 Metodologia experimental elaborada para avaliação da eficiência de bicos de spray no abatimento de poeira	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	45

4.1 Ensaios de validação da metodologia	45
4.2 Análise de eficiência do bico cone cheio com a aplicação da metodologia.....	46
4.3 Análise de eficiência do bico cone oco com a aplicação da metodologia.....	47
4.4 Análise de eficiência do bico cone atomizado com a aplicação da metodologia.....	49
4.5 Discussões	50
5 CONCLUSÃO	54
5.1 Sugestão de trabalhos futuros	55
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

A atividade mineradora, especialmente em operações ao céu aberto, gera uma quantidade significativa de poeira, afetando tanto o meio ambiente quanto a saúde humana. Segundo Portella (2015), a poeira pode ser originada nas etapas de perfuração da rocha, beneficiamento e transporte do minério e a poeira fina gerada nessas atividades permanece suspensa no ar por longos períodos, espalhando-se por áreas extensas, que apesar do menor volume produzido durante a perfuração, essa poeira é altamente nociva aos trabalhadores nas frentes de lavra. As instalações de beneficiamento, como britagem e peneiramento, são fontes de envio de grandes quantidades de partículas finas, que podem ser controladas por métodos como a nebulização de água e a renovação do ar (Portella, 2015). As partículas emitidas incluem material particulado fino (MP2.5 e MP10), que possui alta capacidade de penetração no sistema de proteção humano, sendo um dos principais fatores de risco à saúde em regiões mineradoras.

A implementação de estratégias eficazes para o controle da poeira torna-se essencial para minimizar seus impactos e garantir a sustentabilidade do setor, pois segundo Planner (2011 *apud* Castro, 2022) e Ferraz (2020), a mineração é um setor essencial para o desenvolvimento econômico do país, sendo responsável pelo fornecimento de matérias-primas fundamentais para diversos segmentos industriais. No entanto, essas atividades geram impactos ambientais significativos, principalmente no que se refere à dispersão de poeira durante o manuseio e transporte de minérios, a liberação de partículas no ar compromete a qualidade ambiental, afeta a saúde dos trabalhadores e impacta comunidades próximas às operações minerárias.

A dispersão de poeira proveniente de materiais a granel ocorre, principalmente, por dois mecanismos físicos. Primeiramente, as partículas são liberadas devido ao atrito e colisões entre si durante a queda do material. Além disso, o impacto do minério sobre a superfície de acúmulo provoca a liberação de ar retido, dispersando partículas no ambiente (Cooper; Arnold, 1995; Faschingleitner; Höflinger, 2011). O controle dessas emissões é crucial para reduzir riscos à saúde, prevenir explosões e mitigar a poluição ambiental. A aspersão de água tem sido amplamente utilizada como solução viável para minimizar a liberação de poeira durante o empilhamento de minérios.

Entre as estratégias para a supressão de poeira, os sistemas de pulverização são amplamente adotados. No entanto, métodos convencionais que utilizam exclusivamente a aspersão de água apresentam limitações, como alto consumo hídrico e baixa eficiência na captação de partículas finas (Castro *et al.*, 2022). Tecnologias mais avançadas, como bicos de

spray que combinam ar comprimido e água, têm demonstrado maior eficiência na redução da poeira em comparação aos sistemas tradicionais. Estudos indicam que essa tecnologia pode reduzir a poeira total entre 74% e 82% e a poeira respirável entre 80% e 84%, tornando-se uma alternativa promissora para aplicações industriais (Prostański, 2013).

A eficiência dos bicos de spray no controle da poeira depende de diversos fatores, como a pressão de operação, a vazão do fluido e o tipo de bico utilizado. Diferentes configurações de bicos influenciam o padrão de pulverização, afetando diretamente a distribuição das gotículas e sua capacidade de capturar partículas suspensas (Santos Junior, 2018). Para garantir a escolha do sistema mais eficiente, torna-se indispensável a realização de ensaios laboratoriais controlados, permitindo uma análise detalhada do desempenho dos bicos em condições similares às encontradas nas operações reais.

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo desenvolver uma metodologia padronizada para avaliar a eficiência dos bicos de spray no controle da poeira gerada pelo manuseio de minérios, especificamente o pellet feed. Espera-se que os resultados obtidos contribuam para a adoção de práticas mais eficazes e sustentáveis na indústria mineradora, além disso, a padronização dos métodos de avaliação permitirá a comparação entre diferentes tecnologias, auxiliando na escolha dos sistemas mais adequados para cada contexto operacional. A definição de parâmetros técnicos específicos facilitará a identificação das estratégias mais eficientes para o controle das emissões particuladas, reduzindo impactos ambientais e custos operacionais.

1.1 Justificativa

A dispersão de partículas durante a transferência de minério representa um desafio significativo para a indústria, tornando indispensável a adoção de estratégias eficazes de controle. O manuseio de minérios está diretamente relacionado à liberação de particulados no ar, resultando em poluição atmosférica que impacta tanto o meio ambiente quanto a saúde humana, comprometendo a eficiência das operações. Ao longo dos anos, grandes volumes de minério são extraídos, armazenados e transportados e, sem a aplicação de medidas mitigadoras adequadas, os impactos ambientais, sociais e financeiros decorrentes da emissão de particulados podem se perpetuar. Nesse contexto, a pesquisa e o desenvolvimento de métodos técnica e economicamente viáveis para a supressão da poeira tornam-se fundamentais.

Estudos recentes indicam que a utilização de sistemas de aspersão que combinam ar comprimido e água melhora significativamente a eficiência do controle de poeira. Prostański (2013) avaliou o desempenho dos bicos e constatou que essa tecnologia pode reduzir a poeira respirável em até 93% e a poeira total em 42% em operações de mineração subterrânea, quando comparada a sistemas convencionais de aspersão de água. Além disso, nos pontos de transferência de correias transportadoras, a redução da poeira total variou entre 74% e 82%, enquanto a poeira respirável foi reduzida entre 80% e 84%. Esses resultados demonstram que o aprimoramento dos sistemas de atomização pode contribuir para uma mitigação mais eficiente das emissões particuladas, reduzindo os riscos à saúde ocupacional e melhorando as condições ambientais nas unidades operacionais.

As partículas menores são facilmente transportadas pelo vento, podendo percorrer longas distâncias e causar sérios problemas respiratórios em trabalhadores da mineração e nas comunidades próximas às instalações industriais. Além disso, impactos secundários, como a redução da visibilidade e o acúmulo de poeira em superfícies de casas, veículos e estruturas próximas, também podem ocorrer (Planner, 2011 *apud* Castro, 2022; Ferraz, 2020). Métodos convencionais de supressão de poeira, como a aspersão de água pura, apresentam limitações na captura de partículas finas e exigem um alto consumo de água. Diante desse cenário, a busca por soluções mais eficientes e sustentáveis tem se tornado um foco crescente de pesquisas na área.

A realização de estudos em escala, utilizando bancadas que simulem os efeitos dos diferentes métodos de supressão de poeira, é uma abordagem eficaz para determinar a técnica mais adequada a cada tipo de minério. Na mineração, o uso de bicos de pulverização já é

amplamente empregado para o abatimento de poeira. Cada tipo de bico possui características construtivas que influenciam a formação e projeção das gotículas, variando fatores como o tamanho das gotas, a velocidade de impacto e o formato da zona de cobertura, podendo ser em cone cheio, cone oco, leque, entre outros. Dessa forma, a avaliação da eficiência desses bicos em condições controladas, que simulem variáveis próximas às do ambiente real de mineração, é essencial para a seleção de soluções mais eficazes na mitigação da poeira.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia para avaliar a eficiência de bicos de spray no abatimento de poeira gerada pelo manuseio de minérios.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir parâmetros e procedimentos experimentais para analisar a eficiência dos bicos de spray, investigando a influência de variáveis operacionais, como pressão, velocidade e tipo de bico, na supressão de poeira.
- Comparar a eficiência de diferentes velocidades, pressões e tipos de bicos de spray no controle de partículas em suspensão para o desenvolvimento de uma metodologia experimental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Poeira e seus impactos negativos

Poeira é uma quantidade de pequenas partículas de variadas origens, estruturas e composições, que se depositam a partir da suspensão pelo ar, causando sujeira em diversos objetos ou superfícies. Como poeiras finas denominam-se partículas de pó com um diâmetro inferior a 10 micrômetros (10 μm) (Hughes; Ferret, 2016).

A liberação de partículas durante o manuseio de minérios na mineração acarreta impactos significativos na saúde humana, no meio ambiente e na própria indústria. A formação e emissão de poeira dependem do tipo de manuseio de material, da distribuição de tamanho de partículas geradas e das propriedades do material (Wangchai; Hastie; Wypych, 2013).

De acordo com a norma ISO 7708 (1995), diversos termos são utilizados para descrever e classificar os materiais particulados (MP) presentes no ar.

O material particulado em suspensão (MPS) é definido como o conjunto de partículas sólidas e/ou líquidas dispersas no ar, abrangendo uma ampla faixa de tamanhos, desde algumas dezenas de nanômetros (nm) até algumas centenas de micrômetros (μm). Essas partículas, devido às suas dimensões reduzidas, podem permanecer em suspensão no ar por períodos prolongados, influenciando diretamente a qualidade do ar e a saúde ambiental.

Os aerossóis, por sua vez, correspondem ao conjunto de partículas sólidas e/ou líquidas que permanecem suspensas em um meio gasoso. Geralmente, o tamanho das partículas que compõem os aerossóis varia de 0,001 μm (ou 1 nanômetro) a 100 μm , sendo encontrados em diversos ambientes, tanto naturais quanto antropogênicos, o que os torna um componente relevante na avaliação da poluição atmosférica.

As partículas totais em suspensão (PTS) referem-se à estimativa da massa total de partículas presentes no ar. Essa medição é realizada por meio de equipamentos de amostragem de grande volume, que capturam as partículas suspensas, permitindo sua análise posterior. As PTS englobam toda a gama de partículas presentes no ar, independentemente de sua composição química ou origem.

Segundo Santos *et al.* (2021), o material particulado (MP) é um dos principais poluentes atmosféricos, composto por partículas sólidas e líquidas suspensas no ar. Sua classificação baseia-se no diâmetro aerodinâmico, fundamental para analisar seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente. As partículas com diâmetro aerodinâmico igual ou inferior a 10 μm , conhecidas como MP10, são consideradas inaláveis por alcançarem as vias respiratórias superiores. Essas partículas, originadas principalmente por processos mecânicos, como ressuspensão de poeira, erosão do solo e tráfego em estradas não pavimentadas, permanecem na atmosfera por longos períodos e podem ser transportadas a grandes distâncias.

Dentro do MP10, encontra-se a fração fina, composta por partículas com diâmetro igual ou inferior a 2,5 μm , denominadas MP2,5. Essas partículas, provenientes de processos de combustão, como emissões veiculares, queimadas e atividades industriais, são capazes de penetrar profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares e, em alguns casos, a corrente sanguínea. Isso as torna especialmente perigosas para a saúde, contribuindo para doenças respiratórias e cardiovasculares. Ainda mais preocupantes são as partículas ultrafinas (MP 0,1), com diâmetro inferior a 0,1 μm . Devido ao tamanho nanométrico, essas partículas podem ultrapassar barreiras biológicas, atingindo órgãos e tecidos, e estão frequentemente associadas a fontes de alta energia, como motores a diesel, reações químicas atmosféricas e processos industriais (Freitas; Solci, 2009).

Além disso, há as partículas com diâmetros entre 2,5 µm e 10 µm, conhecidas como fração grosseira. Essas partículas são geradas por processos mecânicos, como obras, tráfego e atividades agrícolas, e possuem impacto significativo, especialmente em pessoas com doenças respiratórias preexistentes. A compreensão detalhada da classificação do material particulado é essencial para mitigar seus impactos, possibilitando o desenvolvimento de políticas de monitoramento da qualidade do ar e medidas de controle mais efetivas, particularmente em áreas urbanas e industriais (Freitas; Solci, 2009).

As atividades de manuseio de sólidos a granel, especialmente aquelas que envolvem a queda livre de material, como na formação de pilhas de estocagem, são amplamente empregadas na indústria mineradora. Durante essas operações, o despejo do minério a partir de uma tremonha ou de uma correia transportadora resulta na dispersão de partículas finas, que se desprendem do fluxo principal e se misturam ao ar ambiente, gerando a suspensão de poeira (Azhar; Rani, 2020; Wangchai; Hastie; Wypych, 2013).

2.2 Impactos negativos da emissão de poeira na saúde humana

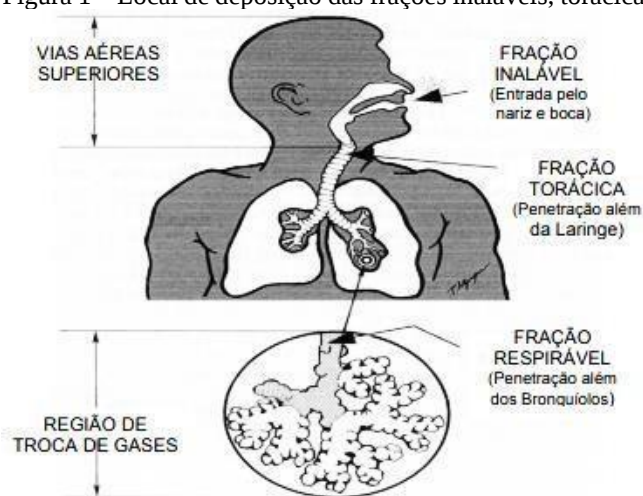
A emissão de material particulado durante o manuseio de minérios representa um risco significativo para a qualidade do ar. Partículas muito finas de minério podem ser transportadas por longas distâncias devido à ação do vento, ocasionando impactos adversos à saúde. Entre os principais efeitos estão os problemas respiratórios que afetam tanto os trabalhadores da mineração quanto as comunidades situadas nas proximidades das instalações industriais. Além dos riscos à saúde, a dispersão de poeira pode gerar outros impactos, ainda que de menor gravidade, como a redução da visibilidade e o acúmulo de poeira sobre superfícies, incluindo residências, veículos e estruturas próximas (Planner, 2011 *apud* Castro, 2022; Ferraz, 2020)

A exposição à poeira no ambiente pode acarretar diversos impactos adversos à saúde humana, especialmente relacionados a doenças respiratórias, irritações oculares e problemas dermatológicos. Segundo Ouriques, Barroso e Wolff (2012), a inalação de partículas de poeira está diretamente associada ao desenvolvimento de doenças respiratórias. A silicose, uma pneumoconiose causada pela inalação de poeiras contendo sílica livre cristalizada, destaca-se como a principal doença ocupacional pulmonar no Brasil devido ao elevado número de trabalhadores expostos.

