



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

PABLO DIEGO DIDONÉ

**EMISSÃO DE POEIRA EM VIAS NÃO PAVIMENTADAS NA MINERAÇÃO:
AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO E ASPECTOS CORPORATIVOS.**

Tucuruí - PA

2026

PABLO DIEGO DIDONÉ

**EMISSÃO DE POEIRA EM VIAS NÃO PAVIMENTADAS NA MINERAÇÃO:
AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO E ASPECTOS CORPORATIVOS.**

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

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Tucuruí, PA
2026

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)

D557e Didoné, Pablo Diego.
Emissão de poeira em vias não pavimentadas na
mineração: avaliação em laboratório e aspectos corporativos
/ Pablo Diego Didoné. — 2026.
xxi, 124 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2026.

1. Poeira fugitiva. 2. Vias não pavimentadas. 3.
Velocidade de atrito. 4. Supressor de poeira. 5.
Mineração. I. Título.

CDD 338.927

PABLO DIEGO DIDONÉ


**EMISSÃO DE POEIRA EM VIAS NÃO PAVIMENTADAS NA MINERAÇÃO:
AVALIAÇÃO EM LABORATÓRIO E ASPECTOS CORPORATIVOS.**

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


Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Aprovada em 03 de fevereiro de 2026.


BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA**
Data: 13/02/2026 11:46:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Doutor / André Luiz Amarante Mesquita / PPGINDE/UFPA - Orientador

Documento assinado digitalmente
 **MACIEL DA COSTA FURTADO**
Data: 13/02/2026 15:04:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Doutor / Maciel da Costa Furtado / PPGINDE/UFPA, Membro

Documento assinado digitalmente
 **MARCIO FERREIRA MARTINS**
Data: 13/02/2026 15:19:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor / Marcio Ferreira Martins / PPGEM/UFES, Membro

Documento assinado digitalmente
 **RAMON SILVA MARTINS**
Data: 13/02/2026 16:43:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutor / Ramon Silva Martins / PPGEM/UFES, Membro

Documento assinado digitalmente
 **MARISA BEZERRA DE MELLO MONTE**
Data: 13/02/2026 17:53:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutora / Marisa Bezerra de Mello Monte / CETEM, Membro

Dedico esta pesquisa à minha esposa Fabiane, à minha filha Catherine e aos nossos cães: Salomão, Covid21 (*in memoriam*), Lila (*in memoriam*) e Skye.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos colegas André Luiz Amarante Mesquita, Arthur Fontana, Johnattan Amorim, Alex Jhefferson Cunha Lopes e Danilo Silva Santos por terem contribuído de forma substancial para essa pesquisa.

“Poucos percebem que a beleza de um romântico pôr do sol africano é resultado da dispersão da luz solar por partículas suspensas no ar. Esta beleza pode ser admirável à distância, mas mais perto da fonte, as partículas de poeira podem ser a causa de sujeira significativa, danos à propriedade, perda de produção e impactos adversos na saúde (Dana, 1969 apud BURGER, 2010, p. 194)”.

RESUMO

A erosão causada pela ação do vento tem efeitos positivos e negativos. A poeira do Saara fornece nutrientes aos solos amazônicos. Em contrapartida, a erosão de vias de mineração, degradadas pelo intenso tráfego de veículos pesados, gera poeira que pode ser transportada pelo vento, afetando a saúde e o bem-estar de funcionários e de comunidades próximas. A água é amplamente utilizada no controle de poeira, mas apresenta baixa eficiência quando aplicada isoladamente. Aditivos (por exemplo, biopolímeros) podem ser alternativas eficazes sob as perspectivas econômicas e ambientais, mas exigem compreensão das características das vias e das propriedades do produto. Este estudo revisou a emissão e o controle de poeira em vias não pavimentadas, projetou um mecanismo para simular a degradação da via e desenvolveu uma metodologia para medir as emissões em laboratório, visando avaliar a eficiência dos supressores. Os resultados indicaram que o aumento da eficiência hídrica por meio do uso de supressores pode contribuir para racionalizar o consumo hídrico na supressão de poeira, particularmente em períodos de menor pluviometria, quando a emissão tende a se intensificar. As reduções nas emissões (em termos de concentração média) foram de 73 % (ajuste da concentração) e 86 % (ajuste da dosagem), quando comparadas às emissões em solos sem aplicação de supressor. Adicionalmente, a adoção da metodologia proposta permitiu substituir a aplicação empírica de água por ciclos de umectação calibrados com base em parâmetros de laboratório, com potencial para reduzir custos operacionais e melhorar as condições de visibilidade e segurança das vias não pavimentadas. O material particulado é uma preocupação ambiental, social e econômica; deve ser integrado às estratégias de ESG (*Environmental, Social and Governance*) das mineradoras, relacionando a gestão de poeira a indicadores como a qualidade do ar, o uso de água, o engajamento de *stakeholders* e a conformidade legal. Essa abordagem pode ajudar empresas de mineração a equilibrar saúde, bem-estar, relacionamento comunitário e sustentabilidade, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

Palavras-chave: Mineração. Supressor de poeira. Vias não pavimentadas. Poeira fugitiva. Umidade do solo. Velocidade de atrito.

ABSTRACT

Wind erosion has both positive and negative effects. Saharan dust provides nutrients to Amazonian soils, but erosion from degraded roads in mining operations generates wind-borne dust, affecting the health and well-being of employees and nearby communities. Water is used to control dust, but it is inefficient, especially during the dry season due to cost and scarcity. Additives such as biopolymers are effective, economical, and environmentally sustainable alternatives, requiring an understanding of road characteristics and suppressant properties. This study reviewed dust emission and control on unpaved roads, designed a mechanism to simulate road degradation, and developed a methodology for measuring dust emissions to evaluate suppressant efficiency. The results indicated that increasing water efficiency through the use of suppressants can help rationalize water consumption for dust suppression, particularly during periods of lower rainfall, when emissions tend to intensify. Reductions in emissions (average concentration) were 73 % (concentration adjustment) and 86 % (dosage adjustment) when compared to emissions from soils without suppressant application. Additionally, the adoption of the proposed methodology enabled the replacement of empirical water application with wetting cycles calibrated to laboratory parameters, with the potential to reduce operational costs and improve visibility and safety on unpaved roads. Particulate matter is an environmental, social, and economic concern; it must be integrated into mining companies' ESG strategies, linking dust management to indicators such as air quality, water use, stakeholder engagement, and compliance. This approach helps mining companies balance health, well-being, relationships, and sustainability, aligning with the UN Sustainable Development Goals.

Keywords: Mining. Dust suppressant. Unpaved roads. Fugitive dust. Soil moisture. Friction velocity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Nuvem de poeira proveniente da África sobre o Oceano Atlântico. Fonte: Adaptado de NASA (2000).....	22
Figura 2.1 - Estados das pontes de líquido: a) pendular; b) funicular; c) capilar; d) polpa. Fonte: Adaptado de Chen <i>et al.</i> (2020).....	27
Figura 2.2 - Ponte de líquido entre duas partículas de diâmetros iguais. Fonte: Adaptado de Mitarai e Nori (2006).	28
Figura 2.3 - Granulometrias típicas dos solos. Fonte: Adaptado de Shao (2009) e Hinds (2012).....	31
Figura 2.4 - Comparação entre o tamanho de partículas e o de um fio de cabelo humano. Fonte: Adaptado de U.S. EPA (2023).....	32
Figura 2.5 - Perfil logarítmico de velocidade. Fonte: Adaptado de Shao (2009).	34
Figura 2.6 - Métodos físico-químicos de supressão de poeira por meio de via úmida. Fonte: Adaptado de Zhang <i>et al.</i> (2022).....	38
Figura 2.7 - Métodos químicos de supressão de poeira. Fonte: Adaptado de Zhang <i>et al.</i> (2022).	38
Figura 2.8 - Estágios do mecanismo de supressão baseado na propriedade higroscópica. Fonte: Adaptado de Parvej <i>et al.</i> (2021).....	39
Figura 2.9 - Redução da tensão superficial por meio de surfactante. Fonte: Adaptado de Li <i>et al.</i> (2021).	40
Figura 2.10 - Efeito da concentração de surfactante e do pH. Fonte: Adaptado de Liu <i>et al.</i> (2016).	41
Figura 2.11 - Superfície de proteção formada pelo supressor do tipo ligante. Fonte: Adaptado de Dong <i>et al.</i> (2023).	41
Figura 2.12 - Processo de aglomeração como método de supressão de poeira. Fonte: Adaptado de Parvej <i>et al.</i> (2021).....	42
Figura 2.13 - Separação em duas fases. Fonte: Yates <i>et al.</i> (2005).	43
Figura 2.14 - Métodos físicos de supressão de poeira. Fonte: Adaptado de Zhang <i>et al.</i> (2022).	44
Figura 2.15 - Penetração do MP no sistema respiratório em função do diâmetro equivalente. Fonte: Adaptado de Vincent (2025).	46
Figura 2.16 - Mecanismo de emissão de poeira. Fonte: Adaptado de Shao (2009)..	51
Figura 2.17 - Mecanismos de movimento e transporte de partículas. Fonte: Adaptado	

de Shao (2009).....	52
Figura 2.18 - Formação, abastecimento de reservatórios e emissão de poeira em vias não pavimentadas. Fonte: Adaptado de Barnes e Connor (2014).	54
Figura 4.1 - Metodologia proposta para a quantificação das emissões e a avaliação da eficiência dos supressores	77
Figura 4.2 - Balança para medição de tensão superficial. Fonte: Adaptado de Reis <i>et al.</i> (2015).	83
Figura 4.3 - Configuração do ensaio de 11 pontos para determinação do pH inicial.	83
Figura 4.4 - Ensaio de emissão de poeira em tubo de ensaio na etapa 1.....	84
Figura 4.5 - Emissão de poeira em tubo de ensaio na etapa 2.	85
Figura 4.6 - Emissão de poeira em tubo de ensaio na etapa 3.	85
Figura 4.7 - Aparato experimental para ensaio em tubo de poeira.....	86
Figura 4.8 - Esquema de preparação dos corpos de prova.	86
Figura 4.9 - Aparelho de Proctor.	88
Figura 4.10 - Equipamento e esquema de compactação do corpo de prova.	89
Figura 4.11 - Mecanismo de degradação do corpo de prova.	90
Figura 4.12 - Dimensões da bandeja de testes e rodas do mecanismo degradador.	90
Figura 4.13 - Esquema de construção do modelo de impressão das rodas do mecanismo degradador.....	91
Figura 4.14 - Mecanismo de degradação instalado na seção de testes do túnel de vento.	91
Figura 4.15 - Túnel de vento do laboratório FluidPar. Fonte: Adaptado de Menezes <i>et al.</i> (2015).	92
Figura 4.16 - Partes principais do túnel de vento. Fonte: Adaptado de Fontana (2021).	92
Figura 4.17 - Esquema de medição do perfil de velocidades na seção de testes do túnel de vento.....	93
Figura 4.18 - Pontos de medição do perfil de velocidades.....	94
Figura 4.19 - Perfil de velocidades do túnel de vento para $U = 20$ m/s.	95
Figura 4.20 - Perfil de velocidades com eixo das ordenadas em escala \log_{10}	95
Figura 4.21 - Campo de velocidades com alturas $\log z$ plotados em escala decimal.	96
Figura 4.22 - Diagrama do contador de partículas. Fonte: Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2009).	97

Figura 4.23 - Tubo de <i>Pitot</i> e contador de partículas instalados na seção de testes do túnel de vento.....	97
Figura 4.24 - Δt_a e Δt_R para cálculo da concentração média da emissão.....	98
Figura 4.25 - Emissão de PM_{10} em função do tempo em escala decimal.	100
Figura 4.26 - Emissão de PM_{10} em função do tempo em escala logarítmica.	100
Figura 5.1 - Metodologia geral para avaliação ESG.....	103
Figura 5.2 - Fluxo típico de um processo genérico de mineração em mina de céu aberto.	104
Figura 5.3 - Esquema para identificação da dupla materialidade. Fonte: Adaptado de GRI (2024).....	105
Figura 5.4 - Matriz de dupla materialidade para análise dos temas materiais (eixo x: pontuação do impacto socioambiental, eixo y: pontuação do impacto financeiro). .	109
Figura 6.1 - Curva granulométrica obtida por peneiramento conforme ABNT 7181 (2025).....	111
Figura 6.2 - Curva granulométrica obtida por difração laser, equipamento Mastersizer 3000, Malvern Panalytical.	111
Figura 6.3 - Tensão superficial do supressor em função da concentração.	112
Figura 6.4 - Curva dos resultados dos ensaios dos 11 pontos.....	113
Figura 6.5 - Triplicata dos ensaios de sedimentação em função do pH. a) 10 minutos de ensaio; b) 24 horas de ensaio.	113
Figura 6.6 - Resultado do ensaio de emissão de poeira da etapa 1, com pH da água variando entre 5 e 9, sem supressor.	114
Figura 6.7 - Resultado do ensaio de emissão de poeira da etapa 2, com $pH^* = 6$ como valor central, e com C_{ws} variando entre 1 e 5 %.	114
Figura 6.8 – Resultado do ensaio de emissão de poeira da etapa 3, para $C_{ws}^* = 3\%$, com variação do pH.	115
Figura 6.9 - Ensaio de degradação e emissão, sem supressor, variando a velocidade do vento, com $\omega = 5\%$: a) amostra degradada; b) amostra após ensaio de emissão.	116
Figura 6.10 - Ensaio de degradação e emissão para $\omega = 5\%$, variando C_{ws} : a) amostra degradada; b) amostra após ensaio de emissão.....	117
Figura 6.11 - Ensaio de degradação e emissão para $\omega = 5\%$, variando d: a) amostra degradada; b) amostra após ensaio de emissão.....	118
Figura 6.12 - Perfil de velocidades do vento para $\omega = 3\%$ e $\omega = 5\%$, sem aplicação	