Além disso, a exposição a partículas finas pode desencadear ou agravar quadros de asma, caracterizados por inflamação crônica das vias aéreas, resultando em sintomas como sibilância, tosse e dificuldade respiratória (Ouriques; Barroso; Wolff, 2012). O particulado grosso

insolúvel, quando acumulado nas vias respiratórias superiores, pode agravar problemas como a asma e ser eliminado por meio de tosse, espirro ou ingestão (Santos *et al.*, 2021). Já as partículas insolúveis menores podem concentrar-se nos espaços mais profundos do pulmão, sendo removidas por processos fisiológicos de proteção e limpeza ou podendo permanecer retidas no organismo por longos períodos. A interação desses processos determina o potencial de risco associado à exposição às poeiras. A Figura 1 ilustra a deposição das partículas no sistema respiratório humano, evidenciando as frações inaláveis, torácicas e respiráveis, com seus respectivos diâmetros aerodinâmicos.

Figura 1 – Local de deposição das frações inaláveis, torácicas e respiráveis no sistema respiratório



Fonte: Santos *et al.*, (2021)

A presença de poeira no ambiente também pode afetar os olhos. Um estudo sobre a poluição ambiental decorrente da exposição à poeira de gesso revelou que 43% da população estudada relatou irritação na conjuntiva ocular. Problemas dermatológicos também podem ocorrer devido ao contato direto da pele com partículas de poeira, especialmente em ambientes ocupacionais, causando irritação cutânea e levando a dermatites de contato ou à exacerbação de condições pré-existentes (Saraiva *et al.* 2024).

2.3 Impactos negativos da emissão de poeira no meio ambiente

Além dos efeitos na saúde, as partículas geradas pela mineração impactam significativamente o meio ambiente, incluindo a vegetação e os corpos hídricos. Segundo Silva, Moura e Santos (2018), a deposição de poeira sobre as folhas reduz a eficiência da fotossíntese, prejudicando o crescimento das plantas e afetando ecossistemas inteiros. Em áreas mineradoras,

é comum observar a destruição da vegetação nativa, o que contribui para a erosão do solo e a perda de biodiversidade.

Outro impacto significativo é a contaminação de corpos hídricos. As partículas transportadas pela chuva podem se acumular em rios e lagos, provocando alterações químicas e físicas na água, comprometendo sua qualidade e afetando tanto o consumo humano quanto os ecossistemas aquáticos.

A emissão de partículas finas, como o material particulado (PM10 e PM2.5), também pode reduzir drasticamente a visibilidade em áreas urbanas e rurais próximas às atividades mineradoras. Conforme Milanez (2017), essas partículas dispersam a luz solar, criando uma névoa que pode se espalhar por quilômetros a partir da fonte emissora. Esse efeito é agravado em climas secos e com baixa umidade, onde a dispersão das partículas no ar é mais intensa.

Portella (2015) aponta que a poeira gerada por operações de mineração a céu aberto, transporte de minério e manuseio de rejeitos pode encobrir áreas naturais, cobrindo a vegetação, os cursos d'água e as superfícies do solo com uma camada de pó. Além de degradar a paisagem visual, essa cobertura dificulta a identificação de características geográficas importantes, como rios e trilhas.

2.4 Impacto negativos da emissão de poeira na indústria

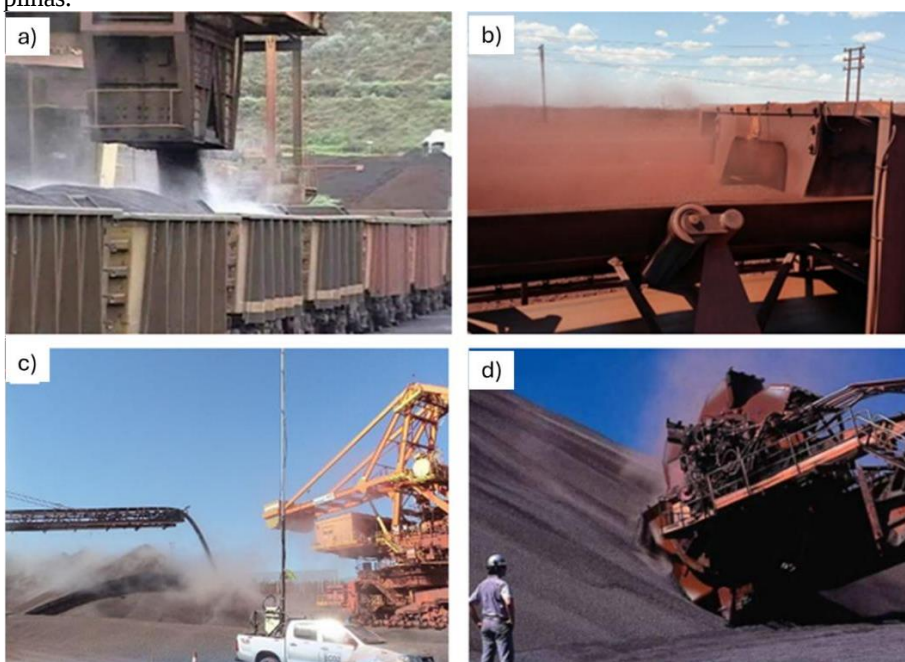
A emissão de poeira nas atividades industriais, especialmente na mineração, acarreta diversos impactos que afetam a eficiência operacional e os custos das empresas.

Segundo Mendes (2014), a dispersão de partículas finas durante o processamento e manuseio de materiais resulta em perdas significativas de produto. Essas perdas não apenas representam desperdício de recursos, mas também podem comprometer a qualidade do ambiente de trabalho e a saúde dos funcionários. A falta de controle adequado da poeira pode levar à dispersão de partículas no ambiente, causando desperdício de material e possíveis contaminações.

A acumulação de poeira em equipamentos e instalações industriais pode prejudicar o desempenho dos maquinários, levando a falhas prematuras e aumentando a necessidade de manutenção. Além disso, ambientes com alta concentração de poeira podem exigir pausas frequentes para limpeza, reduzindo a produtividade. A presença de poeira nas instalações industriais pode afetar negativamente o funcionamento dos equipamentos, resultando em interrupções no processo produtivo (Mendes, 2014).

A implementação de sistemas de controle de poeira, como coletores de pó e sistemas de supressão, envolve investimentos significativos tanto na instalação quanto na manutenção. Embora esses sistemas sejam essenciais para garantir a conformidade com normas ambientais e de saúde ocupacional, eles representam um custo adicional para as empresas. Sistemas coletores de pó podem fornecer um controle eficaz durante um longo período; no entanto, o capital e os custos operacionais são elevados (Mendes, 2014). A Figura 2 apresenta algumas das situações de manuseio em que a emissão de poeira é mais frequente.

Figura 2 – a) carregamento de vagão; b) correia transportadora; c) empilhamento de minério; d) recuperadora de pilhas.



Fonte: a) (Barros, 2008); b) (Ecosoft, 2018); c) (Das, 2007); d) (Exame, 2014) *apud* Santos Junior (2018)

Além disso, conforme destacado por Ibrahimpour *et al.* (2021), a deposição de poeira em corpos d'água pode contribuir para a eutrofização, promovendo o crescimento excessivo de algas e resultando na morte de peixes. Esse processo também pode comprometer a qualidade dos recursos hídricos, afetando a potabilidade da água e representando um risco à saúde pública.

2.5 Controle de Poeira - Técnicas e Tecnologias

As minas de minério de ferro e carvão, em sua maioria, estão situadas a grandes distâncias dos portos onde o material é carregado em navios para exportação. Diante desse cenário, torna-se essencial a implementação de uma logística eficiente para viabilizar o transporte do minério desde as minas até os portos, passando por ferrovias e estruturas de estocagem. O processo tem início na mina, onde ocorrem a extração, o beneficiamento e o

armazenamento do minério. Em seguida, o material é transportado para os silos de carregamento dos vagões ferroviários, que o conduzem até os portos. Ao chegarem ao destino, os vagões são descarregados por meio de viradores, que despejam o minério em correias transportadoras, direcionando-o para as áreas de estocagem portuária ou para os estoques das usinas de pelletização. De maneira geral, o descarregamento direto dos vagões nos compartimentos dos navios não é viável, pois o fluxo de chegada dos trens ao porto não acompanha a frequência de atracação das embarcações. Dessa forma, faz-se necessário o armazenamento temporário do minério em pátios de estocagem, permitindo sua posterior transferência para os navios. Antes do embarque, o minério é estocado e submetido a processos de mistura, combinando diferentes tipos de minérios para atender às especificações exigidas pelos clientes (Meireles, 2010).

O controle de poeira em ambientes industriais, especialmente na mineração, é essencial para garantir a saúde dos trabalhadores, a preservação ambiental e a eficiência operacional. As estratégias de controle podem ser classificadas em medidas ativas e passivas, cada uma com abordagens específicas para mitigar a emissão e dispersão de partículas. A liberação de poeira a partir do material a granel ocorre devido a dois principais mecanismos físicos, os quais possibilitam que as partículas sejam transportadas pelas correntes de vento para além do fluxo de empilhamento. O primeiro mecanismo está relacionado à queda livre do material, durante a qual as partículas sofrem colisões entre si e interagem com o ar circundante, resultando na dispersão de poeira. O segundo ocorre no momento do impacto do fluxo de material sobre a superfície da pilha em formação, quando o ar aprisionado no material é liberado, promovendo a emissão de partículas para a atmosfera (Cooper; Arnold, 1995; Faschingleitner; Höflinger, 2011).

Segundo Mendes (2014) as medidas ativas envolvem intervenções diretas no processo produtivo para reduzir ou eliminar a geração de poeira. Entre as principais técnicas estão:

Supressão com Água e Aditivos: A aplicação de água é uma prática comum para controlar a poeira gerada durante o manuseio de materiais. Para aumentar a eficácia, aditivos químicos, como surfactantes, podem ser incorporados à água, reduzindo a tensão superficial e melhorando a adesão às partículas de poeira. Soluções que utilizam surfactantes para otimizar a tensão superficial da água, criando gotículas menores que cobrem uma área maior, resultando em um controle de poeira mais eficaz.

Sistemas de Supressão por Espuma: A utilização de espuma é eficaz na supressão de poeira em pontos de transferência de materiais. A espuma cobre as partículas de poeira, impedindo sua dispersão no ar.

Ventilação Local Exaustora: A instalação de sistemas de ventilação que capturam e removem a poeira diretamente na fonte é uma medida eficaz para impedir que as partículas se dispersem no ambiente de trabalho. Esses sistemas são projetados para extrair o ar contaminado, filtrá-lo e liberá-lo de volta ao ambiente ou direcioná-lo para um sistema de tratamento.

Segundo Mendes (2014) as medidas passivas focam na contenção e minimização da dispersão de poeira sem intervenções diretas no processo produtivo. Entre elas destacam-se: **Barreiras Físicas:** A instalação de cortinas, paredes ou enclausuramento de equipamentos ajuda a conter a poeira gerada, limitando sua propagação para outras áreas da instalação. Essas barreiras físicas são especialmente úteis em pontos de grande geração de poeira, como britadores e transportadores de correia.

Manutenção de Estradas Internas: Em operações de mineração, a manutenção adequada das estradas internas é crucial para reduzir a geração de poeira. A aplicação de supressores de poeira nas vias de transporte minimiza a dispersão de partículas causada pelo tráfego de veículos pesados.

Revegetação de Áreas Degradadas: A revegetação de áreas expostas ajuda a estabilizar o solo e reduzir a emissão de poeira. A cobertura vegetal atua como uma barreira natural, diminuindo a ação do vento sobre superfícies suscetíveis à erosão e consequente geração de poeira.

2.6 Aspersão com Bicos Spray no Controle de Poeira

Os bicos de spray são componentes essenciais no controle de poeira em operações de mineração, atuando na supressão de partículas em suspensão e contribuindo para a melhoria das condições ambientais e de saúde ocupacional. De acordo com Santos Júnior (2018), as empresas de mineração devem elaborar projetos de controle ambiental que incluam medidas mitigadoras para os impactos ambientais identificados, sendo os sistemas de aspersão com bicos spray uma solução eficaz para o abatimento de poeira. Esses sistemas são compostos por uma unidade central com bomba, filtros, tubulação e bicos spray, que pulverizam água sobre as áreas de geração de poeira, promovendo a aglomeração das partículas e sua consequente deposição.