de supressor.....	119
Figura 6.13 - Velocidade de atrito em função da umidade, para $U = 16$ m/s, sem supressor.....	120
Figura 6.14 - Concentrações médias de emissões de poeira em função da umidade (3, 5 e 7 %), para $U = 16$ m/s, sem supressor.....	121
Figura 6.15 - Velocidade de atrito (u^*) em função de u , para diferentes velocidades de vento U ($\omega = 5$ %, $C_{ws} = 3$ %, $d = 1,75$ L/m ²).....	121
Figura 6.16 - Velocidades de atrito em função da dosagem, para $U = 16$ m/s e $\omega = 5$ %.....	122
Figura 6.17 - Velocidades de atrito em função de C_{ws} , para $U = 16$ m/s e $\omega = 5$ %.....	122
Figura 6.18 - Velocidades de atrito em função da: a) ω ; b) C_{ws} ; e c) d . Para $U = 16$ m/s.....	123
Figura 6.19 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 3$ %, variando U , sem supressor. 123	
Figura 6.20 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5$ %, variando U , sem supressor. 124	
Figura 6.21 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5$ %; $C_{ws} = 3$ %; $d = 1,75$ L/m ² , variando U	125
Figura 6.22 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5$ %; $C_{ws} = 3$ %, $U = 16$ m/s; variando d	126
Figura 6.23 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5$ %, $d = 1,75$ L/m ² ; $U = 16$ m/s; variando C_{ws}	126
Figura 6.24 - Concentrações médias de emissões de poeira em função da u^* ($C_{ws} = 3$ %; $d = 1,75$ L/m ²).....	127
Figura 6.25 - Concentrações médias de emissões de poeira variando d e C_{ws} . $U = 16$ m/s; $\omega = 5$ %.....	128
Figura 6.26 - Reduções percentuais de emissões (concentração média) em relação ao cenário sem supressor.....	129
Figura 6.27 - Matriz de dupla materialidade e seus impactos materiais analisados.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de poluentes, fontes e seus impactos na saúde. Fonte: Adaptado de Brito <i>et al.</i> (2018).....	45
Tabela 2.2 - Diretrizes para os limites máximos de poluentes do tipo MP. Fonte: Adaptado de WHO (2006; 2021); CONAMA (2024); EUROPEAN PARLIAMENT (2024).....	47
Tabela 2.3 - Níveis de qualidade do ar (IQAr) definidos pelo Ministério do Meio Ambiente. Fonte: Adaptado de MMA (2025).	49
Tabela 2.4 - Principais características e diferenças entre os <i>frameworks</i> para comunicar e reportar ESG. Fonte: Adaptado de Richter <i>et al.</i> (2025).	57
Tabela 4.1 - Configurações dos ensaios realizados em túnel de vento.	78
Tabela 4.2 - Massa de amostra necessária para análise granulométrica. Fonte: Adaptado de ABNT 6457 (2024).	79
Tabela 4.3 - Equações para o cálculo da incerteza experimental.	101
Tabela 5.1 - Temas materiais abordados pelas principais normas e padrões de relatórios de ESG.	106
Tabela 5.2 - Combinação de indicadores por tipo de impacto. Adaptado de GRI (2024).	107
Tabela 5.3 - Descrição das severidades de cada indicador. Adaptado de GRI (2024).	107
Tabela 5.4 - Critérios para definição da existência de materialidade.	109
Tabela 6.1 – Cálculo da massa específica aparente de referência.	115
Tabela 6.2 - Massa seca e de água para 4,12 % de umidade.	116
Tabela 6.3 - Resultados dos ensaios de emissão, u^* e incertezas de medição.	130
Tabela 6.4 - Valores máximos das incertezas dos valores do campo de velocidades u	130
Tabela 6.5 - IQAr para diferentes cenários de supressão ($U = 16$ m/s, $\omega = 3$ e 5 %).	131
Tabela 6.6 - Variação da concentração ($d = 1,75$ L/m ²).	132
Tabela 6.7 - Variação da dosagem ($C_{ws} = 3$ %).	132
Tabela 6.8 - Tema material: comunidades locais e relações comunitárias.	134
Tabela 6.9 - Tema material: emissões de MP e gestão do ar.	136
Tabela 6.10 - Tema material: gestão e disponibilidade de água para a supressão de	

poeira.	137
Tabela 6.11 - Tema material: mudanças climáticas e resiliência climática.	138
Tabela 6.12 - Pontuações dos impactos socioambientais e financeiros que compuseram a matriz de materialidade da Figura 6.27.	138
Tabela 6.13 - Indicadores e métricas.	140

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ANA	Agência Nacional de Águas.
AP	Poluição do Ar (Air Pollution).
AQG	Diretrizes para a Qualidade do Ar (Air Quality Guidelines).
CAA	Lei do Ar Limpo (Clean Air Act).
CCM	Gerenciamento de Controle Crítico (Critical Control Management).
CEO	Diretor Executivo (Chief Executive Officer).
CLA	Camada Limite Atmosférica.
CMA	Acetato de cálcio e magnésio.
CMC	Concentração Micelar Crítica.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
CS	Com Supressor.
CVM	Comissão de Valores Mobiliários.
DPOC	Doença Pulmonar Obstrutiva Crônica.
EPA	Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency).
EPI	Equipamento de Proteção Individual.
ESG	Meio ambiente, Social e Governança (Environmental, Social, and Governance).
EUA	Estados Unidos da América.
FABLAB	Laboratório de Fabricação Digital.
IBGC	Instituto Brasileiro de Governança Corporativa.
IFC	Corporação Financeira Internacional (International Finance Corporation).
IQAr	Índice de Qualidade do Ar.
ISO	Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization).
LME	Limite Máximo de Exposição.
LO	Licença Operacional.
LSO	Licença Social de Operação.
MMA	Ministério do Meio Ambiente.
MP	Material particulado.
MPF	Proctor Fagerberg Modificado.
NASA	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (National Aeronautics and Space Administration).
NDAE	Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia.
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.
OMS	Organização Mundial da Saúde.
PF	Padrão Final.
PI	Padrão Intermediário.
PIB	Produto Interno Bruto.
PIC	Ponto Isoelétrico de Carga.
PM	Material Particulado (Particulate Matter).
PTS	Partículas totais em suspensão.
PVA	Poli(Álcool Vinílico).
SS	Sem Supressor.
TOMS	Espectrômetro Mapeador de Ozônio Total (Total Ozone Mapping Spectrometer).
UFPA	Universidade Federal do Pará.

UR Umidade Relativa.

WEAM Modelo de Investigação de Erosão do Vento (Wind Erosion Assessment Model).

LISTA DE SÍMBOLOS

\hat{y}_i	Valores ajustados da função y.
Δt_a	Intervalo de medição da amostragem.
Δt_R	Tempo de referência de medição.
Δt	Intervalo total de medição.
A_N	Efeito das forças de coesão interparticulares.
C_a	Concentração do ensaio “a”.
C_b	Concentração do ensaio “b”.
C_{ea}	Concentrações da emissão de poeira do ensaio “a”.
C_{eb}	Concentrações da emissão de poeira do ensaio “b”.
C_{fin}	Concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida.
C_{ini}	Concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida.
C_o	Número de coesão, parâmetro adimensional.
$C_{p\Delta t}$	Concentração de partículas no intervalo Δt .
C_{ws}	Concentração de supressor.
d_a	Diâmetro de arraste.
D_A	Diâmetro aerodinâmico ou equivalente.
d_{ap}	Diâmetro da área projetada.
d_f	Diâmetro de Feret.
d_{max}	Diâmetro máximo.
d_{min}	Diâmetro mínimo.
d_p	Diâmetro de perímetro.
D_p	Diâmetro da partícula.
d_{ql}	Diâmetro de queda livre.
d_s	Diâmetro de superfície.
d_{sed}	Diâmetro de sedimentação.
d_{st}	Diâmetro de Stokes.
d_v	Diâmetro de volume.
e_i	Resíduo do ajuste da reta tangente aos dados experimentais.
F_{cp}	Força de coesão capilar.
I_{fin}	Índice correspondente à concentração final da faixa.
I_{ini}	Índice correspondente à concentração inicial da faixa.
m_0	Massa inicial.
M_1	Massa do picnômetro vazio.
M_2	Massa do picnômetro, mais a massa da amostra.
M_3	Massa do picnômetro, mais massa da amostra, mais a massa da água.
M_4	Massa do picnômetro mais a massa de água.
M_a	Massa de água.
M_R	Massa retida na peneira.
M_s	Massa seca.
m_T	Massa total da bandeja de testes.
$m_{tp\Delta t}$	Massa total de partículas no intervalo Δt .
M_u	Massa úmida.
M_u	Massa de material úmido.
N_a	Número de entradas de medição.
N_s	Número de indicadores de severidade aplicáveis.
N_{tp}	Número total de partículas.

P_a	Pressão exercida pelo ar.
P_{atm}	Pressão atmosférica.
P_g	Peso da partícula.
P_l	Pressão exercida pelo líquido.
PM_x	Material particulado com diâmetro equivalente a x.
P_R	Porcentagem retida na peneira.
Q_c	Vazão volumétrica da bomba do contador.
r_1	Curvatura do menisco na interface com o ar.
r_2	Curvatura do menisco na interface com a partícula esférica.
Re_t	Número de Reynolds da velocidade terminal da partícula.
s_e	Erro padrão residual.
T_{amb}	Temperatura ambiente.
U	Velocidade do vento.
u	Campo de velocidades medido.
u^*	Velocidade de atrito.
u_{*t}	Velocidade de atrito limite.
$V_{a\Delta t}$	Volume de ar aspirado pela bomba do contador no intervalo Δt .
V_b	Volume da bandeja de testes.
V_c	Volume do cilindro.
V_p	volume de uma partícula de diâmetro PM_x .
z_0	Altura de rugosidade aerodinâmica da superfície.
γ^*, λ, k^*	Parâmetros de ajuste adimensionais.
γ_l	Tensão superficial do líquido.
η_e	Taxa de erosão eólica.
η_s	Eficiência de supressão de poeira
ρ_a	Massa específica aparente.
ρ_p	Massa específica real da partícula.
ρ_r	Massa específica real.
ρ_{re}	Massa específica de referência.
ρ_{su}	Massa específica do supressor.
τ_M	Tensão cisalhante viscosa.
τ_R	Tensão cisalhante de Reynolds.
ω'	Umidade adsorvida.
ω_{cr}	Umidade crítica.
ω_l	Umidade limite.
ω_m	Umidade medida.
ΔP	Diferença de pressão.
A	Inclinação da reta tangente.
C	Concentração medida do poluente.
d	Dosagem de supressor.
g	Aceleração da gravidade.
m	Massa total da amostra.
MTS	Massa total seca da amostra.
V	Volume total da amostra.
z	Altura acima da superfície de teste.
α	Constante geométrica.
$\delta\Delta P$	Incerteza de medição do manômetro digital.
δA	Incerteza de medição da inclinação da reta tangente.
Δm	Variação da massa durante a erosão eólica.

κ	Constante de von Kármán.
ρ	Massa específica.
τ	Tensão de cisalhamento.
ω	Umidade de referência.
δM_u	Incerteza na medição de massa com a balança.
δM_s	
δT_{amb}	Incerteza de medição do termômetro digital.
ϵ	Coeficiente empírico de ajuste.

SUMÁRIO

1. Introdução.....	21
1.1. Considerações iniciais	21
1.2. Justificativas	22
1.3. Objetivos.....	25
1.4. Estrutura da dissertação.....	26
2. Fundamentação teórica.....	27
2.1. Pontes de líquidos e tensão superficial	27
2.2. Definição de material particulado e poeira.....	29
2.3. Propriedades físicas de interesse das partículas	30
2.4. Supressores de poeira.....	37
2.5. Impacto do material particulado na saúde e no meio ambiente.....	44
2.6. Legislação sobre poluição atmosférica.....	46
2.7. Erosão eólica e emissão de poeira.....	49
2.8. Ponto Isoelétrico de Carga (PIC).....	53
2.9. Mecanismos físicos da emissão de poeira	53
2.10. Meio Ambiente, Social e Governança (ESG).....	55
2.11. Incerteza experimental.....	58
3. Revisão Bibliográfica.....	59
3.1. Emissão de poeira	59
3.2. ESG aplicado à gestão de material particulado.....	72
4. Metodologia para avaliação da emissão de poeira em laboratório	77
4.1. Descrição geral da metodologia	77
4.2. Caracterização do solo da via	79
4.3. Avaliação das características do supressor.....	82
4.4. Ponto Isoelétrico de Carga (PIC).....	83
4.5. Preparação dos corpos de prova.....	86
4.6. Ensaio em túnel de vento	91
5. Metodologia ESG	103
5.1. Descrição geral da metodologia	103
6. Análise dos resultados e discussões.....	111

6.1. Ensaio Experimentais	111
6.2. Avaliação ESG	133
7. Considerações finais	141
REFERÊNCIAS.....	144
APÊNDICE A - Incertezas experimentais.....	164
APÊNDICE B - Resultados da análise de dupla materialidade: impactos socioambientais	166
APÊNDICE C - Resultados análise de dupla materialidade: impactos financeiros	168

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A poluição associada ao processo produtivo na indústria de mineração está sujeita às disposições da Lei nº 9.605/1998 (art. 54) (BRASIL, 1998). A lei estabelece que causar poluição de qualquer natureza, em níveis prejudiciais à saúde humana ou que impactem negativamente a fauna e a flora, pode acarretar pena de reclusão de um a quatro anos e/ou multa.

A emissão de material particulado (MP) na atmosfera, na forma de poeira, pode ocorrer por fenômenos naturais e/ou antropogênicos (SOBRINHO *et al.*, 2026). A ação dos ventos é um fenômeno natural, geológico e climático e, quando remove partículas do solo, denomina-se erosão eólica (*wind erosion*) (SHAO, 2009). Ocorre principalmente em desertos, regiões áridas e solos degradados, sendo responsável pela formação e movimentação dos mares de areia (*sand seas*) e pelo transporte de material particulado dos continentes para os oceanos (KNIPPERTZ e STUUT, 2014; WANG *et al.*, 2022).

Como exemplo das grandes movimentações de material particulado que podem ocorrer, a Figura 1.1 apresenta uma imagem de satélite de uma tempestade de poeira sobre o Oceano Atlântico em 26 de fevereiro de 2000, que ejetou a poeira do Deserto do Saara a 5.000 m de altitude e a transportou para fora do continente africano.

As nuvens de poeira vindas do continente africano, que atingem a região amazônica no Brasil, são exemplos de que o material particulado proveniente de fontes naturais também pode trazer benefícios (WANG *et al.*, 2023). Segundo a NASA (2000), esse tipo de fenômeno natural tem um impacto positivo significativo nos ecossistemas do Atlântico tropical, ajudando a fertilizar os solos da floresta amazônica e fornecendo nutrientes minerais ao fitoplâncton do oceano.

Diversos autores indicam que a maior contribuição para a carga total de material particulado na atmosfera é proveniente de fontes naturais, como a citada acima. Por exemplo, Muhs *et al.* (2014) identificaram, com base em imagens geradas pelo TOMS (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) e por outros sensores embarcados em satélites orbitais, que cerca de 75 % das áreas geradoras de poeira ao redor do mundo são de fontes naturais, e não antropogênicas.

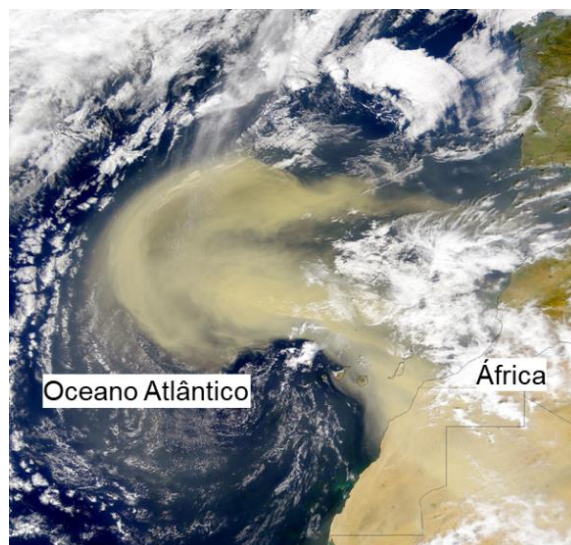


Figura 1.1 - Nuvem de poeira proveniente da África sobre o Oceano Atlântico. Fonte: Adaptado de NASA (2000).

Por outro lado, apesar de a maioria dos estudos indicar que a carga de material particulado na atmosfera seja predominantemente proveniente de fontes naturais, as atividades humanas provocam profundas perturbações no solo natural. O desmatamento excessivo, o sobrepastoreio e as práticas agrícolas inadequadas resultaram na intensa degradação dos solos, aumentando a frequência e intensidade dos efeitos da erosão eólica em diversas partes do mundo (SHAO, 2009).

Nesse contexto, surge a contribuição das fontes antropogênicas para a carga de poeira atmosférica. A exemplo dessa contribuição, temos a emissão de poeira decorrente do tráfego de veículos pesados em vias não pavimentadas (KOUIMTZIS e SAMARA, 1995). Além da erosão eólica, os efeitos dos veículos em trânsito contribuem significativamente para os níveis de poeira na atmosfera local e, eventualmente, regional (ENGELBRECHT e DERBYSHIRE, 2010; KNIPPERTZ e STUUT, 2014).

1.2. Justificativas

Entre as atividades antropogênicas que podem prejudicar a qualidade do ar, destacam-se a mineração e o processamento mineral no estado do Pará (Brasil), atividades industriais essenciais à sociedade contemporânea (ALI *et al.*, 2017). Para entender a relação entre a região de maior atividade minerária do Brasil e as emissões de material particulado em forma de poeira, é importante considerar as características

do clima local e regional.

O estado do Pará, situado na Amazônia Oriental, possui clima equatorial quente e úmido, cuja principal característica é a acentuada sazonalidade pluviométrica (INMET, 2025), com duas estações bem definidas: uma chuvosa e outra seca (INPE, 2025).

A estação chuvosa (inverno amazônico) ocorre tipicamente entre dezembro e maio, com pluviometria que pode superar 3.000 mm e umidade relativa do ar frequentemente acima de 90 % (HERDIES *et al.*, 2025). A estação seca (verão amazônico), que se estende de junho a novembro, caracteriza-se pela drástica redução das chuvas e pela maior incidência de radiação solar (INMET, 2025; SEMAS, 2025). A combinação de baixa umidade relativa do ar e altas taxas de evaporação resseca a camada superficial do solo em vias não pavimentadas (comuns como vias de acesso às áreas de lavra), aumentando a emissão de poeira, oriunda principalmente da movimentação de grandes veículos durante as operações de remoção e transporte de minério (GONZALEZ *et al.*, 2019).

Essa emissão de poeira pode resultar em consequências adversas, incluindo perda de produto mineral, contaminação do ar, impactos à saúde pública e ocupacional, aumento dos riscos durante o tráfego de veículos devido à visibilidade reduzida e conflitos com comunidades locais (SMARIK *et al.*, 2019; STALLWORTH *et al.*, 2020; PARVEJ *et al.*, 2021).

As mineradoras tentam reduzir o impacto causado pela emissão de poeira proveniente das pilhas de minério, dos processos de carga e descarga e, principalmente, de vias não pavimentadas, utilizando a água como agente supressor.

A umidade é a forma mais comum e natural de suprimir poeira. Por isso, a água é utilizada em grandes quantidades para reduzir as emissões em vias, o que contrasta com o fato de que, quando mais se precisa do recurso hídrico, na estação seca, é justamente quando ele se encontra em maior escassez. Nesse cenário emerge um conflito intrínseco: o recurso vital para mitigar o impacto ambiental é, ele mesmo, finito e escasso, exigindo uma gestão rigorosa e sustentável que promova a viabilidade e a perenidade do negócio de mineração.

Uma das formas de aumentar a eficiência da água como agente supressor de poeira e racionalizar seu consumo é a adição de agentes químicos supressores, formando uma solução aquosa. Soluções inovadoras, como a utilização de biopolímeros misturados à água, vêm ganhando espaço no dia a dia das operações

de mineração devido à sua eficiência, economia e sustentabilidade (DONG *et al.*, 2023).

Apesar dos avanços recentes (ZHANG *et al.*, 2022; DONG *et al.*, 2023; SIEGER *et al.*, 2023), novos estudos quantitativos sobre emissões de poeira em vias não pavimentadas que determinem com rigor a eficiência dos supressores e os parâmetros de aplicação (forma de aplicação, concentração (C_{ws}) e dosagem (d)), especialmente em corredores de mineração com intenso tráfego de veículos, irão complementar a literatura já existente.

Além da caracterização físico-química dos supressores, é indispensável a caracterização geotécnica e granulométrica do material que compõe o solo da via, para o ajuste adequado dos parâmetros de uso dos supressores e para a correta determinação dos fatores de emissão de poeira (U.S. EPA, 2006; YAN *et al.*, 2025).

Existem regulamentações nacionais e internacionais sobre os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos em fontes geradoras, porém, são limitadas a fontes fixas pontuais específicas (chaminés e dutos) e não cobrem as emissões fugitivas em vias não pavimentadas e outras fontes difusas de poeira. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 382/2006 estabelece os limites máximos de emissão (LME) de poluentes atmosféricos, incluindo o material particulado para fontes fixas. A Resolução CONAMA nº 491/2018 estabelece padrões de qualidade do ar, com valores máximos de material particulado, sem tratar diretamente os aspectos de LME nas fontes, sejam elas difusas ou não (CONAMA, 2018).

No contexto internacional, a EPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) disponibiliza metodologias de estimativa de emissões de material particulado por meio do AP-42, Seção 13.2.2 (*Compilation of Air Pollutant Emission Factors*), que servem de guia para estimar fatores de emissão em vias não pavimentadas e não constituem padrões regulamentares obrigatórios de limites máximos de emissão (U.S. EPA, 2006).

Desta forma, há uma lacuna na regulamentação nacional e internacional quanto aos limites de emissão de poeira pelas fontes geradoras, particularmente pelas fontes difusas. Esta lacuna leva os reguladores e as empresas a dependerem de padrões de qualidade do ar como mecanismo indireto de controle, medindo concentrações de poluentes em áreas com potencial de impacto sobre população, fauna e flora, em vez de regular as quantidades máximas permissíveis.

A gestão de material particulado não se trata apenas de um desafio

operacional em uma mineradora, mas deve fazer parte da rotina de suas operações, integrando-se às políticas de gestão da qualidade do ar, da gestão dos riscos hídricos e da estratégia de sustentabilidade corporativa, traduzida nos pilares do ESG (*Environmental, Social and Governance*) (BICHUETI *et al.*, 2014). A divulgação dos relatórios de sustentabilidade empresarial é uma exigência crescente dos *stakeholders*, que buscam maior transparência e engajamento das empresas em temas ambientais, sociais e de governança (KPMG, 2023).

Para instituições financeiras, há obrigatoriedade de implementar políticas e de ampliar a divulgação de informações sobre riscos sociais, ambientais e climáticos desde 2022 (BCB, 2025). Entretanto, ainda não é obrigatório, para todas as empresas de capital aberto do Brasil, divulgar o relatório ESG, mas passará a ser a partir do encerramento do exercício social de 2026, alinhado aos padrões da ISSB/IFRS S1 e S2 (*International Financial Reporting Standards/International Sustainability Standards Board*) definidos pela CVM (Comissão de Valores Mobiliários) e pelo Ministério da Fazenda (IBGC, 2024).

A questão central recai sobre como realizar a gestão eficiente dos poluentes atmosféricos na indústria de mineração, integrar os *stakeholders* e divulgar, de forma transparente, as informações relevantes sobre o tema, utilizando os relatórios oficiais de sustentabilidade e atendendo às exigências normativas.

1.3. Objetivos

Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar os procedimentos de quantificação da supressão de poeira em vias não pavimentadas e propor a incorporação da gestão da poeira à estratégia de sustentabilidade da empresa, alinhada aos pilares do ESG.

Objetivos específicos

- a) Construir e aplicar um mecanismo que simula em laboratório a degradação do solo de vias não pavimentadas;
- b) desenvolver uma metodologia de avaliação da emissão de particulado em laboratório com utilização de túnel de vento;
- c) desenvolver uma metodologia de avaliação da eficiência de supressores

- de poeira em vias não pavimentadas; e
- d) propor um modelo de integração entre a gestão de poeira e o ESG.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em sete capítulos, seguidos de três apêndices. O capítulo de introdução (Capítulo 1) apresenta ao leitor o contexto da emissão de poeira e a importância do estudo desse tema para a saúde, o meio ambiente e a sustentabilidade empresarial.

No Capítulo 2, apresenta-se o embasamento teórico da pesquisa, discutindo-se os principais aspectos da emissão de poeira, os mecanismos físicos envolvidos, as formas de supressão e, por fim, os conceitos de ESG.

O Capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica que proporciona o entendimento do fenômeno de emissão de poeira, dos principais modelos desenvolvidos e das metodologias empregadas no seu estudo. Traz estudos sobre a emissão de poeira em vias não pavimentadas, com e sem degradação do solo. No final do capítulo, são revisados trabalhos que abordam a emissão de poeira no ESG.

O Capítulo 4 é dedicado ao estudo, em laboratório, da emissão de poeira em vias não pavimentadas. São descritos a metodologia geral empregada, bem como os procedimentos de preparação das amostras, de ensaio e de compilação dos resultados. É apresentada uma breve descrição do mecanismo que simula as rodas de um veículo, degradando o solo e gerando depósitos de material particulado. Os efeitos da umidade e do uso de supressores sobre a emissão de particulados são estudados.

O Capítulo 5 apresenta uma proposta de incorporação da gestão do material particulado em vias não pavimentadas no contexto de ESG na indústria de mineração, sob o olhar das materialidades e dos impactos associados ao tema, com base nos resultados da metodologia desenvolvida no Capítulo 4.

O Capítulo 6 discute os resultados obtidos nos ensaios. A eficiência dos supressores é analisada, e as emissões em vias sem supressor (SS) são comparadas. Também se discute a influência da concentração e da dosagem dos supressores de poeira. Ao final do capítulo, discute-se o modelo proposto de integração da gestão de material particulado de uma mineradora ao contexto do ESG.

O Capítulo 7 apresenta considerações finais, recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Pontes de líquidos e tensão superficial

O fenômeno das pontes de líquidos é uma manifestação específica das forças capilares, pois a força que mantém as superfícies unidas é resultado direto das mesmas interações físicas envolvidas na capilaridade: tensão superficial e adesão (PIERRAT e CARAM, 1997).

À medida que pequenas quantidades de líquido entram em um meio granular, formam-se pontes líquidas (meniscos) entre as partículas, gerando forças coesivas, principalmente por efeitos de tensão superficial e de capilaridade. Com o aumento do teor de líquido, estas forças tendem a crescer até certo grau (Figura 2.1) e, ao atingir o regime de polpa (Figura 2.1-d), o líquido passa a ser contínuo e a pressão do líquido torna-se igual ou superior à do ar, fazendo com que as forças coesivas por pontes líquidas deixem de atuar de forma relevante no sistema.

Para definir as forças de ponte de líquido entre partículas, deve-se considerar o regime em que se encontra o meio granular, que pode ser pendular, funicular ou capilar, conforme ilustrado na Figura 2.1 (URSO *et al.*, 1999).

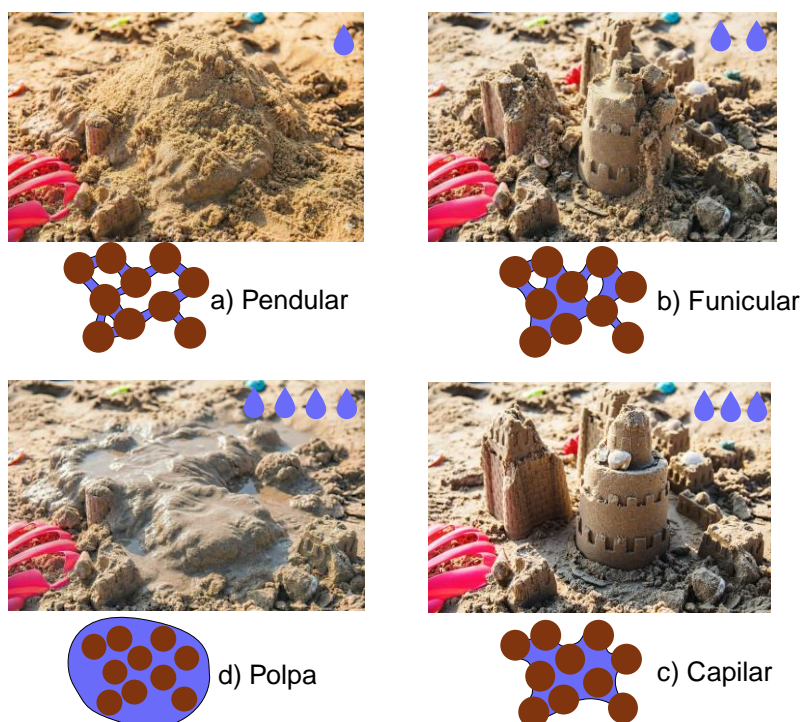


Figura 2.1 - Estados das pontes de líquido: a) pendular; b) funicular; c) capilar; d) polpa. Fonte: Adaptado de Chen *et al.* (2020).