A aspersão de poeira utilizando bicos spray é uma técnica amplamente empregada em ambientes industriais para controlar a dispersão de partículas no ar. Essa abordagem consiste na pulverização de líquidos, geralmente água ou soluções específicas, através de bicos projetados para gerar gotículas de tamanhos adequados, capazes de capturar e precipitar as partículas de poeira suspensas, como apresentada na Figura 3.

Figura 3 – a) correia transportadora b) virador de vagão; c) pilha de minério de ferro d) leito de minério em vagões.

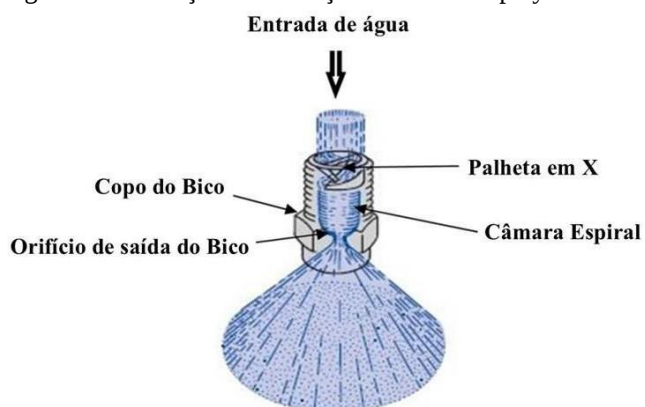


Fonte: (Iema, 2018); (Iema, 2018 (Iema, 2018); (Controlar, 2020) apud Fontana (2021)

2.7 Princípios de funcionamento dos bicos de spray

Abubaker *et al.* (2018) analisam o funcionamento dos bicos de spray do tipo cone cheio, detalhando o impacto de seus componentes na dispersão do líquido pulverizado. O estudo evidencia que a água, ao atravessar palhetas helicoidais, adquire um movimento rotacional antes de atingir a câmara de turbulência como apresentado na Figura 4. Esse efeito provoca a formação de um fluxo giratório intenso, resultando na atomização da água em um padrão cônico ao ser expelida pelo bico.

Figura 4 – Ilustração da formação do cone do spray.



Fonte: Abubaker et al. (2018).

O ângulo do cone pulverizado é definido pela ação das forças centrífugas, que direcionam o líquido para as extremidades do jato. Além disso, a dinâmica das gotas formadas está diretamente ligada ao seu tamanho. Enquanto gotas menores se deslocam inicialmente em alta velocidade, sua desaceleração ocorre rapidamente devido à resistência do ar. Em contrapartida, gotas maiores mantêm sua velocidade por distâncias mais longas, favorecendo a uniformidade da pulverização. Essas características são determinantes para a aplicação eficiente dos bicos de spray no controle de poeira (Abubaker et al., 2018).

Lefebvre (1989) detalha esse processo em duas etapas principais. Inicialmente, ocorre a fragmentação primária, na qual o jato de líquido é expelido pelo bico sob alta pressão, formando uma coluna ou filme líquido. Devido às instabilidades aerodinâmicas e à interação com o ambiente, essa coluna começa a se desintegrar, originando grandes estruturas líquidas irregulares. Em seguida, ocorre a fragmentação secundária, na qual essas estruturas líquidas sofrem subdivisões adicionais, resultando em gotículas menores e mais uniformes. A eficiência desse processo depende de fatores como a velocidade do jato, a particularidade do líquido e o design do bico.

A geometria do spray e o tamanho das gotículas resultantes são influenciados por uma combinação de parâmetros, incluindo a vazão do líquido, a pressão de operação e o design específico do bico. Diferentes tipos de atomizadores utilizam mecanismos diferentes para promover a dispersão do líquido. Os bicos de atomização rotativa, por exemplo, fazem uso de forças centrífugas, enquanto os bicos de atomização por pressão dependem da energia do líquido pressurizado para alcançar a atomização desejada (Lefebvre, 1989).

2.8 Classificação e Funcionamento dos Bicos de Pulverização

Colinet, Halldin e Schall (2021) enfatiza que a escolha do tipo de bico é um fator determinante para o sucesso das aplicações de ocupação no controle de poeira, variando conforme o método adotado. O estudo aponta que diferentes configurações geométricas de cones foram testadas para avaliar sua adequação ao processo de abatimento de poeira, identificando aquelas que apresentam melhor desempenho na captura e supressão de partículas em suspensão.

Os bicos de distribuição de cone cheio são projetados para produzir um padrão de distribuição circular completa, caracterizado por uma distribuição uniforme de gotas de tamanho médio a grande. Segundo a Spraying Systems Co. (2016), esses bicos fornecem um

jato cheio, redondo e uniforme, sendo usados em aplicações que envolvem lavagem e enxágue, quebram gotas em processos de ocorrência química, resfriamento de metal, supressão de poeira e proteção contra fogo. O funcionamento desses bicos baseia-se na passagem do líquido por uma câmara de turbilhonamento interno, onde o fluxo é direcionado de maneira a formar o padrão de cone cheio na saída. A pressão de operação e o design do bico influenciam o ângulo do jato, que pode variar de 15° a 125°, permitindo a adaptação a diferentes necessidades de aplicação como apresentado na Figura 5.

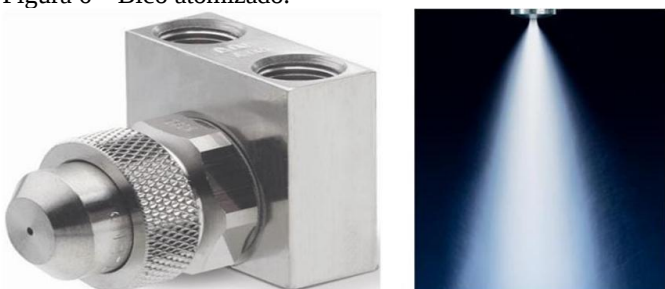
Figura 5 – Bico cone cheio



Fonte: Colinet, Halldin e Schall (2021)

Os bicos atomizadores de ar são dispositivos que utilizam uma combinação de ar comprimido e para gerar uma turbina finamente atomizada, permitindo um controle preciso do tamanho das gotículas e do padrão de consumo. De acordo com a Spraying Systems Co. (2016), esses bicos são ideais para aplicações que requerem uma névoa fina e altamente controlada como apresentada na Figura 6.

Figura 6 – Bico atomizado.

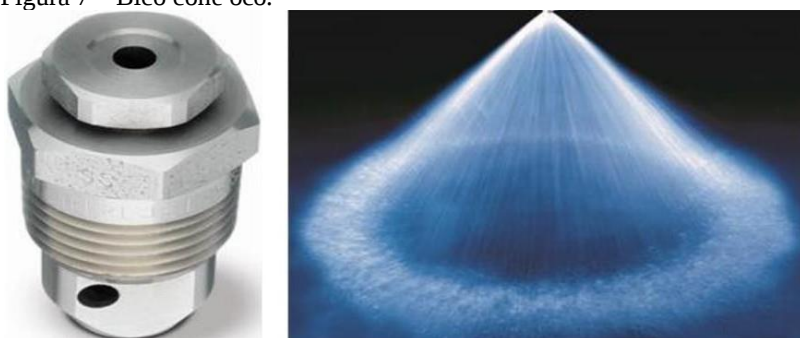


Fonte: Colinet, Halldin e Schall (2021)

O funcionamento dos bicos atomizadores de ar baseia-se na mistura de ar comprimido e líquido, que pode ocorrer internamente ou externamente ao bico. Na mistura interna, o ar e o líquido são combinados dentro do bico, produzindo uma atomização mais fina, adequada para líquidos de baixa qualidade. Já na mistura externa, a combinação ocorre fora do bico, permitindo o uso de líquidos mais viscosos e oferecendo maior controle sobre os fluxos de ar e líquido.

Os bicos de pulverização de cone oco são projetados para gerar um padrão de spray em formato cônico, com uma área de impacto em forma de anel, descrito pela distribuição de gotas de pequeno a médio porte como apresentado na Figura 7. De acordo com a Spraying Systems Co. (2016), esses bicos possuem uma passagem de fluxo ampla e desobstruída, o que minimiza o risco de entupimento e permite uma distribuição uniforme em uma ampla faixa de vazões e pressão.

Figura 7 – Bico cone oco.

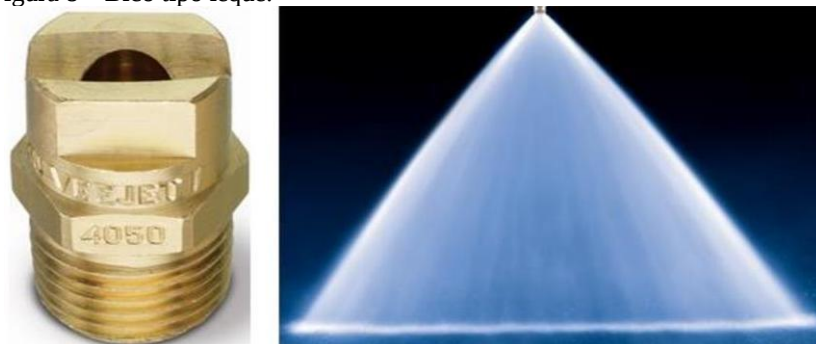


Fonte: Colinet, Halldin e Schall (2021)

Esse funcionamento básico baseia-se na criação de uma câmara de turbilhonamento interno, onde o líquido é introduzido tangencialmente, gerando um movimento rotacional antes de ser expelido pelas aberturas de saída.

Os bicos de combustão do tipo leque são amplamente utilizados em aplicações de redução de poeira devido ao seu formato de jato plano, que gera uma distribuição uniforme de gotículas em um padrão linear como apresentado na Figura 8. Diferentemente dos bicos de cone oco, que executam um padrão circular, os bicos de leque formam uma faixa de carga que pode cobrir áreas maiores com menor sobreposição, tornando-os ideais para aplicações em correias transportadoras, pontos de transferência de material e áreas de carregamento e descarregamento de minérios.

Figura 8 – Bico tipo leque.



Fonte: Colinet, Halldin e Schall (2021)

De acordo com Pollock e Organiscak (2007), os bicos de leite possuem a vantagem de distribuir a distribuição de maneira uniforme ao longo de uma superfície, permitindo um maior controle sobre a área de cobertura. Entretanto, a eficácia na captura de poeira depende da escolha adequada do ângulo de intensidade e da pressão de operação. Bicos com ângulos mais indiretos jatos mais concentrados, enquanto ângulos mais amplos tem uma cobertura maior, mas podem gerar gotas menores e mais suscetíveis à evaporação.

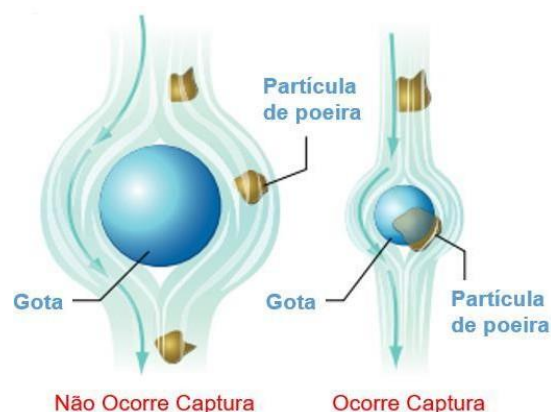
2.9 Fatores que influenciam a eficiência dos bicos de spray

Para um sistema eficiente de redução de poeira, é essencial compreender que o bico de aspersão desempenha um papel fundamental no processo. As características físicas do bico influenciam diretamente sua eficácia, sendo que parâmetros como o tamanho das gotas, o relacionado com a atividade, a velocidade das gotas, a penetração do spray, a vazão e a pressão da água variando conforme o tipo de bico utilizado. A escolha adequada do bico é crucial para garantir a captura eficiente das partículas de poeira suspensas no ambiente (Mohal, 1988; Spraying systems, 2016; Roberts; Wypych, 2017).

Segundo Tien e Kim (1997), a captura da poeira ocorre em diferentes etapas, que incluem as seções entre as partículas de poeira e as gotas de água, a adesão das partículas às gotículas, a absorção das partículas de poeira pelo líquido e, por fim, a aglomeração das partículas umedecidas como apresentado na Figura 9. Esse processo facilita a remoção de partículas do ambiente, reduzindo a dispersão de poeira e minimizando os impactos ambientais e ocupacionais associados à interferência de minerais.

O impacto inercial acontece quando uma partícula de poeira, devido à sua inércia, não acompanha o fluxo de ar ao redor de uma gota de água, colidindo diretamente com ela. Já a interceptação ocorre quando uma partícula menor, que normalmente segue a linha de corrente do fluxo de ar, acaba atingindo a gota porque seu raio excede a distância entre sua trajetória e a superfície da gota. Esse aspecto é mais comum em partículas com menor massa e baixa inércia.

Figura 9 – Relação de captura de poeira em relação ao tamanho de gota

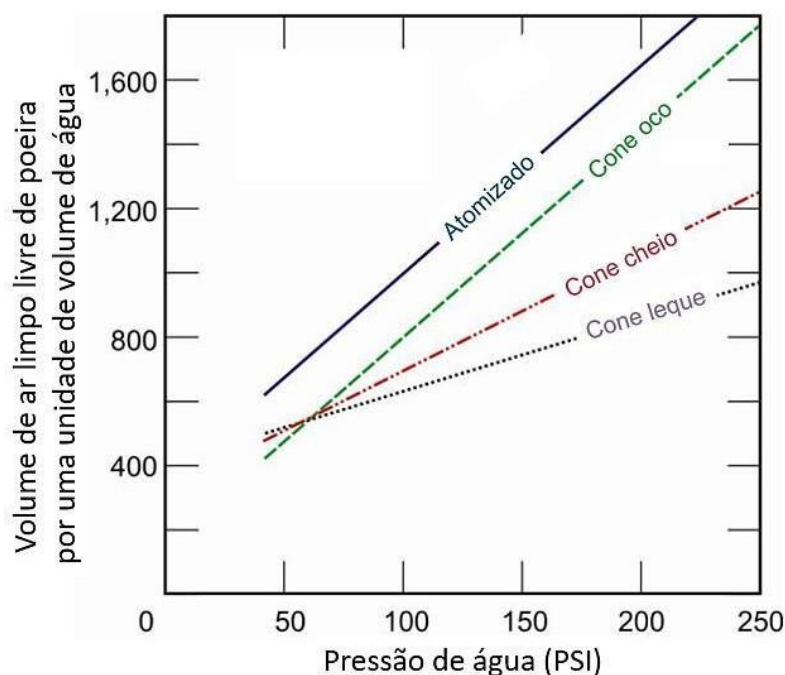


Fonte: Adaptado SPRAYING SYSTEMS (2016).