Quando um menisco líquido se forma entre duas superfícies (Figura 2.2), surgem forças de coesão entre elas. As forças capilares geralmente são as mais relevantes (KOOS, 2014).

A expressão para a força de coesão capilar entre duas esferas de mesmo tamanho conectadas por uma ponte de líquido do tipo pendular é dada pela Equação 2.1, sendo a soma das forças da tensão superficial e da pressão capilar:

$$F_{cp} = 2 \cdot \pi \cdot r_2 \cdot \gamma_l + \pi \cdot r_2^2 \cdot \Delta P \quad 2.1$$

Onde: r_2 é a curvatura do menisco na interface com a partícula esférica; γ_l é a tensão superficial do líquido condensado, agindo em uma unidade de comprimento; e ΔP é a diferença de pressão entre o líquido e o ar.

A diferença de pressão entre a pressão exercida pelo líquido (P_l) e a pressão exercida pelo ar (P_a) em um menisco de raios r_1 e r_2 é dada pela Equação 2.2:

$$\Delta P = P_a - P_l = \gamma_l \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad 2.2$$

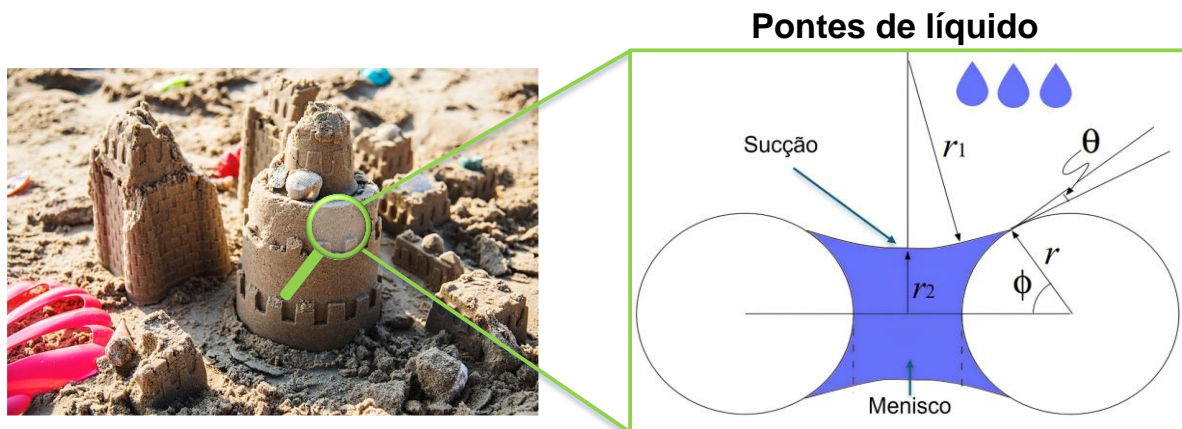


Figura 2.2 - Ponte de líquido entre duas partículas de diâmetros iguais. Fonte: Adaptado de Mitarai e Nori (2006).

A tensão superficial (γ_l) é o efeito que ocorre na camada superficial de um líquido, com comportamento similar a uma membrana elástica, representada pela interface líquido-ar da ponte de líquido. O efeito da concavidade resulta da sucção capilar no menisco, devido às diferenças de pressão (MITARAI e NORI, 2006). Na ausência de umidade entre as partículas, prevalecem as forças de van der Waals.

2.2. Definição de material particulado e poeira

Material Particulado é o termo usado para designar toda matéria em suspensão no ar que não é gás, podendo constituir uma mistura de partículas sólidas e gotículas de água. Quando disperso no ar, o MP pode formar aerossóis (sistemas coloidais em que a fase dispersora é gasosa e a fase dispersa é sólida ou líquida). O termo aerossol é, por vezes, usado como sinônimo de MP (U.S. EPA, 1999; VALLERO, 2014; VDI, 2015). O MP é usualmente representado pela abreviação da expressão em inglês *Particulate Matter* (PM) seguida de um índice subscrito que indica o diâmetro equivalente: PM_x.

Poeira é um poluente atmosférico primário, classificado como material particulado, emitido por fontes estacionárias ou móveis, difusas ou contidas. São partículas sólidas que podem ser facilmente suspensas pela ação do vento (KOK *et al.*, 2012). A poeira pode se formar pela desintegração física de materiais particulados ou de agregados maiores, por ação mecânica (por exemplo, atrito, demolição, movimentação de materiais, interação roda-solo, britagem e peneiramento de minérios) (KULKARNI, 2011; GUPTA e GOKHALE, 2025). As poeiras possuem tamanhos que variam de nanômetros a mais de 100 µm (Figura 2.3) e geralmente apresentam forma irregular (HINDS, 2012).

As poeiras podem entrar em suspensão e permanecer por longos períodos ou retornar rapidamente ao solo por deposição gravitacional. Na lista abaixo são apresentados alguns exemplos dos tipos de poeiras mais comuns que podem ser encontrados na atmosfera (WHO, 1999):

- a) Poeiras minerais, como aquelas que contêm sílica cristalina livre (quartzo), carvão e poeiras de cimentos;
- b) poeiras metálicas, como poeiras de níquel, cádmio, e berílio;
- c) poeiras químicas, como aquelas formadas por material a granel e pesticidas;
- d) poeiras orgânicas e vegetais, como poeiras de madeira, algodão, pólen; e
- e) poeiras com risco biológico, como as oriundas de esporos e de fungos.

A poeira também pode ser designada como poeira fugitiva quando não é lançada na atmosfera por meio de escoamento confinado, como, por exemplo, em uma chaminé. Essas emissões também podem ser classificadas como provenientes

de fontes difusas de MP. Além de vias não pavimentadas, as operações da indústria de construção pesada, as atividades de preparo do solo na agricultura e o manejo de pilhas de materiais agregados são fontes comuns de poeira fugitiva/difusa (U.S. EPA, 1995a; DENBY *et al.*, 2018; U.S. EPA, 2020).

2.3. Propriedades físicas de interesse das partículas

Tamanho das partículas e granulometria

Existem diversas definições de diâmetro equivalente na literatura: diâmetro de sedimentação (d_{sed}), diâmetro de arraste (d_a), diâmetro de superfície (d_s), diâmetro de área projetada (d_{ap}), diâmetro de Feret (d_F), diâmetro mínimo (d_{min}), diâmetro de queda livre (d_{ql}), diâmetro de Stokes (d_{St}), diâmetro máximo ($d_{máx}$) e diâmetro de volume (d_v) (KULKARNI, 2011).

O diâmetro aerodinâmico equivalente, ou diâmetro aerodinâmico (D_A), depende do tamanho, da densidade e do formato da partícula e está relacionado às suas propriedades inerciais. É definido como sendo o diâmetro de uma esfera de massa específica unitária ($\rho_p = 1 \text{ g/cm}^3$ ou 1.000 kg/m^3), que tem a mesma velocidade terminal de sedimentação da partícula em estudo.

O D_A é útil para descrever o comportamento de partículas maiores que $0,5 \mu\text{m}$ em meios onde o comportamento inercial predomina. Já partículas extremamente pequenas (nanômetros) são influenciadas pelo movimento Browniano, tornando irrelevante o diâmetro aerodinâmico. Nesses casos, utiliza-se o diâmetro equivalente elétrico de mobilidade, que corresponde ao tamanho de uma partícula esférica com a mesma mobilidade sob uma força externa unitária (KIREŠOVÁ e GUZAN, 2022), ou o diâmetro difusivo, que é o diâmetro de uma partícula com o mesmo coeficiente de difusão da partícula estudada (KULKARNI, 2011).

As partículas do solo, medidas diretamente ou indiretamente, variam de 2 mm a menos de $0,1 \mu\text{m}$. De forma simplificada, as partículas do solo podem ser classificadas em quatro categorias: argila, silte, areia e cascalho (Figura 2.3).

As partículas de poeira, em condições naturais, são encontradas envolvendo grãos de areia em solos arenosos ou agregados em solos argilosos.

Partículas totais em suspensão (PTS), que derivam do termo em inglês *Total Suspended Particles (TSP)*, são formadas por material emitido na forma de sólido, líquido ou vapor, mas que existe na atmosfera em forma de partículas sólidas ou

líquidas (U.S. EPA, 1995b). O PTS é a soma da massa de todas as partículas sólidas e líquidas presentes na atmosfera de um determinado volume amostrado e, por isso, abrange uma ampla faixa de tamanhos de partículas, incluindo frações $PM_{2,5}$ e PM_{10} e até partículas maiores, de até $100\ \mu m$. A definição e o limite de tamanho de PTS podem variar ligeiramente conforme as normas regulatórias ou os padrões de medição (CONAMA, 2024).

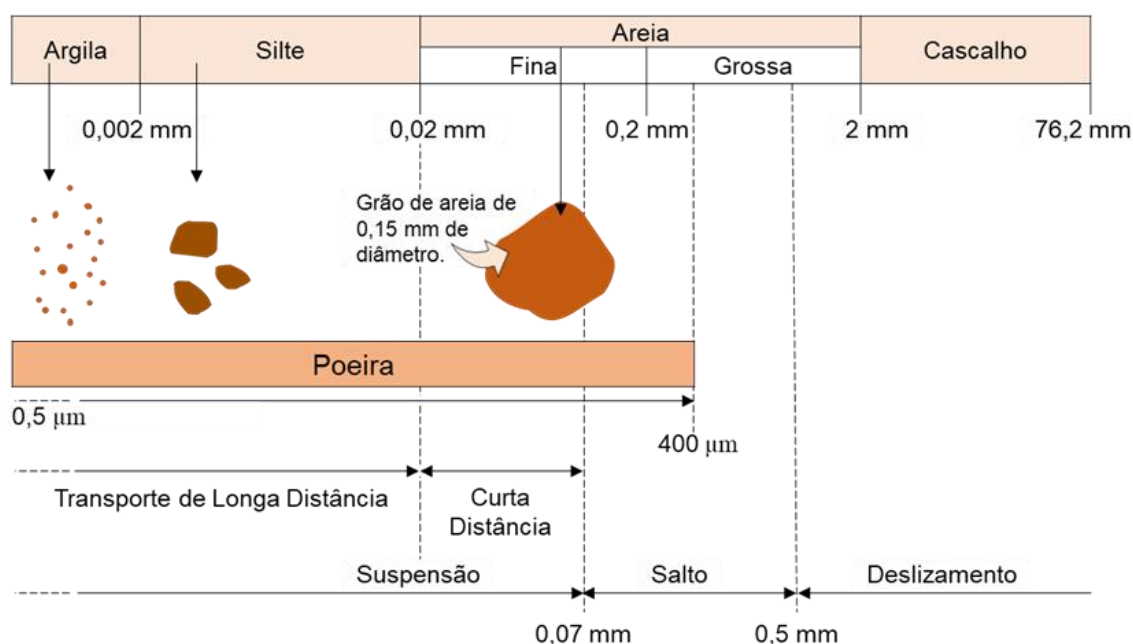


Figura 2.3 - Granulometrias típicas dos solos. Fonte: Adaptado de Shao (2009) e Hinds (2012).

Material particulado com diâmetro maior que $2,5\ \mu m$ e menor ou igual a $10\ \mu m$ denomina-se MP grosso (fração grossa), representado por PM_{10} . O MP com diâmetro menor ou igual a $2,5\ \mu m$ é representado por $PM_{2,5}$ e denomina-se MP fino ou fração fina (U.S. EPA, 2023). Em alguns esquemas de definição do tamanho de particulado, considera-se o diâmetro da partícula menor que $0,1\ \mu m$ ($PM_{0,1}$) como sendo uma fração ultrafina (KNIPPERTZ e STUUT, 2014; WHO, 2021). Para fins de comparação (Figura 2.4), a média do diâmetro de um fio de cabelo humano é de $70\ \mu m$, o que é 30 vezes maior do que o $PM_{2,5}$ (U.S. EPA, 2023).

A distribuição granulométrica de partículas é a descrição quantitativa dos tamanhos das partículas em uma amostra, indicando a distribuição em diferentes faixas de diâmetro. O peneiramento mecânico é o principal método para separar partículas por tamanho, ainda que apresente limitações em se tratando de particulado

superfino (SAMPAIO *et al.*, 2007). O peneiramento pode ser seco ou úmido, e o procedimento é normalizado pela ABNT 7181 (2025).

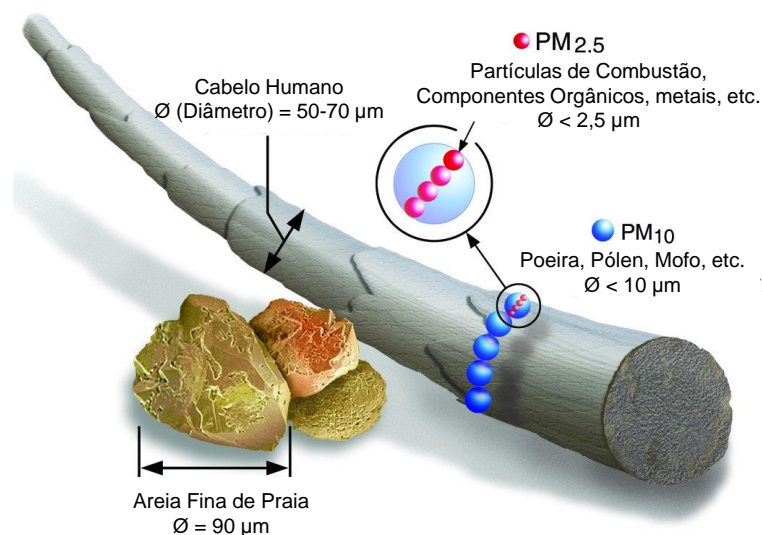


Figura 2.4 - Comparação entre o tamanho de partículas e o de um fio de cabelo humano. Fonte: Adaptado de U.S. EPA (2023).

As amostras devem ser secas em estufas para evitar o efeito da umidade no peneiramento, pois amostras úmidas podem se aglomerar e mascarar os resultados dos ensaios. Para a realização dos ensaios, são utilizadas peneiras padronizadas. Uma série de peneiras amplamente utilizada no Brasil é a série *Tyler*, com base em uma peneira de 200 malhas por polegada (200 *mesh*) e abertura de 0,074 mm. Quando se troca de uma peneira para a imediatamente superior (200 *mesh* para 150 *mesh*), a abertura é multiplicada pela raiz quadrada de dois, obtendo-se a abertura de 0,104 mm, por exemplo (GONZAGA *et al.*, 2021).

As peneiras padronizadas encaixam-se umas às outras, formando uma coluna de peneiramento. Na base, está posicionada uma peneira "cega", destinada a receber as partículas menores que atravessaram toda a coluna, sem serem retidas. Após a realização do ensaio no agitador mecânico, as quantidades retidas são pesadas e as frações retidas são calculadas.

Massa específica aparente e massa específica real

A massa específica (ρ) é calculada pela razão entre a massa total da amostra (m) e o volume total (V). A massa específica pode ser expressa de duas formas: (a) massa específica real ou relativa (ρ_r); e (b) massa específica aparente (ρ_a). A massa

específica real não considera o espaço vazio entre os grãos da amostra, portanto, considera apenas o volume destes. A massa específica aparente considera o volume total da amostra, incluindo os espaços vazios.

Umidade Limite e Umidade Crítica

A umidade do solo é um dos fatores mais importantes que limitam a erosão pelo vento e, conseqüentemente, a emissão de poeira. Na grande maioria dos casos, o aumento do percentual de umidade resulta na diminuição da erosão causada pelo vento e, conseqüentemente, da emissão de poeira (CHEPIL, 1956; WEINAN *et al.*, 1996).

A umidade crítica (ω_{cr}) e a umidade limite (ω_l) são dois conceitos muito importantes relativos à supressão de poeira. Por meio desses, é possível entender como os níveis de umidade influenciam o potencial de um solo para gerar poeira. A umidade limite refere-se ao teor de umidade (limite superior) a partir do qual não é mais possível observar níveis significativos de emissão de poeira (FUNK *et al.*, 2008; AIMAR *et al.*, 2012; DE ORO *et al.*, 2019).

Camada limite atmosférica e velocidade de atrito

A camada atmosférica terrestre é dividida em troposfera, estratosfera, mesosfera e termosfera. A Camada Limite Atmosférica (CLA) é a camada mais baixa da atmosfera. É nessa camada que o escoamento do ar é diretamente afetado pelo atrito com a superfície da Terra (solo, vegetação, obstáculos) e pelas trocas atmosfera-superfície de quantidade de movimento (*momentum*), energia e massa, em escalas de tempo inferiores a um dia (SHAO, 2009).

A Lei de von Kármán (também conhecida como Lei Logarítmica da Parede) é a equação-chave para modelar o perfil vertical da velocidade do vento na camada superficial da CLA. Na camada de superfície, acima de uma superfície lisa ou rugosa, onde a tensão de cisalhamento é aproximadamente constante em relação à altura, o perfil de velocidade do vento (U) obedece à Lei von Kármán (Equação 2.3):

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad 2.3$$

Onde: κ refere-se à constante de von Kármán (adimensional = 0,4); z a altura

acima da superfície; e z_0 é a altura de rugosidade aerodinâmica da superfície.

A altura de rugosidade aerodinâmica é um parâmetro que representa a capacidade de uma superfície de absorver fluxo de momento descendente; ou seja, para uma altura fixa z , se houver incremento de z_0 , u^* , irá aumentar proporcionalmente (Figura 2.5). Quanto mais áspera a superfície, mais o vento é desacelerado e mais difícil é atingir a velocidade de atrito necessária para que a erosão ocorra (U.S. EPA, 2020).

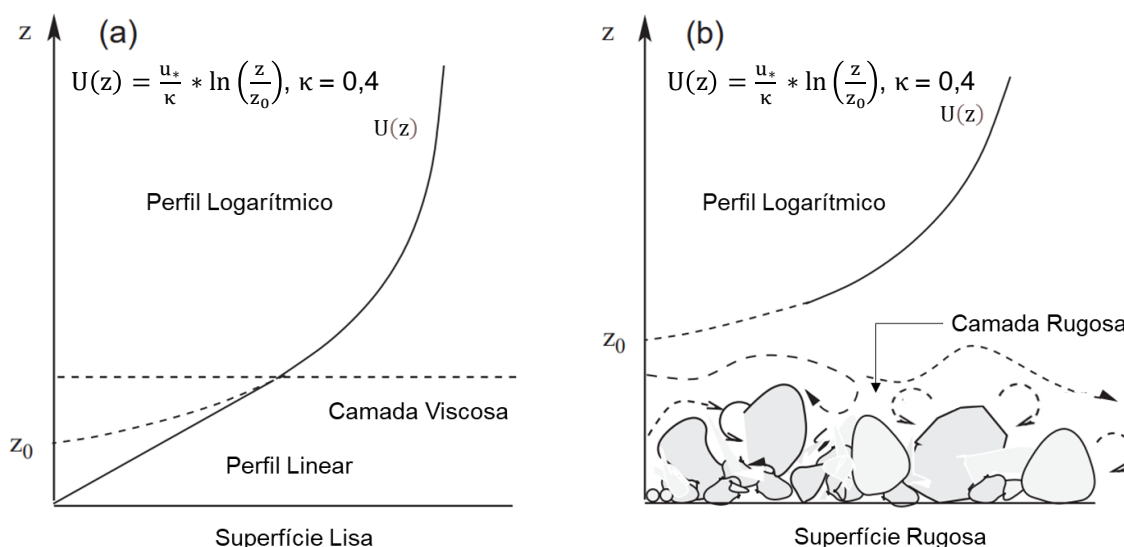


Figura 2.5 - Perfil logarítmico de velocidade. Fonte: Adaptado de Shao (2009).

O equilíbrio entre a intensidade do vento e a resistência que o solo oferece é influenciado por diversos fatores ambientais: clima, tipo de solo (arenoso ou argiloso), umidade, compactação, condições microscópicas da superfície e a cobertura vegetal (plantas ajudam a segurar o solo). As condições macroscópicas da superfície, como a forma do terreno e a presença de quebra-ventos naturais ou artificiais (*wind fences*), também influenciam (SHAO, 2009).

A tensão cisalhante ocorre na direção do vento e é o resultado do fluxo de momento causado pelo vento no sentido vertical descendente e é definida pela Equação 2.4:

$$\tau = \tau_R + \tau_M \quad 2.4$$

Onde τ_R é a tensão cisalhante de *Reynolds* e τ_M é a tensão cisalhante viscosa. A influência da tensão cisalhante no cálculo da velocidade de atrito dependerá

da altura da superfície de interesse. No corpo da camada limite, acima da subcamada viscosa, o escoamento é predominantemente turbulento, e o fluxo de momento ocorre principalmente por efeitos de turbulência, de forma que a tensão de cisalhamento é dada pela Equação 2.5:

$$\tau = \tau_R \quad 2.5$$

Mais próximo da camada de superfície, devido à proximidade da camada viscosa, o fluxo de momento é dominado pela viscosidade; por esse motivo, τ_R pode ser desconsiderado, prevalecendo-se τ_M .

A velocidade de atrito, Equação 2.6, não é um escalar que representa a velocidade (apesar de ter as dimensões de velocidade), mas sim uma força cisalhante exercida na superfície pela ação do vento (BAGNOLD, 1941):

$$u^* = \left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad 2.6$$

Entretanto, sob condições de vento “estáveis”, u^* possui um significado físico muito importante, pois representa o gradiente de velocidade do vento. A velocidade de atrito é diretamente proporcional ao aumento da velocidade do vento em função da altura logarítmica e, portanto, proporcional à tangente do ângulo formado entre a linha da velocidade (u) no eixo das abcissas e a altura (z) no eixo das ordenadas. Esse fator de proporcionalidade é 5,75 e foi demonstrado experimentalmente por Bagnold (1941), resultando na Equação 2.9, que conecta os valores do campo de velocidades u (m/s), em qualquer altura z (mm) acima da superfície, com a constante k e τ . Reescrevendo a Equação 2.3, temos as Equações 2.7, 2.8 e 2.9:

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\log(e)} \right) \quad 2.7$$

$$\frac{u(z)}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \cdot \left(\frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{0,4343} \right) \quad 2.8$$

$$u(z) = 5,75 \cdot u^* \cdot \log\left(\frac{z}{k}\right) \quad 2.9$$

Determinação da velocidade de atrito

Existem técnicas bem estabelecidas para determinar a velocidade de atrito (u^*) medindo tanto o perfil do vento quanto o fluxo de momento diretamente na camada superficial da atmosfera. Em estudos de túnel de vento e de campo, a velocidade de atrito limite (u_{*t}) é geralmente definida como o valor de u^* para o qual uma pequena porcentagem das partículas do solo começa a se mover. A estimativa prática de u_{*t} pode envolver um certo grau de subjetividade ao decidir o que é considerado uma "pequena porcentagem" (SHAO, 2009, p. 146).

A velocidade de atrito pode ser determinada a partir da equação do perfil logarítmico do vento na forma da Equação 2.10 :

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \cdot \ln(z) - \frac{u^*}{k} \cdot \ln(z_0) \quad 2.10$$

A equação acima mostra que existe uma relação de linearidade entre u e $\ln(z)$, de forma que se traçarmos u medido em diferentes alturas (z) em relação a $\ln(z)$, obteremos uma linha reta com inclinação sendo u^*/k e intercepto sendo $-(u^*/k) \cdot \ln z_0$.

Para o cálculo da velocidade de atrito, foi aplicada a Equação 2.10 entre as alturas z_1 e z_2 , e resolvendo para u^* chega-se à Equação 2.11:

$$u^* = k \cdot \left(\frac{U(z_2) - U(z_1)}{\ln(z_2/z_1)} \right) \quad 2.11$$

Para o cálculo da altura da rugosidade aerodinâmica z_0 , resolve-se a equação do perfil logarítmico do vento em qualquer altura z para z_0 , conforme Equação 2.12:

$$z_0 = z \cdot e^{\frac{-k \cdot u(z)}{u^*}} \quad 2.12$$

Para avaliação da velocidade de atrito de forma experimental, foi utilizada a

formulação de Bagnold, dada pela Equação 2.13:

$$u(z) = 5,75 \cdot u^* \cdot \log\left(\frac{z}{k}\right) \quad 2.13$$

Bagnold (1941) modificou a equação da Lei de Parede, e a adaptou usando-a com o $\log x$ ao invés de $\ln x$. Tirando proveito da relação de linearidade existente entre $\log(z)$ e $U(z)$, observada na Equação 2.14, obtemos a inclinação da reta aplicando a Equação 2.15:

$$\log(z) = \frac{u(z)}{5,75 \cdot u^*} + \log(k) \quad 2.14$$

$$A = \frac{1}{5,75 \cdot u^*} \quad 2.15$$

A partir da equação acima, temos a expressão para o cálculo da velocidade de atrito (Equação 2.16), obtida a partir da inclinação da reta que se ajusta aos valores do campo de velocidades quando plotados em um gráfico semilogarítmico.

$$u^* = \frac{1}{5,75 * A} \quad 2.16$$

2.4. Supressores de poeira

A supressão de poeira é fortemente influenciada por duas propriedades: hidrofobicidade e molhabilidade. A hidrofobicidade pode ser entendida como a repelência do solo (ou das partículas de poeira) à água, o que dificulta o molhamento do material. A molhabilidade é a capacidade da água (ou de outro líquido) de aderir e se espalhar sobre uma superfície sólida (ZHENG *et al.*, 2024).

A maioria das poeiras é hidrofóbica e, para facilitar sua supressão, é necessário reduzir seu grau de hidrofobicidade (por meio de agentes químicos) e/ou aumentar a molhabilidade da água. As propriedades físico-químicas da água podem ser modificadas para aumentar sua eficiência na supressão (ZHANG *et al.*, 2022). Existem dois grupos de métodos para aumento da eficiência da água: métodos físicos e métodos químicos, conforme ilustrado na Figura 2.6.

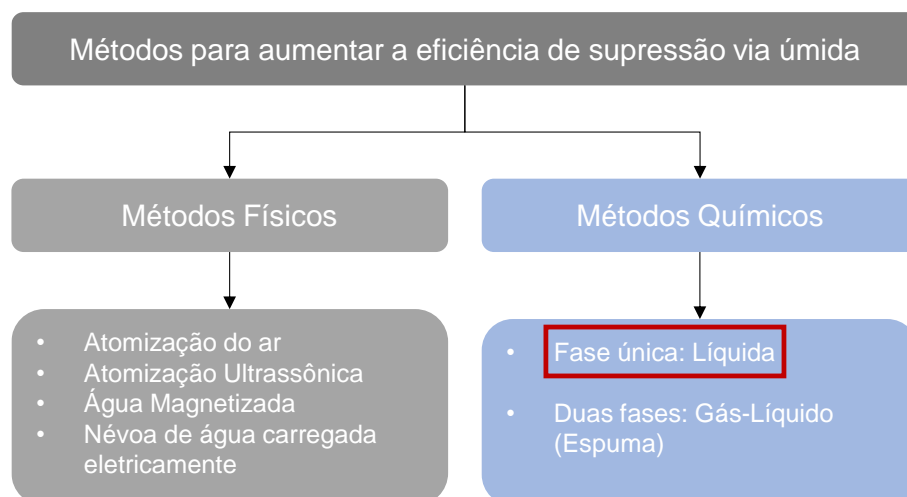


Figura 2.6 - Métodos físico-químicos de supressão de poeira por meio de via úmida. Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2022).

Os métodos químicos sugerem a adição de agentes químicos à água para aumentar a eficiência de supressão. Dentre eles, o método de fase única é o mais comum. Segundo Zhang et al. (2022), os supressores que usam métodos químicos são classificados pelos seus mecanismos de ação (Figura 2.7): supressores do tipo umectante (*wetting*), ligante ou coesivo (*bonding*), aglomerante (*coagulating*), compostos (*compounding*) e formadores de espuma (*foaming*).