Entre os fatores que determinam a eficiência do abatimento de poeira, o tamanho das gotas se destaca como um dos mais importantes. De acordo com Roberts e Wypych (2017), esse fator está relacionado à Lei de Stokes, que descreve a influência da força de arrasto sobre partículas esféricas em movimento dentro de um fluido. Durante o processo de transferência de minérios, partículas de poeira e gotas de água interagem no ar, transmitindo forças que alteram suas trajetórias. Essa interação influencia diretamente a eficiência da captura das partículas, tornando essencial o controle do tamanho das gotas para otimizar o processo.

Segundo Colinet, Halldin e Schall (2021), os bicos do tipo cone oco demonstram maior eficiência na captura de poeira em suspensão quando comparados aos bicos de atomização a ar. Essa vantagem se deve ao fato de que os bicos de cone oco geram gotas menores, que possuem maior capacidade de interação com as partículas de poeira dispersas no ar, facilitando sua captura e remoção. A Figura 10 apresenta um gráfico de desempenho dos bicos.

Figura 10 – Desempenho dos bicos em relação ao abatimento de poeira.



Fonte: Adaptado Colinet, Halldin e Schall (2021)

Apesar de os bicos de atomização a ar serem eficientes na geração de gotas finas para o abatimento de poeira, eles apresentam desafios operacionais que limitam sua aplicação. Sua operação requer um suprimento simultâneo de água e ar comprimido, o que aumenta a complexidade da instalação e da manutenção. Além disso, suas aberturas menores tornam-se mais suscetíveis a entupimentos, especialmente em ambientes com elevada concentração de partículas suspensas.

Diante dessas limitações, a aplicação de bicos de atomização a ar na indústria mineradora tem sido reduzida, com maior preferência pelos bicos de cone oco para a supressão de poeira. Embora os bicos de atomização a ar possuam vantagens na captura de partículas finas, fatores como a necessidade de ar comprimido e a tendência ao entupimento tornam os bicos de cone oco a opção mais viável e amplamente adotada para o controle eficiente da poeira em suspensão.

2.10 Aplicação de Túneis de Vento no Controle e Análise da Poeira

Nos últimos anos, diversos estudos utilizaram túneis de vento para investigar a eficiência de diferentes mecanismos de supressão da poeira gerada durante a transferência de minérios (Fontana *et al.*, 2024). Segundo Cejpek *et al.* (2020 *apud* Santos, 2024), esses túneis são extremamente trabalhados em pesquisas sobre o fluxo de fluidos, sendo particularmente úteis para análises envolvendo sprays sob diversas condições de escoamento, como a interação entre o fluido e partículas em suspensão. Os autores destacam que essa abordagem experimental

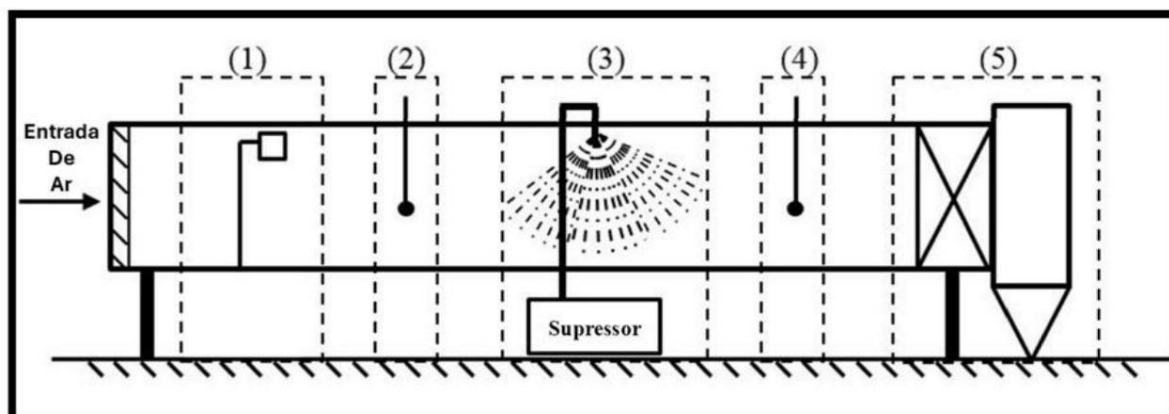
se mostra eficaz devido à capacidade dos túneis de vento em reproduzir as características associadas à geração de poeira e ao uso de sprays como estratégia para mitigar a emissão de material particulado.

Leal Filho *et al.* (2011 *apud* Santos Junior, 2018) conduziram um estudo utilizando um túnel de vento para simular a geração de poeira durante o transporte ferroviário de minérios concentrados de ferro (CMF) de Minas Gerais até o porto de Tubarão, no Espírito Santo. O túnel, com 6 metros de comprimento e uma seção de testes de 0,5 metro de diâmetro e foi equipado com um ventilador axial capaz de produzir fluxos de ar com velocidades entre 11 e 28 m/s (equivalente a 40-100 km/h), acionado por um motor de 10 HP. A velocidade do ar foi monitorada por meio de dois tubos de Pitot posicionados paralelamente e perpendicularmente ao fluxo. Além disso, sensores de temperatura e umidade relativas foram instalados para registrar as condições.

Aboalez *et al.* (2024) ressaltam a relevância de ambientes especializados, como túneis de vento de poeira ou sistemas controlados de dispersão de partículas. Seus estudos demonstram que essas configurações permitem aprimorar estratégias de controle de poeira ao simular com alta fidelidade as condições reais, contribuindo para a melhoria dos padrões de saúde e segurança em operações minerárias.

Xu *et al.* (2018) explicam que a eficácia na supressão de poeira depende de diversos fatores, cuja medição em campo pode ser desafiadora, por esse motivo, simuladores em túneis de vento laboratoriais oferecem um ambiente controlado, permitindo a realização de experimentos de maneira mais acessível e eficiente. Os autores destacam a importância de ambientes controlados, com túneis de vento, na pesquisa e no aprimoramento de tecnologias externas para a mitigação da poeira por meio da concentração, onde tais sistemas permitem ajustar e monitorar variáveis que influenciam o comportamento das partículas, tornando-se fundamentais para conter a dispersão em diferentes setores industriais. Os autores ressaltam que um túnel de vento destinado a esse tipo de estudo é, geralmente, projetado com uma seção de teste que limita a propagação da poeira. Além disso, ele inclui um ventilador de sopro ou exaustão para gerar o fluxo de ar, um dispositivo gerador de poeira, um sistema de extração de água, equipamentos para monitoramento de partículas em suspensão e uma unidade de coleta de poeira na extremidade do sistema. O esquema desse sistema pode é mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema típico de um túnel usado para estudo de abatimento de poeira via sprays. (1) Geração de poeira, (2) e (4) Amostragem, (3) bicos de spray e (5) coletor de poeira não abatida.



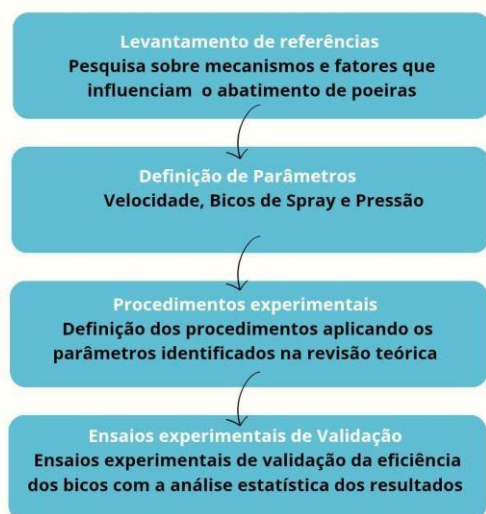
Fonte: Xu *et al.* (2018)

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo tem como objetivo desenvolver e validar um protocolo para avaliar a eficiência de bicos de pulverização no abatimento de poeira gerada pelo manuseio de minérios. Para garantir um embasamento teórico sólido e a validação experimental dos parâmetros definidos, a pesquisa foi estruturada em três etapas.

A estrutura metodológica adotada pode ser visualizada na Figura 12, que apresenta de forma esquemática o fluxo das etapas desenvolvidas no estudo, esse fluxograma resume a sequência lógica da pesquisa, desde a revisão bibliográfica até a experimentação e a análise dos resultados, permitindo uma visão clara do processo adotado.

Figura 12 – Fluxograma da metodologia de trabalho.



Fonte: Autores (2025)

Inicialmente, serão apresentados os fundamentos teóricos que embasam a pesquisa, seguidos da descrição dos ensaios experimentais apresentados em bancada e por fim, abordamos os métodos de análise e validação dos resultados, garantindo a precisão e a relevância dos dados obtidos

3.1 Levantamento e análise da literatura

A revisão bibliográfica constitui uma etapa essencial para o embasamento teórico deste estudo, possibilitando a identificação dos principais fatores que influenciam a dispersão e o controle de poeira em operações de manuseio de minérios. Para isso, foram analisadas publicações científicas, normas técnicas e estudos experimentais, permitindo uma compreensão abrangente dos mecanismos envolvidos na geração e mitigação de partículas em suspensão.

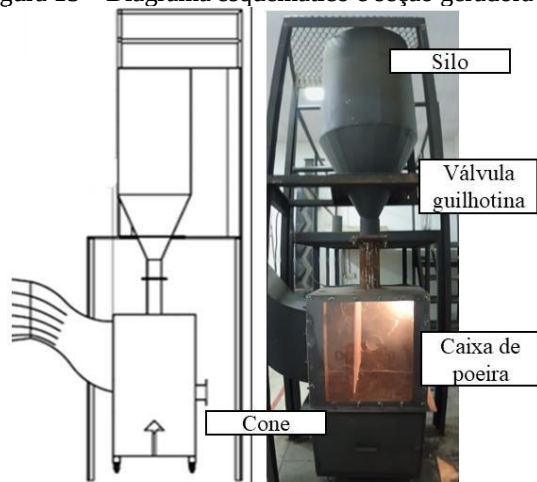
Com base nessa revisão detalhada, a etapa inicial do estudo concentrou-se na identificação e definição das variáveis experimentais cruciais para a análise da eficiência dos bicos de pulverização. Essas variáveis foram selecionadas considerando tanto os achados da literatura científica quanto as práticas consolidadas na indústria de controle de poeira, assegurando que os parâmetros analisados fossem representativos das condições reais de operação e do desempenho esperado dos dispositivos testados.

3.1.1 Bancada experimental utilizada no desenvolvimento da metodologia

Um dos parâmetros fundamentais deste estudo é a utilização de uma bancada experimental construída por Santos (2024), projetada para simular as condições operacionais de geração e controle de poeira. Essa bancada, composta por três seções principais — geração de poeira, teste e controle —, foi desenvolvida para permitir a realização de testes controlados, assegurando a reprodutibilidade e a confiabilidade dos resultados.

A seção de geração de poeira promove a dispersão de partículas de maneira controlada, simulando condições reais de emissão. O sistema de dispersão, composto por uma caixa e um silo de alimentação, permite a liberação do material particulado conforme ilustrado na Figura 13. essa configuração garante a distribuição uniforme das partículas na câmara de testes.

Figura 13 – Diagrama esquemático e seção geradora de poeira



Fonte: Adaptada de Santos (2025)

Já a seção de teste possibilita a interação entre os sprays de pulverização e a poeira gerada, permitindo a avaliação da eficiência dos bicos pulverizadores. Os bicos são posicionados no centro da seção, enquanto sondas de captação de fluxo de poeira estão instaladas antes e depois do bico, conforme mostrado na Figura 14. Essa estrutura possibilita medições precisas das concentrações de partículas antes e após a pulverização.

Figura 14 – Seção de teste.



Fonte: Santos (2025) Adaptada

Um contador de partículas utilizado nesta seção é o modelo CPT-100 da Instrutherm, capaz de medir partículas $2,83\mu\text{m}$. Com uma taxa de amostragem de $2,83\text{ L/min}$. Este contador, apresentado na Figura 15 está acoplado ao sistema para realizar medições em tempo real.