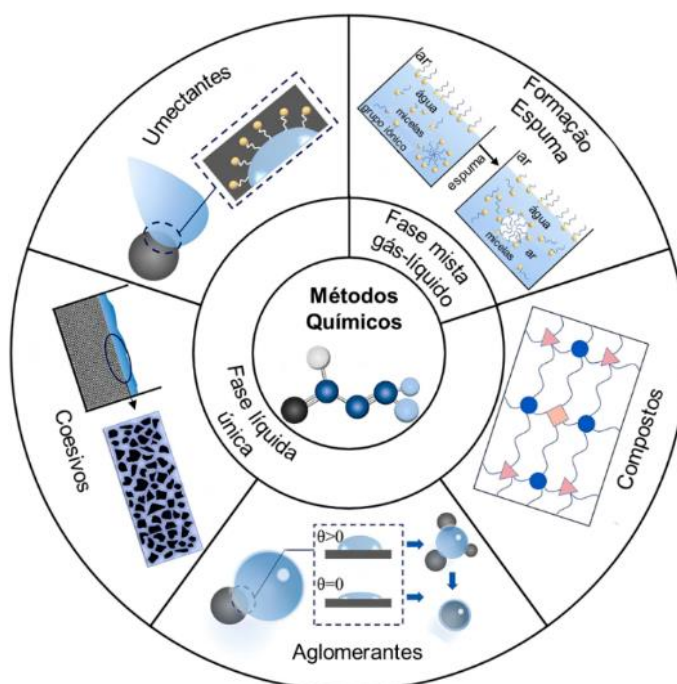


Figura 2.7 - Métodos químicos de supressão de poeira. Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2022).

Supressores Umectantes

O mecanismo de *wetting* (aumento da molhabilidade) é um dos mais importantes para aumentar a eficiência de supressão (ZHANG *et al.*, 2022), pois pode atuar em conjunto com a higroscopia. Higroscopia é a propriedade de uma substância de adsorver ou absorver água da atmosfera próxima, caracterizando-a como higroscópica. Algumas dessas substâncias apresentam a propriedade físico-química chamada deliquescência, caracterizada pela capacidade de absorver umidade até se dissolverem por completo, formando uma solução aquosa.

O mecanismo de higroscopia (Figura 2.8) é composto por quatro estágios: (1) O supressor (substância higroscópica) é aspergido ou misturado às partículas de poeira em ambiente úmido; (2) o supressor adsorve umidade, e moléculas de água se acumulam em torno dele; (3) a camada externa do supressor é dissolvida na água adsorvida; e (4) o supressor é quase totalmente dissolvido na água que contém partículas de poeira (PARVEJ *et al.*, 2021).

Supressores umectantes combinam uma substância higroscópica com um surfactante (tensoativo). Tensoativos são compostos anfipáticos que possuem uma fração polar (hidrofílica) e outra apolar (hidrofóbica), podendo interagir com substâncias polares e apolares, promovendo a interação entre os meios (OLIVEIRA e DIAS, 2017). A principal função dos agentes umectantes é reduzir a tensão superficial da solução supressora, aumentando a penetração e a mobilidade do fluido, facilitando a captura de partículas hidrofóbicas (ZHANG *et al.*, 2022).

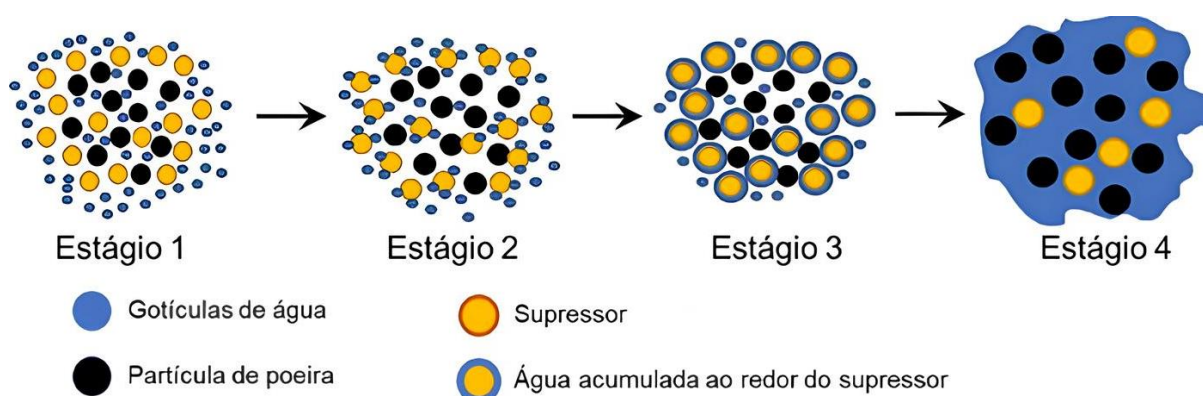


Figura 2.8 - Estágios do mecanismo de supressão baseado na propriedade higroscópica. Fonte: Adaptado de Parvej *et al.* (2021).

Na Figura 2.9, apresenta-se o esquema da redução da tensão superficial em

uma gota de água repousada sobre uma superfície hidrofóbica. Na condição A, a molécula de água está sem ação do surfactante. Na condição B, há ação de um agente surfactante, de modo que as moléculas surfactantes estão conectadas à superfície da molécula, resultando em uma tensão superficial menor e, assim, aumentando a área de contato com a superfície hidrofóbica.

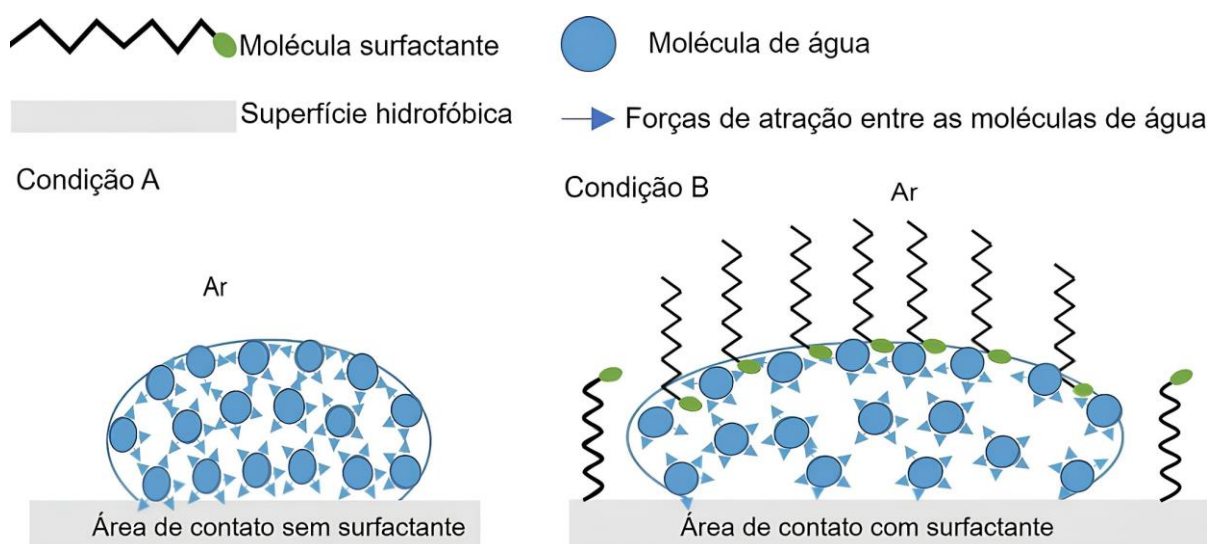


Figura 2.9 - Redução da tensão superficial por meio de surfactante. Fonte: Adaptado de Li *et al.* (2021).

A redução da tensão superficial do fluido ocorre até o limite de saturação (Concentração Micelar Crítica - CMC) e, após esse limite, a adição de surfactante provoca a formação de micelas. Além desse limite, a adição de mais surfactante não reduzirá a tensão superficial.

A desvantagem desse tipo de supressor é o curto tempo de umectação, permitindo a emissão de poeira secundária (LI *et al.*, 2021). Poeira secundária é a poeira previamente depositada no solo que, com o cessamento do efeito do supressor, volta a ser suspensa no ar.

O potencial zeta fornece uma medida das características de carga superficial de partículas em função do pH (LIU *et al.*, 2016) e representa a diferença de potencial entre os limites das fases sólido-líquido.

A concentração de surfactante altera o potencial zeta de uma solução, conforme ilustrado na Figura 2.10.

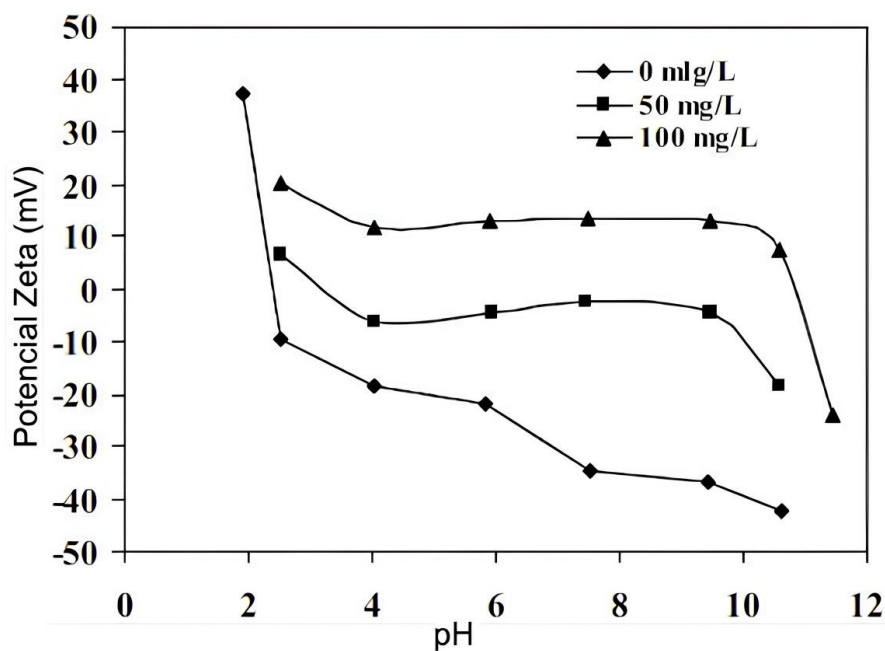


Figura 2.10 - Efeito da concentração de surfactante e do pH. Fonte: Adaptado de Liu *et al.* (2016).

Supressores ligantes/coesivos

O mecanismo de ação dos supressores de poeira coesivos baseia-se na formação de uma camada resistente na superfície das partículas de poeira, criada pela viscosidade do agente supressor, que adere às partículas, dificultando a ressuspensão e dispersão da poeira por efeitos de perturbação no solo (DONG *et al.*, 2023). O mecanismo de ação é ilustrado na Figura 2.11.

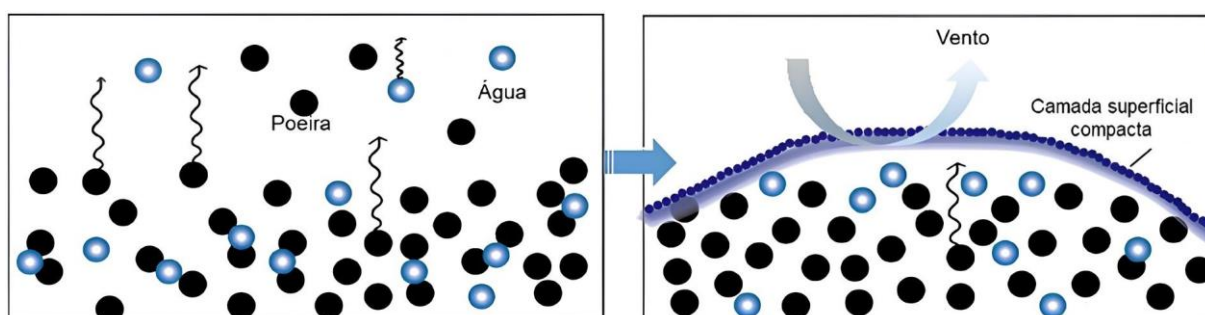


Figura 2.11 - Superfície de proteção formada pelo supressor do tipo ligante. Fonte: Adaptado de Dong *et al.* (2023).

Esse tipo de supressor pode ser dividido em duas categorias: orgânicos e inorgânicos. Os orgânicos têm se tornado foco de pesquisas nos últimos tempos,

devido às suas propriedades adesivas superiores às dos inorgânicos. O ponto negativo é que a camada de proteção se rompe com facilidade sob esforços e impactos (ZHANG *et al.*, 2022).

Supressores aglomerantes

Supressores aglomerantes usam o princípio da aglomeração, no qual agentes ligantes (sais inorgânicos ou resinas) são misturados à poeira, introduzindo forças adesivas que levam à aglomeração das partículas, aumentando a massa dos aglomerados e favorecendo a deposição por gravidade (ZHANG *et al.*, 2022).

O processo de supressão ocorre em quatro estágios (Figura 2.12): (1) O agente supressor é aplicado na superfície; (2) o supressor inicia a formação de pontes adesivas entre as partículas; (3) as pontes adesivas se solidificam entre as partículas; e (4) o aglomerado de partículas cresce, aumentando a massa e suprimindo a poeira (PARVEJ *et al.*, 2021).

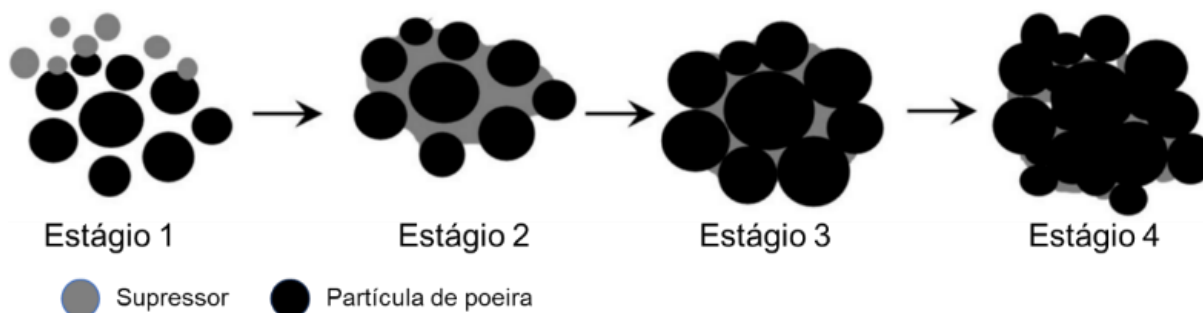


Figura 2.12 - Processo de aglomeração como método de supressão de poeira. Fonte: Adaptado de Parvej *et al.* (2021).