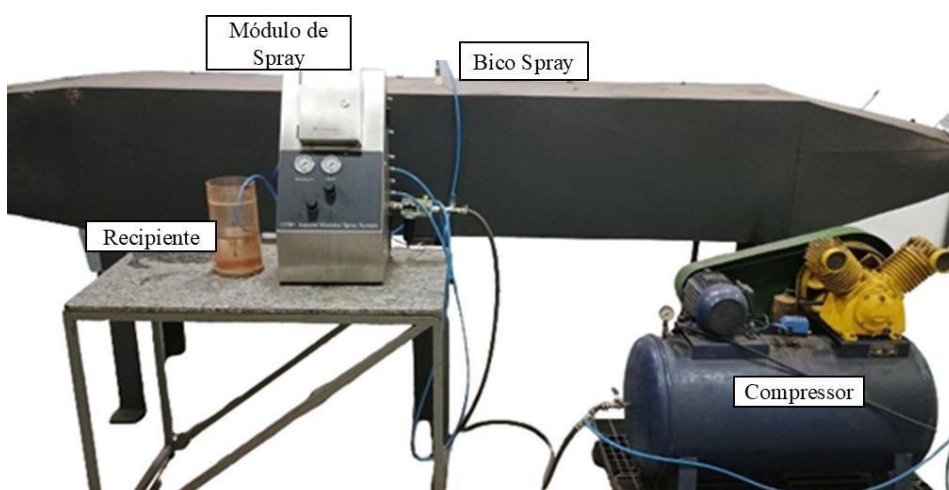
Figura 15 – Contador de partículas



Fonte: Instrutherm (2025).

Por fim, a seção de controle gerencia os parâmetros operacionais, como pressão e vazão da água, garantindo um ambiente controlado para os ensaios. O sistema de abastecimento do spray, representado na Figura 16, é responsável pela regulação da pressão da água e pelo monitoramento dos padrões de pulverização. O módulo de spray modelo 1550+ da Spraying Systems Co, é basicamente uma unidade autônoma que pode fornecer o bombeamento (contínuo ou intermitente) de fluídos e o controle de pulverização de forma fácil e acessível. O módulo é constituído de uma bomba pneumática duplo-diafragma, com pressão de trabalho mínima de 1,4 bar e máxima de 7 bar, sucção máxima de 3 m, consumo de ar de 250 l/min e volume por pulso de 74 cm³.

Figura 16 – Sistema de abastecimento do spray



Fonte: Autores (2025)

Esse sistema integrado possibilita ajustes precisos em variáveis críticas, como a vazão de água e ar, a geometria de pulverização e a concentração de partículas em suspensão,

permitindo uma análise detalhada e rigorosa da eficiência dos bicos em diferentes cenários operacionais.

3.1.2 Determinação da pressão de pulverização dos bicos para elaboração da metodologia

A escolha das pressões de pulverização de 2 bar, 3 bar e 5 bar baseia-se em estudos técnicos que demonstram a influência da pressão no tamanho das gotas e na eficiência do controle de partículas em suspensão. Cunha, Teixeira e Fernandes (2007) analisaram pressões de 2 bar, 3 bar e 4 bar, concluindo que pressões mais baixas produzem gotas maiores, adequadas para capturar partículas maiores, enquanto pressões mais altas aumentam a atomização, mas também a dispersão indesejada.

Ribeiro *et al.* (2023) estudaram pressões entre 2 bar e 6 bar, verificando que o aumento da pressão reduz o tamanho das gotas, melhorando a cobertura e a densidade no alvo. Pressões intermediárias, como 3 bar, ofereceram um equilíbrio entre eficiência e uniformidade, enquanto pressões mais altas, como 5 bar, foram recomendadas para maximizar a atomização.

Gabriel e Baio (2013) investigaram pressões entre 1,2 bar e 4,4 bar, observando que pressões intermediárias proporcionam maior eficiência na pulverização, otimizando a cobertura e reduzindo a dispersão não controlada.

Assim, a seleção das pressões reflete condições típicas de uso: 2 bar para capturar partículas maiores, como MP10, com menor dispersão; 3 bar como equilíbrio entre atomização e consumo de recursos; e 5 bar para controlar partículas finas, como MP2,5, onde a atomização é essencial.

3.1.3 Determinação da velocidade de fluxo do ar para a elaboração da metodologia

As velocidades dos ensaios foram definidas a partir da escolha do diâmetro das partículas de interesse. Considerando as limitações do contador de partículas CPT-100, optou-se por um diâmetro de 50 μm , o que ampliaria a capacidade de arraste das partículas e compensaria perdas no túnel de vento. O pellet feed foi utilizado como referência devido à sua maior massa específica.

Desta forma, usando-se a Equação (1) temos as seguintes variáveis:

- a) Diâmetro da partícula (d_p) = $50\mu\text{m} = 50 \times 10^{-6} \text{ m}$;
- b) Densidade da partícula (ρ_p) = $4,77 \text{ g/m}^3 = 4220 \text{ kg/m}^3$;
- c) Densidade do ar (ρ_f) = $1,1415 \text{ kg/m}^3$ (aproximado para 30°C);
- d) Viscosidade do ar (μ) = $1,89 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (aproximado para 30°C);

e) Gravidade (g) = 9,81m/s

Nestes parâmetros encontra-se a velocidade terminal:

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

Calcula-se a força de campo gravitacional, ou peso, usando-se a Equação (2), temos:

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

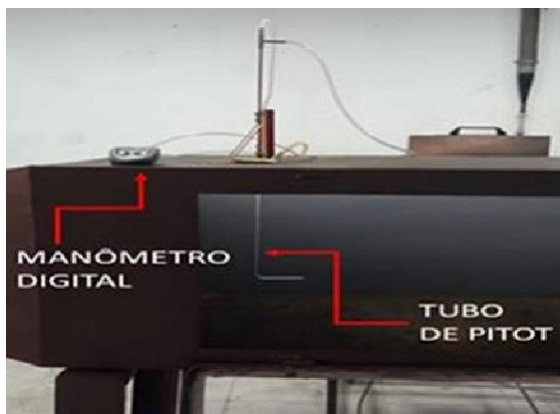
E por último calculou-se a velocidade capaz de arrastar a partícula horizontalmente com as características geométricas e físicas determinadas usando-se a Equação (3):

$$v_a = \sqrt{\frac{2 F_{cg}}{C_d \rho_f A_p}} = \sqrt{\frac{2 * 3,06 * 10^{-10}}{24 * 1,145 * 1,963 * 10^{-9}}} = 0,337 \frac{m}{s} \quad (3)$$

Para validar essas estimativas, testes foram conduzidos utilizando um tubo de Pitot e um manômetro digital, como mostra a Figura 17. A partir dos resultados, foram selecionadas duas velocidades para os ensaios: 0,6 m/s, ligeiramente acima da velocidade de corte calculada, e 1,4 m/s, a velocidade máxima alcançada no túnel. Estudos anteriores, como os de Swanson e Lagefeld (2015) e Fritz *et al.* (2010), analisaram bicos de pulverização em velocidades baixas, especificamente 1m/s, reforçando a viabilidade da metodologia adotada.

Esses testes confirmaram que as velocidades selecionadas são suficientes para transportar as partículas até os pontos de atuação dos bicos sprays, permitindo a avaliação da eficiência do abatimento de poeira. Além disso, futuros estudos poderão focar em ajustes estruturais da bancada para ampliar o intervalo de velocidades testadas.

Figura 17 – Validação da velocidade.



Fonte: Autores (2025)

3.1.4 Determinação do Bicos de pulverização para a elaboração da metodologia

A seleção dos bicos de pulverização para análise de eficiência no abatimento de poeira de minério baseou-se em critérios técnicos e operacionais. Foram escolhidos bicos de cone cheio, cone oco, leque e atomizadores de ar, cada um com características específicas para diferentes necessidades.

Segundo Colinet, Halldin e Schall (2021), bicos de cone cheio geram um padrão de pulverização sólido em forma de cone, sendo amplamente utilizados para umedecer e controlar a geração de poeira em operações industriais. Os bicos de cone oco, por sua vez, produzem um padrão em anel com gotículas menores e maior movimentação do fluxo de ar, otimizando a captura de poeira e reduzindo o risco de entupimento.

Os bicos de leque formam cortinas de água com um padrão linear, sendo eficazes no controle de poeira em espaços confinados, como viradores de vagões e carregadores de navios. Já os atomizadores de ar, que utilizam ar comprimido para atomizar a água, produzem gotículas finas de alta velocidade, sendo indicados para a supressão de poeira respirável.

A pressão operacional influencia diretamente a eficiência dos bicos, pois pressões mais altas geram gotas menores, aumentando a eficácia no abatimento de poeira, especialmente em ambientes controlados. Dessa forma, a seleção dos bicos deve ser otimizada conforme o cenário operacional.

3.1.5 Determinação das métricas de eficiência para a elaboração da metodologia

A eficiência (E) no abatimento de poeira foi determinada por meio de uma equação que avalia a redução da concentração de partículas suspensas no ar antes e depois da pulverização da água pelos bicos de spray. O cálculo se baseia na seguinte Equação (4):

$$E = \frac{C - c}{C} \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo:

C = concentração de partículas suspensas no ar antes da ativação dos bicos de pulverização.

c = corresponde à concentração de partículas medida após a passagem pelo sistema de pulverização.

3.2 Metodologia experimental elaborada para avaliação da eficiência de bicos de spray no abatimento de poeira

Após uma análise criteriosa dos principais parâmetros envolvidos no processo de supressão de poeira, aliada a uma pesquisa bibliográfica e à revisão de estudos experimentais já conduzidos, desenvolveu-se uma metodologia aprimorada que permite medir, de maneira reprodutível e controlada, o desempenho dos bicos no controle de partículas em suspensão, considerando diferentes condições operacionais e variáveis críticas do processo. Para garantir a confiabilidade dos resultados e uma avaliação comparativa eficaz, elaboramos um método experimental capaz de simular condições reais de geração e abatimento de poeira, tal método foi estruturado para proporcionar um ambiente de teste rigorosamente controlado e reprodutível, no qual diferentes bicos podem ser testados sob configurações otimizadas para a análise de sua eficiência.

O roteiro experimental adotado para a realização dos ensaios foi estruturado de forma sistemática e objetiva. Cada etapa do processo foi conduzida com rigor metodológico, assegurando a reprodutibilidade dos testes e a precisão das análises.

a) Preparação do Ambiente

Para garantir a confiabilidade dos resultados, o ambiente de teste deve estar completamente isento de partículas residuais. Assim, adotamos um protocolo rigoroso de limpeza e verificação:

- O túnel de vento, o silo, a válvula guilhotina e a caixa de poeira são aspirados e higienizados para remover qualquer resíduo remanescente.
- Antes do ensaio, realize um teste em vazio para verificar a concentração de partículas MP10 no ambiente. A concentração deve ser inferior a 10 partículas; caso contrário, a limpeza é repetida até atingir essa condição.

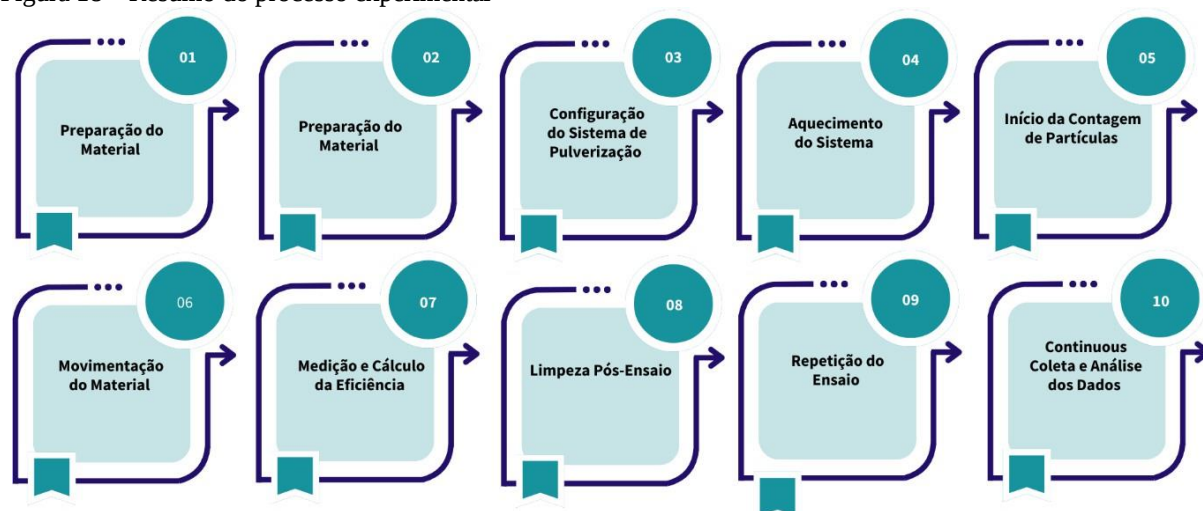
b) Preparação do Material

- Para garantir a padronização das condições experimentais, 2 kg do mineral a ser ensaiado são previamente secos a 110°C por 24 horas antes de serem inseridos no sistema.
- c) Configuração do Sistema de Pulverização
- O reservatório do sistema AutoJet 1550+ é abastecido com água suficiente para permitir a realização de três repetições (triplicata) do ensaio.
 - O sistema de funcionamento é configurado para operar nas especificações especificadas (2 bar, 3 bar e 5 bar), garantindo a avaliação do efeito da pressão sobre a eficiência do abatimento de poeira.
- d) Aquecimento do Sistema
- A resistência do túnel de vento é ativada até que a temperatura interna na entrada da sonda de amostragem atinja pelo menos 170°C, garantindo estabilidade térmica no ambiente de teste.
- e) Execução do Ensaio
- I. Ativação do Sistema de Spray
- O sistema de combustão está ligado para iniciar o abatimento de partículas.
- II. Início da Contagem de Partículas
- A contagem de partículas é iniciada com um atraso de 3 segundos, utilizando um período de medição efetivo de 15 segundos.
- III. Movimentação do Material
- A válvula guilhotina é acionada para liberar o nutriente no túnel de vento, promovendo a dispersão das partículas e permitindo a atuação do spray.
- f) Medição e Cálculo da Eficiência
- A concentração de partículas PM10 é medida antes e após a atuação do spray, registrando a variação da concentração em tempo real.
 - A eficiência do bico de concentração é calculada com base na redução percentual da concentração de poeira, conforme planejado.
- g) Limpeza Pós-Ensaio
- O silo, a válvula guilhotina e a caixa de poeira são higienizados para remoção de qualquer desperdício do minério ensaiado.
 - O ambiente é aspirado novamente para eliminar partículas residuais e evitar interferências em testes subsequentes.
- h) Repetição do Ensaio

- O procedimento é repetido para cada combinação de pressão (2 bar, 3 bar e 5 bar) e velocidade do ar (0,6 m/s e 1,4 m/s), garantindo uma análise abrangente do comportamento do sistema de sobrecarga.
 - Para aumentar a confiabilidade estatística, são realizadas três repetições (triplicata) para cada condição experimental
- i) Coleta e Análise dos Dados
- As concentrações de MP10 antes e após a atuação do spray são registradas para cada ensaio.
 - Os resultados são analisados e comparados para diferentes tensões e velocidades do ar, permitindo uma avaliação detalhada da eficiência de cada bico de esforço testado.