Supressores compostos

Supressores compostos podem combinar mecanismos de umectação, ligação e aglomeração. Esses produtos podem formar uma camada superficial rígida sobre a superfície a ser protegida. São usados principalmente no tratamento estático de poeira, como em pátios de armazenamento de material granular (ZHANG *et al.*, 2022; DONG *et al.*, 2023).

Supressores que usam a heteroagregação

Alguns supressores de poeira usam a heteroagregação como mecanismo de supressão, que consiste em utilizar partículas com cargas opostas para induzir a

agregação, com base em uma concentração ótima. As condições para a produção de heteroagregação ótima vão depender principalmente do pH, do tipo e da concentração de partículas, do tempo e da taxa de mistura e da concentração eletrolítica (YATES *et al.*, 2005; DINGER, 2006).

Na Figura 2.13, são apresentados os resultados de sedimentação de alumina em função da concentração ótima de sílica com pH = 5 e potencial zeta de +40 mV.

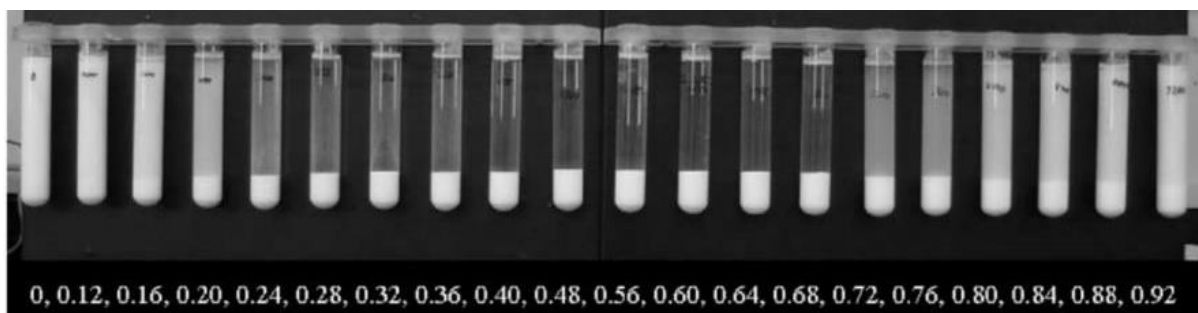


Figura 2.13 - Separação em duas fases. Fonte: Yates *et al.* (2005).

As partículas de sílica carregadas, com cargas opostas, são adsorvidas na superfície das partículas de alumina, neutralizando ou reduzindo a carga superficial líquida, levando à condição de ponto isoelétrico de carga (PIC). Nessa condição, ocorrem a agregação de partículas e a sedimentação da alumina devido ao efeito da gravidade.

Os métodos físicos aumentam a eficiência da supressão da água, sem a adição de agentes químicos, com principais vantagens: aspectos ambientais, baixo custo e simplicidade de implantação. Os métodos físicos de supressão de poeira mais comuns são: atomização do ar, atomização ultrassônica, magnetização da água e névoa de água carregada eletrostaticamente, conforme ilustrado na Figura 2.14 (LI *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2022).

Os sistemas de aspersão de água (*spray*) são os mais viáveis economicamente e os mais utilizados para o controle e a supressão de particulados (LIAO *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2022), ainda que a sua eficiência de supressão seja baixa se não for utilizado um método de aumento de desempenho (LI *et al.*, 2021).

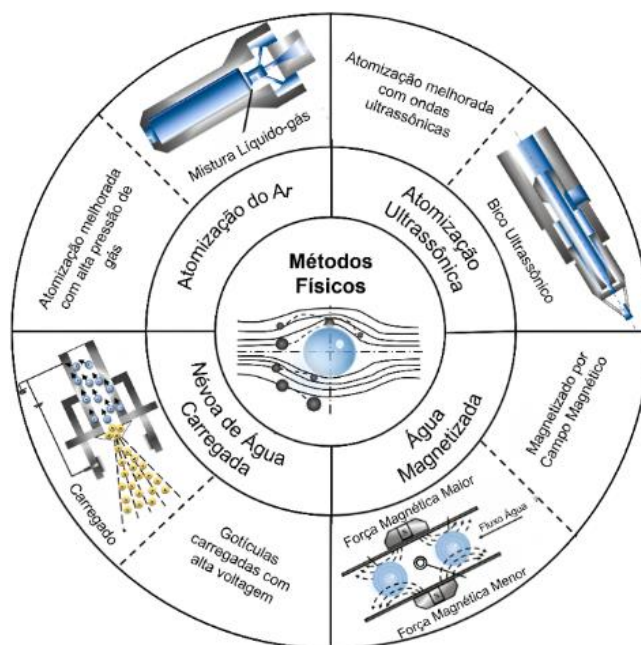


Figura 2.14 - Métodos físicos de supressão de poeira. Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2022).

2.5. Impacto do material particulado na saúde e no meio ambiente

A dispersão de poeira ao longo da cadeia produtiva da mineração pode resultar na contaminação de solos e cursos d'água, levando a paralisações operacionais e disputas judiciais (GUPTA e GOKHALE, 2025). Além disso, a poluição atmosférica decorrente dessas emissões pode causar prejuízos à saúde da população residente nas proximidades das indústrias mineradoras (WATSON *et al.*, 2000). O Banco Mundial estima que os gastos globais com os danos à saúde causados pela poluição atmosférica giram em torno de 6 bilhões de dólares, equivalentes a cerca de 5 % do PIB global, e a Organização Mundial da Saúde (OMS) estima em sete milhões de mortes por ano decorrentes da exposição ao material particulado fino (MALUF, 2024).

Outro problema comum que o MP na forma de poeira fugitiva pode causar, quando em alta concentração, é a redução da visibilidade em vias não pavimentadas, o que aumenta o risco associado ao tráfego de equipamentos móveis (PARVEJ *et al.*, 2021; LE VERN *et al.*, 2022). Segundo Smarik *et al.* (2019), a redução da visibilidade ocorre devido à capacidade das partículas suspensas na atmosfera de absorver e espalhar luz.

Devido à grande área de contato entre a superfície do sistema respiratório e

a atmosfera terrestre, a qualidade do ar interfere diretamente na saúde respiratória. Os efeitos maléficos do MP na saúde humana estão diretamente ligados à composição química e às dimensões (ARBEX *et al.*, 2012). Conforme a OMS, o MP afeta mais pessoas do que qualquer outro contaminante (WHO, 2025).

Quanto menor for o tamanho da partícula, maior será a capacidade de penetrar no sistema respiratório, podendo chegar até a corrente sanguínea (Figura 2.15) e, portanto, as de maior interesse de estudo e pesquisa são as com diâmetro menor que 10 μm (PM₁₀). Os principais sistemas afetados pelo MP são os respiratórios e os cardiovasculares.

Na Tabela 2.1, são apresentadas as frações de particulados, as fontes e as principais áreas que afetam o corpo humano e os impactos na saúde.

Tabela 2.1 - Tipos de poluentes, fontes e seus impactos na saúde. Fonte: Adaptado de Brito *et al.* (2018).

Poluentes	Fontes	Penetração no sistema respiratório	Fisiopatologia
PTS	Fontes antropogênicas: poeira de ruas e vias, atividades agrícolas e de construção.	Nariz, garganta.	- Diminui a atividade mucociliar e a dos macrófagos. - Produz irritação nas vias respiratórias.
PM ₁₀	Fontes naturais: sal marinho, pólen, esporos, fungos e cinzas vulcânicas.	Traqueia, brônquios, Bronquíolos.	- Causa estresse oxidativo e, em consequência, inflamação pulmonar e sistêmica. - Exposição crônica provoca remodelamento brônquico e
PM _{2,5}	Queima de combustíveis fósseis e de biomassa; usinas termelétricas.	Alvéolos.	doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC).
PM _{0,1}		Alvéolos, tecido pulmonar, corrente sanguínea.	- Pode ser cancerígeno.

O MP maior que 10 μm fica quase totalmente retido na mucosa nasal e na garganta. As partículas PM₁₀, também chamadas de partículas inaláveis, entram no corpo humano por meio da boca e do nariz, passando pelas vias respiratórias superiores e podem progredir para as vias respiratórias inferiores, alojando-se nos pulmões. Já o MP fino (PM_{2,5}) é capaz de passar pelas vias superiores e penetrar nas vias respiratórias inferiores para além da faringe, podendo atingir os alvéolos pulmonares (BRITO *et al.*, 2018). Partículas classificadas como PM_{0,1} devido ao seu tamanho ultrarreduzido, podem entrar na corrente sanguínea e também são classificadas como fração respirável. Essas nanopartículas apresentam comportamento semelhante ao de moléculas de gás, o que lhes confere facilidade

para penetrar nos alvéolos por meio de forças de difusão (movimento Browniano), progredindo para o tecido celular pela corrente sanguínea (KIM *et al.*, 2015).

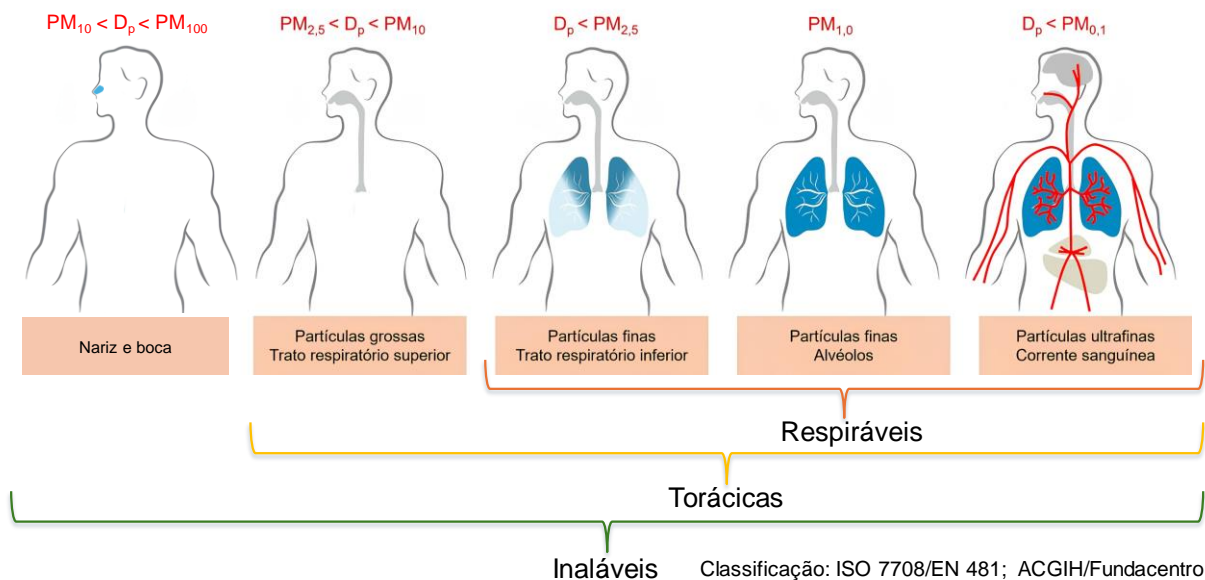


Figura 2.15 - Penetração do MP no sistema respiratório em função do diâmetro equivalente. Fonte: Adaptado de Vincent (2025).

Além dos impactos na saúde humana, a poeira proveniente da mineração pode se depositar sobre a vegetação, comprometendo o desenvolvimento e a saúde da flora (FARMER, 1993). A fauna também sofre os efeitos da exposição, podendo apresentar impactos fisiológicos e comportamentais (REHMAN *et al.*, 2021).

Em termos econômicos, a implementação de medidas para controlar a emissão de poeira pode resultar em ganhos financeiros para as indústrias, ao reduzir custos associados à saúde dos trabalhadores, à manutenção de equipamentos e à limpeza. Políticas públicas e regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos destacam a importância de desenvolver tecnologias inovadoras que atendam aos padrões de emissão (CONAMA, 2024). A necessidade de mitigar a geração de poeira tem sido discutida devido aos crescentes impactos ambientais associados (LIU *et al.*, 2020).

2.6. Legislação sobre poluição atmosférica

A OMS é responsável por emitir as Diretrizes para a Qualidade do Ar (*Air Quality Guidelines – AQG*), cuja primeira edição foi publicada em 1987. A AQG serve como referência técnica para uma meta global de concentração de poluentes

atmosféricos, a ser perseguida pelos governos, com o objetivo de melhorar a qualidade de vida das pessoas. Os níveis de concentração finais determinados pelas AQGs de 2021 podem ser vistos na Tabela 2.2 (WHO, 2006; 2021).

A AQG não fornece orientação específica para a medição das concentrações propostas diretamente nas fontes geradoras, pois trata da qualidade do ar ambiente como resultado da mistura de poluentes provenientes de fontes pontuais e difusas. Portanto, realizando-se medições de concentrações de MP na atmosfera em diversos ambientes que podem ser impactados pela poluição, as contribuições de fontes pontuais e difusas são consideradas (WHO, 2021; U.S. EPA, 2024; WHO, 2024; 2025).

A poluição do ar atmosférico nos EUA é regulamentada pelo *Clean Air Act* (CAA). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*Environmental Protection Agency* - U.S. EPA) é o órgão americano responsável pela implementação dos requisitos do CAA por meio das *National Ambient Air Quality Standards* (NAAQS) (HU, 2022). Os níveis atuais de poluentes atmosféricos adotados pela U.S. EPA nos EUA (U.S. EPA, 2024) são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Diretrizes para os limites máximos de poluentes do tipo MP. Fonte: Adaptado de WHO (2006; 2021); CONAMA (2024); EUROPEAN PARLIAMENT (2024).