A Figura 18 apresenta uma síntese da metodologia desenvolvida, proporcionando uma visão geral dos principais procedimentos adotados de forma clara e objetiva. Esse resumo permite compreender a estrutura e a sequência das etapas metodológicas de maneira simplificada, facilitando a análise do processo empregado na pesquisa.

Figura 18 – Resumo do processo experimental



Fontes: Autores (2025)

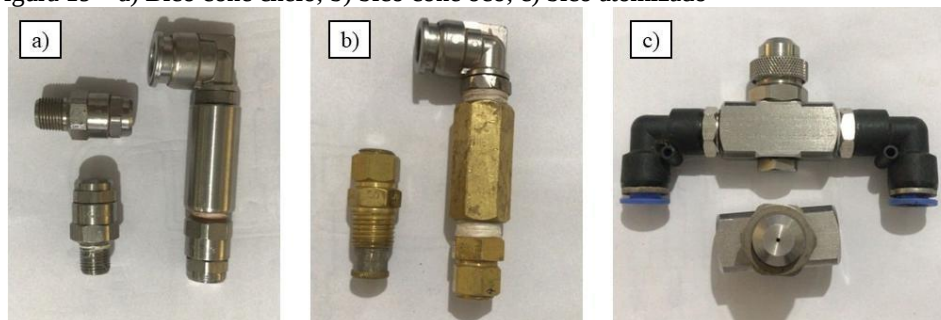
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaios de validação da metodologia

A validação da metodologia proposta baseou-se na análise comparativa de três tipos de bicos de pulverização: Cone Cheio, Cone Oco e Atomizado, apresentados na Figura 19. A seleção desses dispositivos foi baseada na diversidade de padrões de pulverização que cada um

proporciona, permitindo uma avaliação abrangente da eficiência na supressão de poeira em operações de manuseio de minério.

Figura 19 – a) Bico cone cheio; b) bico cone oco; c) bico atomizado



Fonte: Autores (2025)

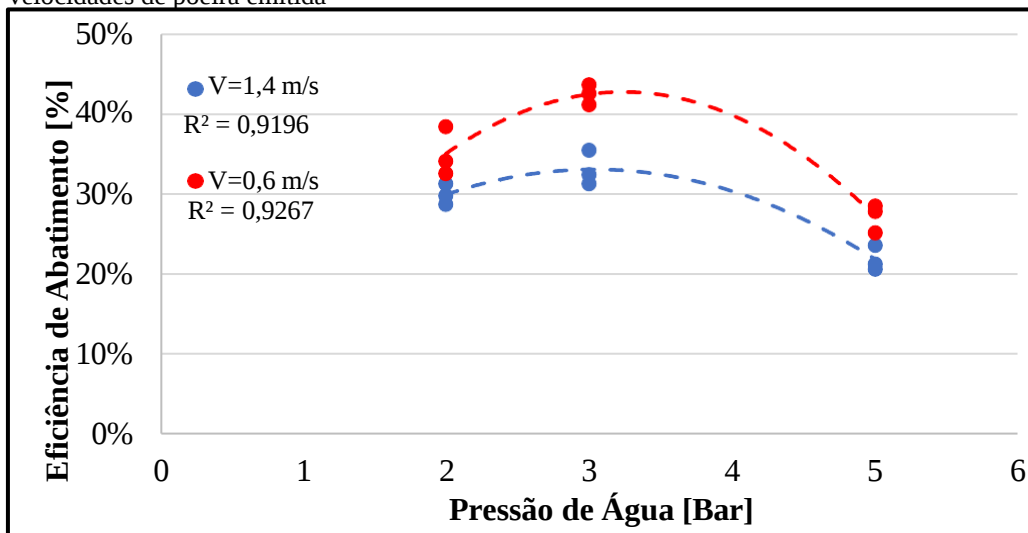
Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados – Fluidpar, em um túnel de vento experimental sob condições controladas, utilizando Pellet Feed como material de teste. Essa abordagem permitiu isolar as variáveis associadas ao processo de pulverização, assegurando que as diferenças observadas entre os bicos decorressem exclusivamente de suas características de atomização e dispersão.

Os experimentos possibilitaram a identificação de variações significativas tanto na eficiência máxima de abatimento quanto na estabilidade do desempenho dos bicos em distintas condições operacionais. Para isso, foram analisadas três faixas de pressão de pulverização, correspondentes a 2 bar, 3 bar e 5 bar, além de duas velocidades de transporte das partículas, de 0,6 m/s e 1,4 m/s. Essa abordagem permitiu avaliar não apenas a capacidade de supressão de poeira de cada bico, mas também a sua eficiência relativa em diferentes regimes operacionais.

4.2 Análise de eficiência do bico cone cheio com a aplicação da metodologia

Na Figura 20, é apresentada a análise comparativa da eficiência de abatimento de poeira de um bico do tipo Cone Cheio, considerando a influência da pressão da água sob duas condições distintas de velocidade de transporte das partículas.

Figura 20 – Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone cheio em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida



Fonte: Autores (2025)

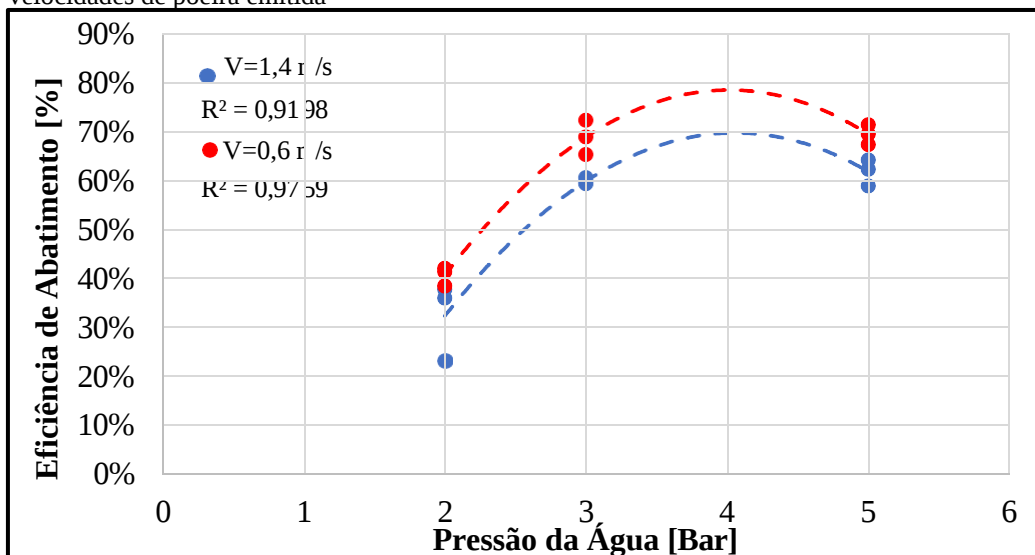
Os resultados indicam que, para uma velocidade de 0,6 m/s, a eficiência de abatimento atinge seu valor máximo em torno de 43%, ocorrendo na faixa de 2 bar. Já para a velocidade de 1,4 m/s, a maior eficiência observada é de aproximadamente 35%, registrada em uma pressão próxima de 3 bar. Nota-se que, em pressões inferiores a 2 bar, a eficiência do abatimento é superior para partículas transportadas a 0,6 m/s. Entretanto, quando a pressão de pulverização ultrapassa 3 bar, a eficiência para partículas em 1,4 m/s começa a decair de forma mais acentuada do que para aquelas em 0,6 m/s, sugerindo que pressões elevadas podem comprometer o desempenho do bico em cenários de maior velocidade de transporte das partículas.

A análise estatística revela que os coeficientes de determinação (R^2) indicam um bom ajuste dos modelos polinomiais de segunda ordem aos dados experimentais ($R^2 > 0,91$), reforçando a confiabilidade das tendências identificadas. Ademais, observa-se que, em nenhuma das condições testadas, a eficiência ultrapassa 50%, o que sugere possíveis restrições operacionais do bico Cone Cheio, sobretudo em situações que envolvem velocidades mais elevadas das partículas e pressões de pulverização mais altas.

4.3 Análise de eficiência do bico cone oco com a aplicação da metodologia

A Figura 21 apresenta a variação da eficiência de abatimento de poeira para um bico do tipo Cone Oco, analisada em função da pressão da água e considerando duas velocidades distintas de transporte das partículas.

Figura 21 – Análise comparativa da eficiência de abatimento do cone oco em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida



Fonte: Autores (2025)

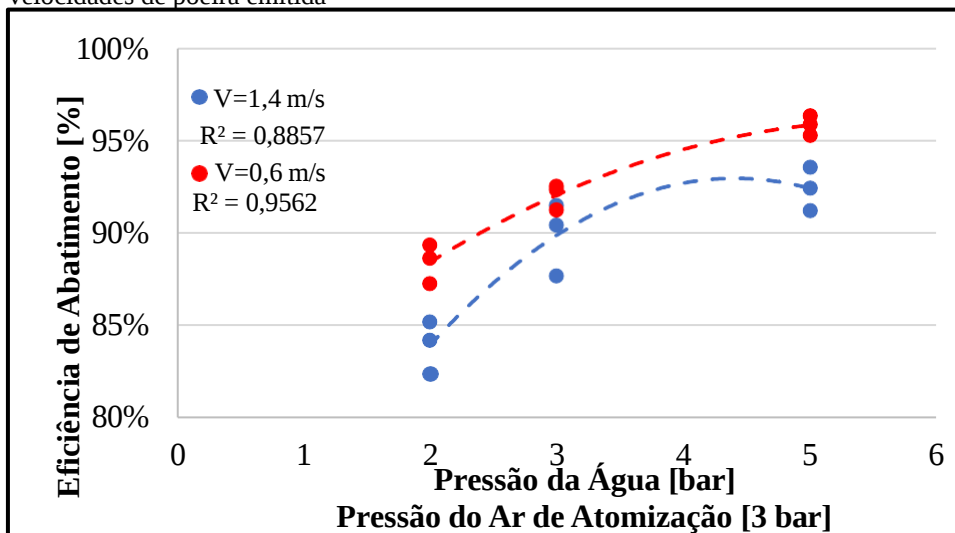
Os resultados indicam que, para uma velocidade de 0,6 m/s, a eficiência de abatimento atinge seu pico máximo de aproximadamente 75% quando a pressão de pulverização é de 2 bar. Já para a velocidade de 1,4 m/s, a eficiência máxima registrada é ligeiramente inferior, em torno de 70%, ocorrendo na mesma faixa de pressão. Apesar de a eficiência ser maior para 0,6 m/s em pressões mais baixas, ambas as velocidades apresentam comportamento semelhante ao longo do experimento. No entanto, quando a pressão supera 3 bar, observa-se que a eficiência para 1,4 m/s sofre uma queda mais acentuada, enquanto para 0,6 m/s a redução é menos significativa, demonstrando maior estabilidade em pressões mais elevadas.

A análise estatística dos dados revela que os coeficientes de determinação (R^2) indicam um bom ajuste dos modelos polinomiais de segunda ordem aos resultados experimentais ($R^2 > 0,91$), conferindo confiabilidade às tendências identificadas. Além disso, comparado ao bico Cone Cheio, o Cone Oco demonstrou desempenho superior, atingindo eficiências máximas de até 75% a 2 bar, sugerindo maior capacidade de captura de partículas em suspensão. Apesar desse alto desempenho em pressões intermediárias, a eficiência do bico diminui com o aumento da pressão, especialmente para velocidades de 1,4 m/s, reforçando a necessidade de otimização dos parâmetros operacionais para diferentes condições de transporte de partículas.

4.4 Análise de eficiência do bico cone atomizado com a aplicação da metodologia

A Figura 22 apresenta a relação entre a eficiência de abatimento de partículas de pellet feed e a pressão da água para o bico atomizador, considerando duas velocidades distintas do fluxo de ar: 1,4 m/s e 0,6 m/s.

Figura 22 – Análise comparativa da eficiência de abatimento do bico atomizado em diferentes pressões a duas velocidades de poeira emitida



Fonte: Autores (2025)

Para a velocidade de 1,4 m/s, a eficiência de abatimento aumenta progressivamente com o acréscimo da pressão da água, atingindo seu máximo de aproximadamente 96% na pressão de 5 bar. No caso da velocidade de 0,6 m/s, observa-se um comportamento semelhante, com a eficiência crescendo à medida que a pressão da água se eleva, porém, apresentando valores ligeiramente superiores àqueles registrados para 1,4 m/s, especialmente para pressões acima de 4 bar.

A análise estatística demonstra que os coeficientes de determinação (R^2) indicam um ajuste polinomial de segunda ordem adequado aos dados experimentais ($R^2 > 0,91$), assegurando um elevado nível de confiança nas tendências identificadas. O bico atomizador destacou-se entre os modelos testados, apresentando a mais alta eficiência de abatimento, alcançando até 96% de redução da poeira a 5 bar de pressão de água e 3,0 bar de pressão de ar atomizador, quando operando com partículas transportadas a 0,6 m/s.

Os resultados do experimento evidenciam que a eficiência do bico atomizador é diretamente influenciada tanto pela pressão da água quanto pela velocidade do ar. Pressões mais elevadas tendem a maximizar a captura de partículas, independentemente da velocidade do ar. No entanto, velocidades menores favorecem o abatimento da poeira, especialmente em pressões

mais baixas. O ajuste polinomial apresenta alta correlação com os dados experimentais ($R^2 > 0,88$ em ambas as condições), reforçando a confiabilidade dos resultados obtidos. Essas informações são fundamentais para a otimização da aplicação de bicos atomizadores em sistemas de controle de poeira, permitindo ajustes mais eficazes conforme as condições operacionais específicas.

4.5 Discussões

No estudo conduzido por Roberts *et al.* (2022), diferentes bicos foram testados em pressões que variaram de 4 a 100 bar, sendo que os modelos de micro-nebulização de alta pressão, como o EnviroMist EM.GIZ.06, apresentaram eficiência superior, atingindo até 83% de abatimento de poeira em condições otimizadas. No entanto, pressões excessivamente elevadas (>100 bar) mostraram-se contraproducentes, dispersando as partículas de água e reduzindo a captura de material particulado. Os bicos de baixa pressão, por sua vez, tiveram desempenho inferior, frequentemente abaixo de 50%, devido à formação de gotas maiores, cuja capacidade de captura de poeira é reduzida.

Os resultados deste estudo corroboram e ampliam esses achados ao demonstrar que a eficiência da supressão de poeira pode ser significativamente aumentada com o uso de bicos atomizadores operando em pressões moderadas. O bico Atomizador analisado atingiu uma taxa de abatimento de 96% a 5 bar, superando o desempenho máximo reportado para os bicos convencionais avaliados por Roberts *et al.* (2022). Esse resultado indica que bicos capazes de gerar microgotículas finas podem proporcionar eficiências comparáveis às obtidas com sistemas de ultra-alta pressão, porém com menor consumo de energia e menor exigência de infraestrutura para operação. Além disso, a análise mostrou que os bicos Cone Cheio e Cone Oco perderam eficiência quando operados a pressões superiores a 3 bar, o que sugere que a dispersão inadequada das gotas pode comprometer a supressão da poeira, reforçando a importância de um controle preciso do tamanho das partículas líquidas pulverizadas.

Outro aspecto relevante abordado tanto no presente estudo quanto no de Roberts *et al.* (2022) é a influência da velocidade do fluxo de poeira na eficiência do abatimento. Eles analisaram velocidades de ar variando entre 2 e 10 m/s e constataram que a eficiência da supressão diminui à medida que a velocidade do fluxo aumenta, especialmente para bicos de gota grossa. Os dados deste estudo confirmam essa tendência, evidenciando que a eficiência dos bicos Cone Cheio e Cone Oco caiu significativamente em velocidades de fluxo de 1,4 m/s, enquanto o bico Atomizador manteve sua eficácia mesmo nesse regime de velocidade. Esse

achado reforça a importância da escolha do bico adequado conforme as condições de ventilação e dinâmica de transporte da poeira em ambientes industriais.

O estudo de Roberts et al. (2022) também destacou a relação entre o tamanho das gotículas e a eficiência da supressão, demonstrando que bicos que geram gotas menores que 50 μm são mais eficazes na captura de poeira suspensa. Os resultados obtidos confirmam essa observação, uma vez que o bico Atomizador, que produz gotas finas e bem dispersas, apresentou desempenho significativamente superior em comparação aos bicos de Cone Cheio e Cone Oco, que formam gotículas maiores e menos eficientes na interação com partículas finas em suspensão. Esse resultado reforça a necessidade de otimização dos sistemas de pulverização para maximizar a dispersão de microgotas e aumentar a eficiência do contato entre as gotas e as partículas de poeira.

O estudo conduzido por Prostański (2013) avaliou a eficácia dos bicos, que operam com uma combinação de ar comprimido e água, e demonstrou que esses dispositivos foram capazes de reduzir a concentração de poeira total entre 74% e 82%, enquanto a poeira respirável foi reduzida entre 80% e 93%, especialmente em mineradores contínuos e pontos de transferência de correias transportadoras. No entanto, os dados obtidos no presente estudo indicam que bicos atomizadores podem atingir ou até mesmo superar essa eficiência sem a necessidade de um sistema de injeção de ar comprimido de alta capacidade. O bico Atomizador, quando operado a 5 bar, apresentou uma taxa de abatimento de 96%, sugerindo que a atomização eficiente da água pode compensar a ausência de ar comprimido, tornando o sistema mais simples e com menor custo operacional.

A relação entre a pressão da água e a eficiência da supressão de poeira também é um aspecto abordado tanto por Prostański (2013) quanto no presente estudo. O autor demonstrou que a pulverização ar-água melhora a atomização e aumenta a interação entre as gotículas de água e as partículas em suspensão, otimizando o abatimento da poeira. Os resultados obtidos corroboram essa relação, mas avançam a análise ao demonstrar que pressões excessivas podem comprometer a eficiência de determinados bicos. Enquanto os bicos estudados por Prostański operaram em pressões de ar em torno de 5 bar e com vazões reduzidas de água (0,1 a 1 dm^3/min), no presente estudo observou-se que os bicos Cone Cheio e Cone Oco perderam eficiência em pressões superiores a 3 bar, devido à dispersão inadequada das gotas, o que reduziu o tempo de contato com as partículas de poeira. Essa constatação indica que a relação entre pressão e eficiência depende do tipo de bico utilizado, sendo essencial considerar as condições operacionais específicas de cada sistema para a definição dos parâmetros mais adequados.

Outro fator relevante discutido por Prostański (2013) e analisado no presente estudo é a influência da velocidade do fluxo de poeira na eficiência do abatimento. O autor identificou que a redução da poeira respirável foi mais expressiva em sistemas onde a velocidade do ar era menor, uma vez que isso favorecia a interação entre as gotículas pulverizadas e as partículas suspensas. Os dados obtidos confirmam essa tendência e quantificam esse impacto em diferentes bicos. Foi constatado que velocidades mais elevadas (1,4 m/s) comprometeram significativamente a eficiência dos bicos Cone Cheio e Cone Oco, enquanto o bico Atomizador manteve sua eficácia mesmo nessas condições. Esse resultado sugere que a escolha do bico pulverizador deve considerar a dinâmica do fluxo de ar e a granulometria da poeira, sendo que sistemas de atomização fina apresentam maior eficiência na captura de partículas em ambientes com maior turbulência.

Os achados do presente estudo também expandem as conclusões de Prostański (2013) ao fornecer uma análise mais detalhada sobre os limites operacionais dos bicos convencionais em comparação com bicos atomizadores. Enquanto o estudo de Prostański demonstrou a superioridade dos bicos ar-água sobre os sistemas de pulverização convencionais, os dados obtidos indicam que bicos atomizadores podem atingir resultados equivalentes ou superiores, sem a necessidade de consumo adicional de ar comprimido. Além disso, Prostański enfatizou que os bicos foram projetados para operar com baixos consumos de água, minimizando desperdícios. No presente estudo, reforça-se a necessidade de ajustar a vazão conforme o tipo de bico e as condições operacionais, garantindo um equilíbrio entre eficiência e sustentabilidade no uso de recursos hídricos.

O estudo conduzido por Liao *et al.* (2019) revisou diversos mecanismos de captura de poeira por meio da pulverização de água, enfatizando que a eficiência desses sistemas depende de fatores como tamanho das gotas, pressão da água, velocidade do fluxo de poeira e condições ambientais.

Em relação ao tamanho das gotas, os autores indicam que bicos que geram gotículas menores que 50 μm apresentam maior eficiência na captura de poeira suspensa, enquanto bicos que produzem gotículas acima de 300 μm são menos eficazes. Essa conclusão teórica foi confirmada experimentalmente no presente estudo, onde o bico Atomizador, responsável pela formação de microgotas, apresentou uma taxa de abatimento de 96% a 5 bar, superando significativamente os bicos Cone Cheio e Cone Oco, cujas eficiências foram limitadas a 43% e 75% a 2 bar, respectivamente. Esses dados fornecem uma confirmação experimental das hipóteses levantadas por Liao *et al.* (2019), reforçando a necessidade de atomização otimizada para maximizar a eficiência da supressão de poeira.

Outro fator analisado por Liao *et al.* (2019) é a influência da pressão da água na eficiência dos bicos pulverizadores. Os autores argumentam que pressões mais altas melhoram a atomização da água, o que, por sua vez, aumenta a área de contato entre gotículas e partículas de poeira. Os resultados do presente estudo complementam essa análise ao demonstrar que a relação entre pressão e eficiência varia conforme o tipo de bico utilizado. Para os bicos Cone Cheio e Cone Oco, pressões acima de 3 bar resultaram em uma redução da eficiência da supressão de poeira, possivelmente devido à dispersão excessiva das gotas e à menor taxa de captura de partículas finas. Em contrapartida, o bico Atomizador manteve alta eficiência mesmo a 5 bar, corroborando a ideia de que bicos projetados para atomização eficiente podem operar com pressões mais elevadas sem comprometer o desempenho.

A influência da velocidade do fluxo de poeira sobre a eficiência da pulverização é outro aspecto discutido por Liao *et al.* (2019). Os autores destacam que velocidades mais altas do ar podem reduzir a eficácia da supressão, pois diminuem o tempo de interação entre as gotículas e as partículas em suspensão. O presente estudo fornece informações mais detalhadas sobre esse fenômeno ao testar a eficiência dos bicos sob velocidades de 0,6 m/s e 1,4 m/s. Os resultados confirmam que, para os bicos Cone Cheio e Cone Oco, a eficiência do abatimento de poeira caiu significativamente em velocidades mais elevadas, evidenciando a dificuldade desses bicos em capturar partículas finas em condições de maior turbulência. Por outro lado, o bico Atomizador manteve uma eficiência elevada mesmo sob maior velocidade do fluxo de poeira, o que reforça a importância da atomização para aumentar a eficácia da captura de partículas em suspensão.

Além disso, os resultados obtidos indicam que a escolha do tipo de bico pulverizador é um fator determinante para otimizar a eficiência da supressão de poeira em diferentes condições operacionais. Enquanto Liao *et al.* (2019) apontam que a falta de diretrizes claras para a escolha de bicos compromete a eficácia dos sistemas de pulverização, os dados obtidos no presente estudo contribuem para a definição de parâmetros mais específicos para a seleção e operação de bicos pulverizadores. A demonstração de que bicos atomizadores podem alcançar alta eficiência com pressões moderadas e em diferentes condições de fluxo de ar representa um avanço prático em relação às discussões apresentadas por Liao *et al.* (2019), fornecendo evidências concretas para a melhoria da aplicação industrial desses sistemas.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo desenvolver uma metodologia para avaliar a eficiência de bicos de pulverização no abatimento da poeira gerada pela mineração. Para isso, foram conduzidos ensaios experimentais em um túnel de vento, possibilitando a análise da influência de diferentes parâmetros operacionais, como pressão de exercício, velocidade do fluxo de ar e tipo de bico utilizado.

Os resultados obtidos evidenciaram que os bicos atomizadores apresentam maior eficiência na supressão de poeira em comparação aos modelos convencionais, especialmente quando operam sob pressão moderada. Além disso, assegura-se que a eficiência do abatimento é fortemente influenciada pela velocidade do fluxo de ar, uma vez que velocidades mais elevadas comprometem a captura das partículas pelos bicos de cone cheio e cone oco. Em contrapartida, os bicos atomizadores apresentaram desempenho estável mesmo sob condições mais adversárias, indicando que a tecnologia de atomização fornece uma distribuição mais uniforme das gotas, favorecendo a coleta das partículas suspensas.

Outro aspecto relevante identificado foi a relação entre pressão e eficiência, que varia de acordo com o tipo de bico analisado. Enquanto o aumento da pressão favoreceu a atomização e a captura de partículas finas pelos bicos atomizadores, os bicos causaram uma queda de desempenho quando a pressão ultrapassou 3 bar, devido à dispersão concentrada das gotas. Esse resultado indica que a escolha do bico e da pressão de concentração deve considerar não apenas a eficiência máxima, mas também a estabilidade operacional, evitando desperdícios e otimizando o uso de recursos hídricos.

Além disso, os ensaios realizados demonstraram que a utilização de túneis de vento é uma metodologia eficaz para avaliar a eficiência dos sistemas de supressão de poeira em condições controladas. Esse tipo de abordagem experimental possibilita a replicação precisa de especificações de dispersão e abatimento, permitindo análises mais ocorridas do comportamento das partículas e das gotas pulverizadas. Assim, os resultados deste estudo podem servir de base para o aprimoramento de práticas industriais, promovendo uma aplicação mais eficiente e sustentável dos sistemas de supressão de poeira.

As descobertas desta pesquisa foram significativamente importantes para o aprimoramento das estratégias de controle da poeira na indústria mineradora, fornecendo diretrizes técnicas para a seleção e operação de sistemas de mineração. A metodologia desenvolvida permite a comparação entre diferentes tecnologias, auxiliando na escolha dos dispositivos mais adequados para cada contexto operacional. Desta forma, os resultados

apresentados não apenas reforçam a importância da utilização de bicos de pulverização na mitigação de poeira, mas também fornecem subsídios para que empresas e profissionais do setor otimizem suas estratégias de controle ambiental e segurança ocupacional.

Por fim, este estudo reforça a necessidade contínua de inovação e desenvolvimento de tecnologias para o controle da poeira na mineração. O avanço de novas metodologias, aliado à aplicação de técnicas experimentais robustas, contribuirá para a implementação de soluções cada vez mais eficazes e sustentáveis, beneficiando não apenas a indústria, mas também o meio ambiente e a qualidade de vida dos trabalhadores e das comunidades próximas às operações mineradoras.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Dentre as possibilidades para trabalhos futuros, destacam-se:

- Ampliação dos ensaios para diferentes tipos de minerais;
- Desenvolvimento de modelos matemáticos preditivos para estimar a eficiência do abatimento de poeira;
- Estudo experimental da eficiência de bicos de spray no abatimento de poeira de minério com diferentes níveis de pressão;
- Explorar a influência da granulometria das partículas de poeira na eficiência dos bicos de mineração;
- Avaliar o impacto da composição química do minério na eficiência dos bicos de mineração;
- Analisar o efeito de aditivos químicos e surfactantes na captura de partículas em suspensão;
- Estudar formas de reduzir o consumo de água nos sistemas de supressão de poeira.

A partir dessas sugestões, a pesquisa pode evoluir para soluções ainda mais eficientes e precisas, beneficiando tanto a mineração quanto outras indústrias que lidam com materiais particulados

REFERÊNCIAS

ABOELEZZ, Ahmed; BELTRAN, Maria; HARGATHER, Michael J.; HASSANALIAN, Mostafa; ROGHANCHI, Pedram. Comprehensive design and performance validation of a wind tunnel for advanced respirable dust deposition investigations. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 478, p. 135516, 2024.

ABUBAKER, Harish; SIVARAM, Anand; MÜNSCH, Manuel; MURCEK, Roman; BOYE, Andre; DELGADO, Antonio. Optimization of design parameters of CIP spray cleaning nozzle using genetic algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTATIONAL ENGINEERING – ICCE, 4., 2017, Darmstadt. **Proceedings [...]**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 1-14.

AZHAR, Nur Anis Liyana; RANI, Siti Ilyani. Experimental study of airborne dust generation during powder free falling. **Acta Mechanica Malaysia**, Malaysia, v. 3, n. 2, p. 37-39, 2020.

CASTRO, Maycon Magalhães; MACHADO, Luís Paulo Silveira; WANZELER, Hemerson da Conceição; LOUZADA, Ryan Luiz Rodrigues; SANTOS, Danilo Silva; MESQUITA, André Luís Amarante; SANTOS JÚNIOR, Ronaldo Menezes dos. Experimento em escala da emissão de material particulado no processo de empilhamento de minério de ferro. **Revista Internacional de Ciências**, [s.l.], v. 12, n. 3, p. 250-268, set. 2022.

COLINET, Jay F.; HALLDIN, Cara N.; SCHALL, Joseph. **Best practices for dust control in coal mining**. 2. ed. Pittsburgh, PA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, 2021.

COOPER, Paul; ARNOLD, Peter C. Air entrainment and dust generation from a falling stream of bulk material. **KONA Powder and Particle Journal**, [s.l.], n. 13, p. 125-134, 1995.

CUNHA, João Paulo A. R. da; TEIXEIRA, Mauri Martins; FERNANDES, Haroldo C. Avaliação do espectro de gotas de pontas de pulverização hidráulicas utilizando a técnica da difração do raio laser. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.esp., p.10-15, jan. 2007.

FASCHINGLEITNER, Johann; HÖFLINGER, Wilhelm. Evaluation of primary and secondary fugitive dust suppression methods using enclosed water spraying systems at bulk solids handling. **Advanced Powder Technology**, [s.l.], v. 22, n. 2, p. 236-244, 2011.

FERRAZ, Paulo Henrique Ribeiro. Material particulado e sua emissão em canteiros de obras: revisão de literatura. **Revista GEAMA – Scientific Journal of Environmental Sciences and Biotechnology**, Recife, v. 6, n. 1, p. 12-24, abr. 2020.

FONTANA, Arthur dos Reis Lemos; SILVA, Artur José Cunha da; PONTES, Luana Silva; MESQUITA, André Luiz Amarante; MARTINS, Márcio Ferreira; SANTOS JÚNIOR, Ronaldo Menezes dos. Wind tunnel study of iron ore dust emissions from stockpile and train wagons. **Journal of Hazardous Materials**, [s.l.], v. 430, p. 134567, 2024.

FONTANA, Arthur dos Reis Lemos. **DESENVOLVIMENTO DE UM APARATO EXPERIMENTAL PARA A AVALIAÇÃO DA EMISSÃO E DE SUPRESSORES DE POEIRA EM VAGÕES E PILHAS**. 2021. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e

Desenvolvimento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2021.

FREITAS, Adriana de Marques; SOLCI, Maria Cristina. Caracterização do MP10 e MP2,5 e distribuição por tamanho de cloreto, nitrato e sulfato em atmosfera urbana e rural de Londrina. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 7, p. 1750-1754, 2009.

FRITZ, Bradley K.; HOFFMANN, W. Clint; BIRCHFIELD, Norman B.; ELLENBERGER, Jay; KHAN, Faruque; BAGLEY, W. E.; THORNBURG, Jonathan W.; HEWITT, Andrew. Evaluation of spray drift using low-speed wind tunnel measurements and dispersion modeling. **Journal of ASTM International**, [s.l.], v. 7, n. 6, p. 102775, 2010.

GABRIEL, Raul Rodolfo Francischetti; BAIO, Fábio Henrique Rojo. Interação entre pressão e tamanho de gota por instrumentação eletrônica em pulverizador pressurizado por CO₂. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [s.l.], v. 43, n. 2, p. 164–169, abr./jun. 2013.

HUGHES, Phil; FERRETT, Ed. **Introduction to health and safety at work: for the NEBOSH National General Certificate in Occupational Health and Safety**. 6. ed. Londres: Routledge, 2016.

IBRAHIMPOUR, Shahab; KHAVANINZADEH, Alireza; TAGHIZADEH MEHRJARDI, Ruhollah; DE BOECK, Hans; GUL, Alvina. Dust-related impacts of mining operations on rangeland vegetation and soil: a case study in Yazd province, Iran. **Environmental Earth Sciences**, [s.l.], v. 80, n. 11, p. 1-16, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7708**: Air quality – Particle size fraction definitions for health-related sampling. Genebra, 1995.

LEFEBVRE, Arthur H. **Atomization and sprays**. 1. ed. Washington, DC: Hemisphere Publishing Corporation, 1988.

LIAO, Rongfu; WYPYCH, Peter W.; PAN, Renhu; HASTIE, David B.; ROBERTS, Jon M. Dust suppression efficiency of spraying systems: a review. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BULK MATERIALS STORAGE, HANDLING AND TRANSPORTATION, Newcastle. **Anais [...]**. Newcastle: University of Newcastle, n 12, p. 408–419, jul. 2019.

MEIRELES, Reinaldo Pimentel Loyola. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE MALHA FERROVIÁRIA EM CIRCUITO FECHADO DA ESTRADA DE FERRO VITÓRIA A MINAS**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2010.

MENDES, Renata Wey Berti. **APROPRIAÇÃO SISTÊMICA DE INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS PARA A PREVENÇÃO: o caso do controle de poeira em mineradoras de granito**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Engenharia de Produção, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

MILANEZ, Bruno. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, Brasília, n. 16, p. 94-101, 2017.

MOHAL, Brij Raj. **ENHANCEMENT OF THE WETTABILITY OF COAL POWDERS USING SURFACTANTS**. 1988. Tese (Doutorado em Processamento Mineral) – Pennsylvania State University, [S.l.], 1988.

OURIQUES, Rafael Zini; BARROSO, Lidiane Bittencourt; WOLFF, Delmira Beatriz. Poeira no ambiente de trabalho e efeitos no organismo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 3., 2012, Bento Gonçalves, RS. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Instituto de Saneamento Ambiental da Universidade de Caxias do Sul, 2012. p. 1-10.

PERECIN, Dilermando; PERESSIN, Valdemir Antonio; MATUO, Tomomassa; BRAZ, Benedito Aparecido; PIO, Luís César. Avaliação do desempenho de bicos para aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 17, n. 1, p. 83–91, abr. 1999.

POLLOCK, Douglas; ORGANISCAK, John. Airborne dust capture and induced airflow of various spray nozzle designs. **Aerosol Science and Technology**, [s.l.], v. 41, n. 7, p. 711-720, 2007.

PORTELLA, Márcio Oliveira. Efeitos colaterais da mineração no meio ambiente. **Revista Brasileira de Políticas Públicas**, Brasília, v. 5, n. 2, p. 263-276, 2015.

PROSTAŃSKI, Dariusz. Use of air-and-water spraying systems for improving dust control in mines. **Journal of Sustainable Mining**, Gliwice, v. 12, n. 2, p. 29–34, 2013.

RIBEIRO, Jackson Roberto Dias; RIBEIRO, Luis Felipe Oliveira; SANTOS, Thales Gomes dos; NUNES, João Guilherme Pereira; RIBEIRO JÚNIOR, Marconi Furtado; VITÓRIA, Edney Leandro da. Espectro de gotas da ponta de pulverização TTI-110025 sob diferentes pressões de trabalho. **Brazilian Journal of Production Engineering**, São Mateus, v. 9, n. 2, p. 161–169, abr./jun. 2023.

ROBERTS, Jon; HASTIE, David; LIAO, Rongfu; WYPYCH, Peter. Evaluation of the performance of water spraying dust suppression technology within the coal mining industry. **Health & Safety Trust Project**, Wollongong, n. 20653, p. 1- 80, Mar. 2022.

ROBERTS, Jon; WYPYCH, Peter. Research into improving the efficiency of water spraying airborne dust control techniques in the iron ore industry. In: IRON ORE CONFERENCE, 2017, Perth. **Proceedings [...]**. Perth: AusiMM, 2017. p. 359-364.

SANTOS JUNIOR, Amaro Agostinho dos. **INSTRUMENTOS FINANCEIROS E INCENTIVOS FISCAIS APLICÁVEIS A PROJETOS DE CONTROLE AMBIENTAL NO SETOR MINERAL**: caso das pedreiras de agregados (brita) da região metropolitana do Recife. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

SANTOS JUNIOR, Ronaldo Menezes dos. **PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POEIRA EM MANUSEIO DE MINÉRIO**. 2018. Dissertação (Mestrado em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2018.

SANTOS, Danilo Silva. **DESENVOLVIMENTO DE TÚNEL DE VENTO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE BICOS DE PULVERIZAÇÃO NO ABATIMENTO DE POEIRA**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Universidade Federal do Pará, Tucuruí, 2024.

SANTOS, Ubiratan de Paula; ARBEX, Marcos Abdo; BRAGA, Alfésio Luis Ferreira; MIZUTANI, Rafael Futoshi; CANÇADO, José Eduardo Delfini; TERRA-FILHO, Mário; CHATKIN, José Miguel. Poluição do ar ambiental: efeitos respiratórios. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, v. 47, n. 1, p. e20200267, jan. 2021.

SARAIVA, Renan Duarte dos Santos; SANTOS, Aline de Souza Espíndola; OLIVEIRA, Ana Paula Natividade de; MAZOTO, Maíra Lopes; CÂMARA, Volney de Magalhães; ASMUS, Carmen Ildes Fróes Rodrigues. Alterações respiratórias em crianças expostas à poeira de resíduos de mineração em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil: Projeto Bruminha. **Cadernos de Saúde Pública**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 2, p. e00131223, 2024.

SILVA, Fredson Pereira da; MOURA, Geraldo Jorge Barbosa de; SANTOS, Carlos Alberto Batista dos. Representações dos moradores do entorno das áreas de exploração sobre a importância e impactos da mineração. **Geosul, Florianópolis**, v. 33, n. 66, p. 128-146, jan./abr. 2018.

SILVA, Jardel de Oliveira da. **CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO NOS ACESSOS DE MINA A CÉU ABERTO**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Minas e Meio Ambiente) – Faculdade de engenharia de minas e meio ambiente, Universidade Federal do Pará, Marabá, 2010.

SPRAYING SYSTEMS CO. Spray technology for dust control: a guide to selecting the optimal spray system for your application. Wheaton, IL: Spraying Systems Co. (Bulletin No. 652A), 2016.

SWANSON, John-Glen; LANGEFELD, Oliver. Fundamental research in water spray systems for dust control. **Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology**, [s.l], v. 124, n. 2, p. 78-82, maio 2015.

TIEN, Jerome C.; KIM, Jin. Respirable coal dust control using surfactants. **Applied Occupational and Environmental Hygiene**, New York, v. 12, n. 12, p. 957-963, dez. 1997.

WANGCHAI, Sathaphon; HASTIE, David Bruce; WYPYCH, Peter William. The simulation of particle flow mechanisms in dustiness testers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BULK MATERIALS STORAGE, HANDLING AND TRANSPORTATION, 11., 2013, Austrália. **Proceedings** [...] Newcastle: University of Newcastle, 2013. p. 1-10.

WANGCHAI, Sathaphon; HASTIE, David Bruce; WYPYCH, Peter William. The investigation of particle flow mechanisms of bulk materials in dustiness testers. **Particulate Science and Technology**, Australia, v. 33, n. 4, p. 377-387, jul. 2015.

XU, Guang; CHEN, Yinping; EKSTEEN, Jacques; XU, Jialin. Surfactant-aided coal dust suppression: A review of evaluation methods and influencing factors. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 639, p. 1060-1076, ago. 2018.