Poluente ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Período	CONAMA (2024)					EU 2024/2881 (2024)		U.S. EPA NAAQ (2024)	Diretrizes WHO-AQG (2021)
		PI-1	PI-2	PI-3	PI-4	PF*	Limites até 2026	Limites após 2030	PF*	PF*
PM _{2,5}	Anual	20	17	15	10	5	25	10	9 ^P / 15 ^S	5
	24 h	60	50	37	25	15	-	25	35 ^P / 35 ^S	15
PM ₁₀	Anual	40	35	30	20	15	40	20	-	15
	24 h	120	100	75	50	45	50	45	150 ^P / 150 ^S	45
PTS	Anual	-	-	-	-	80	-	-	-	-
	24 h	-	-	-	-	240	-	-	-	-

* Níveis de concentração alvo; ^P, ^S Níveis primário e secundário

Na União Europeia (UE), no dia 10 de dezembro de 2024, entrou em vigor a nova diretriz europeia sobre qualidade do ar: 2024/2881/EU (EUROPEAN PARLIAMENT, 2024). Na Tabela 2.2, apresentam-se os valores de concentração de MP a serem atingidos até 2030.

A regulamentação da qualidade do ar no Brasil é composta por diversas leis,

resoluções e políticas públicas. A Lei Federal nº 6.938/1981, de 31 de agosto de 1981, cria a Política Nacional do Meio Ambiente, que estabelece princípios gerais para proteção ambiental. Essa lei seria o equivalente ao CAA nos Estados Unidos. A partir dessa lei, foi criado o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão responsável por estabelecer diretrizes, padrões nacionais, regras e regulamentos sobre parâmetros e limites de qualidade do ar.

A resolução mais recente do CONAMA sobre qualidade do ar é a Resolução nº CONAMA 506/2024 de 05 de julho de 2024 (CONAMA, 2024). Essa resolução define novos limites de concentração de poluentes atmosféricos, substituindo os parâmetros da Resolução nº 491/2018. Também introduz prazos específicos para a implementação dos padrões intermediários (PI-1 a PI-4) e dos padrões finais (PF), conforme a Tabela 2.2 (CONAMA, 2024).

Com a atualização das diretrizes da WHO, em 2021, para valores mais restritivos de concentrações de poluentes, mesmo o "Padrão Final" da legislação brasileira está desatualizado em relação às melhores práticas globais de saúde.

Índice de Qualidade do Ar (IQA_r)

Visando simplificar o entendimento dos Padrões de Qualidade do Ar, a grande maioria das agências nacionais e internacionais de regulação e controle do meio ambiente adota o IQA_r, desenvolvido pela U.S. EPA (MALUF, 2024).

O IQA_r foi implementado no Brasil a partir da Resolução CONAMA nº 506/24 (CONAMA, 2024) e da Lei nº 14.850/2024 (Política Nacional de Qualidade do Ar), com o objetivo de facilitar a divulgação dos dados de monitoramento da qualidade do ar de curto prazo (MMA, 2025). De forma resumida, o IQA_r transforma as concentrações de poluentes atmosféricos em um único valor adimensional (Tabela 2.3), que permite compará-las aos valores estabelecidos na legislação aplicável, facilitando a compreensão do público sobre os níveis de poluição atmosférica. É importante notar que a Resolução nº 491/2018 não abordava esse tema.

Para a definição dos valores de concentração de poluentes atmosféricos referentes à qualidade do ar, utilizam-se como referência os valores-guia estabelecidos pela OMS (WHO, 2021) e os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 506/24. O IQA_r é dado pela Equação 2.17, também definida pela mesma resolução:

$$IQAr = I_{ini} + \left(\frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} \right) \cdot (C - C_{ini}) \quad 2.17$$

Onde: I_{ini} é o índice que corresponde à concentração inicial da faixa; e I_{fin} o índice que corresponde à concentração final da faixa; C_{ini} é a concentração inicial da faixa onde se localiza a concentração medida; C_{fin} é a concentração final da faixa onde se localiza a concentração medida; e C é a concentração medida do poluente.

Os valores de concentração para a qualidade do ar “boa” são os mais seguros à saúde humana para exposição de curto prazo, conforme WHO (2021), e correspondem aos Padrões Finais estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 506/24.

A transição entre as faixas do IQAr (Tabela 2.3) foi estabelecida com base em critérios distintos. Para a mudança de "Moderada" para "Ruim", foram empregados os Padrões Intermediários 2 (PI-2), conforme Resolução CONAMA nº 506/24. Para a transição entre as faixas "Ruim" e "Muito ruim", os valores de referência foram os *Interim Targets 1* (IT-1), recomendados pela WHO (2021).

Para determinar os valores de transição entre "muito ruim" e "péssima", utilizaram-se os valores de concentração de poluentes correspondentes aos níveis de atenção (MMA, 2025), conforme estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 491/18.

Tabela 2.3 - Níveis de qualidade do ar (IQAr) definidos pelo Ministério do Meio Ambiente. Fonte: Adaptado de MMA (2025).

Qualidade do ar	IQAr	PM ₁₀ (µg/m ³) 24h	PM _{2,5} (µg/m ³) 24h	PTS (µg/m ³) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 45	0 - 15	≤240
N2 - Moderada	41 - 80	>45 - 100	>15 - 50	
N3 - Ruim	81 - 120	>100 - 150	>50 - 75	
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250	>75 - 125	
N5 - Péssima	201 - 400	>250 - 600	>150 - 300	

2.7. Erosão eólica e emissão de poeira

A emissão de poeira está relacionada aos processos de erosão causados pela ação dos ventos e é medida pela taxa de erosão eólica (SHAO, 2009; KOK *et al.*, 2012; JARRAH *et al.*, 2020). Essa taxa é definida pela perda de massa de material decorrente do arraste causado pela velocidade do vento; é expressa pela Equação 2.18 (BAO *et al.*, 2020).

$$\eta_e = \frac{\Delta m}{m_0} \quad 2.18$$

Onde: Δm é a variação da massa; e m_0 é a massa inicial.

Para determinação de η_e pode-se usar um ensaio em túnel de vento, no qual deve-se conhecer a umidade do material que vai ser ensaiado com o intuito de computar a massa de água da amostra antes e depois do ensaio. Esse tipo de ensaio é conhecido como ensaio de amostra em base seca.

Somada à taxa de erosão eólica, outro parâmetro de extrema importância, quando se trata de emissão e supressão de poeira, é a eficiência de supressão definida pela Equação 2.19 (ZHOU *et al.*, 2014).

$$\eta_s = \frac{C_{ea} - C_{eb}}{C_{ea}} \quad 2.19$$

Onde:

C_{ea} ; C_{eb} : concentrações da emissão de poeira (ensaio “a” e ensaio “b”).

A erosão eólica consiste em três fases distintas: (1) início do movimento das partículas do solo (destacamento ou deflação); (2) emissão de poeira e transporte das partículas, conforme ilustrado na Figura 2.17; e (3) deposição das partículas (JARRAH *et al.*, 2020).

Início do movimento

O mecanismo que controla o movimento inicial de uma partícula baseia-se em um equilíbrio de forças: quando a resultante das forças que estimulam o movimento é maior que a resultante das forças resistivas, ocorre o rolamento, o deslizamento ou a suspensão da partícula (RABINOVICH e KALMAN, 2009).

Transporte e emissão de poeira

A emissão de poeira e o transporte na atmosfera ocorrem pela ação de quatro mecanismos físicos distintos: (1) Suspensão direta de partículas finas por meio do arraste aerodinâmico (Figura 2.16-a); (2) emissão resultante do bombardeamento por salto (*saltation bombardment*) (Figura 2.16-b); (3) desagregação (Figura 2.16-c); e (4) deslizamento ou arrasto superficial (*creep*), conforme ilustrado na Figura 2.17 (BAGNOLD, 1941; KLOSE e SHAO, 2013).

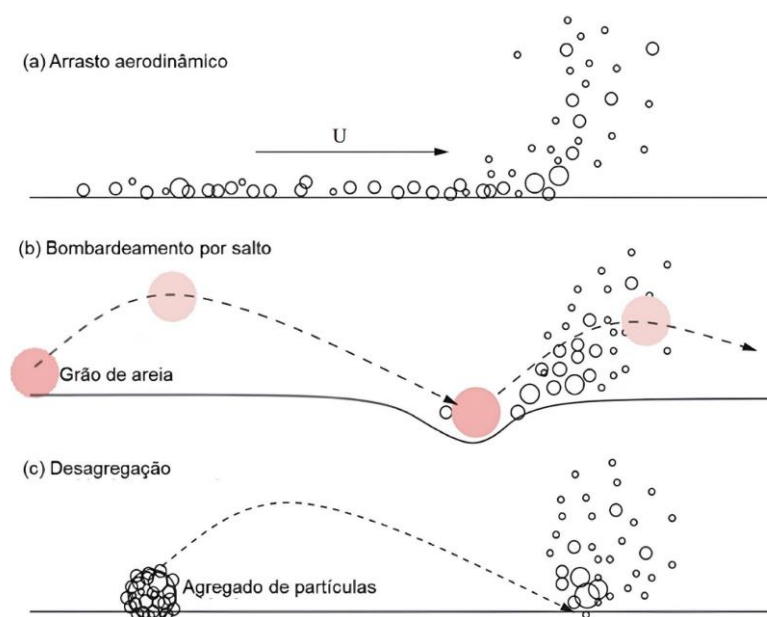


Figura 2.16 - Mecanismo de emissão de poeira. Fonte: Adaptado de Shao (2009).

Os dois últimos mecanismos (três e quatro) estão diretamente relacionados ao processo de salto e abrasão. O bombardeamento de superfícies por agentes abrasores é o principal padrão de emissão de poeira em solos compactados (ZHANG *et al.*, 2023).

Partículas de diferentes tamanhos se movem de maneiras distintas durante um evento de erosão eólica. Com base em observações de campo e em túneis de vento, Bagnold (1941) classificou o movimento das partículas em três categorias principais:

A suspensão (*suspension*) ocorre quando as partículas de poeira são arrastadas para a atmosfera pelo efeito da turbulência na camada limite atmosférica. Algumas tendem a ficar suspensas (Figura 2.17) devido às suas baixas velocidades terminais, somadas ao efeito de vórtices turbulentos (*turbulent eddies*) no sentido vertical. Uma vez que essas partículas não entram em contato com o solo, tendem a viajar à velocidade média do vento, sem qualquer resistência. A suspensão pode ser dividida em suspensão de período longo (partículas $\leq 20 \mu\text{m}$) e suspensão de período curto (partículas entre 20 e 70 μm), conforme Figura 2.17. Observações mostram que apenas partículas muito pequenas (até 20 μm) permanecem em suspensão por longos períodos, na ordem de semanas, podendo ser transportadas por centenas de quilômetros e a altitudes elevadas (BAGNOLD, 1941; SHAO, 2009).

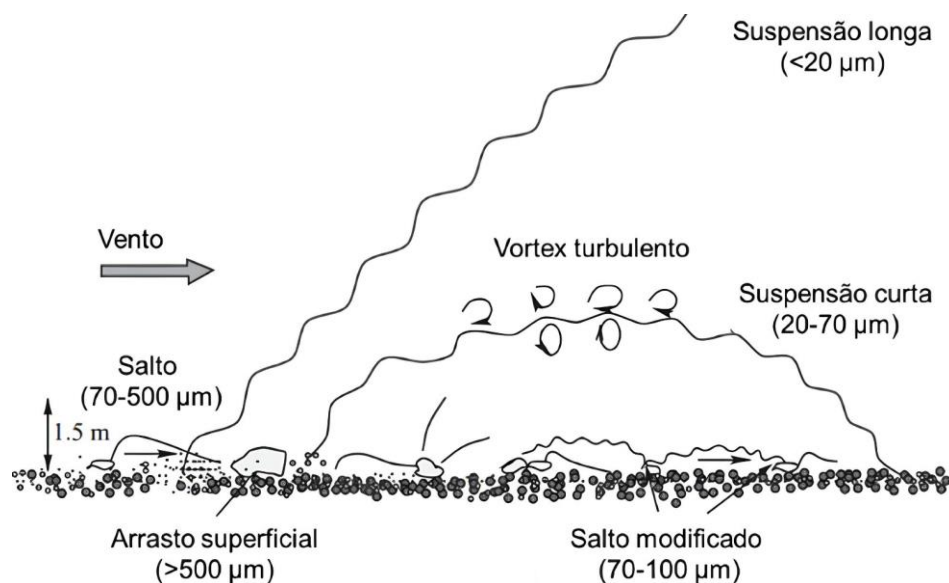


Figura 2.17 - Mecanismos de movimento e transporte de partículas. Fonte: Adaptado de Shao (2009).

No salto (*saltation*), as partículas de diâmetro entre 70 e 100 μm ou agregados são suspensos por curto período de tempo e retornam, colidindo com a superfície do solo, desagregando-se e/ou desagregando os agregados do solo em partículas menores, lançando-as novamente para o ar (BAGNOLD, 1941). Quanto mais altas forem as partículas ejetadas, maior será a energia acumulada e transferida às partículas atingidas no retorno à superfície, levando-as a serem novamente lançadas ao ar e transportadas por grandes distâncias (SHAO, 2009; KOK *et al.*, 2012). Esse mecanismo também é conhecido como *sand blasting* (KNIPPERTZ e STUUT, 2014). Experimentos em túnel de vento mostram que a taxa de emissão de poeira causada por esse mecanismo pode ser uma ordem de magnitude maior do que o arrasto aerodinâmico (SHAO, 2009) e é considerada o principal mecanismo de transporte de partículas por longas distâncias na direção do vento, conforme mencionado anteriormente.

Por último, no deslizamento ou arrasto superficial (*creep*), as partículas de diâmetro $> 500 \mu\text{m}$ são muito grandes para serem suspensas pelas correntes de ar e são arrastadas ou roladas pela superfície, pela energia do vento e/ou pela energia do impacto de outras partículas oriundas do salto. Essas partículas rolam ou deslizam pela superfície, colidindo eventualmente com outras partículas ou agregados, o que favorece a desintegração. Esse tipo de movimento transporta partículas apenas por alguns metros e contribui para a deposição e perda de MP em áreas localizadas

(BAGNOLD, 1941; SHAO, 2009).

2.8. Ponto Isoelétrico de Carga (PIC)

O potencial zeta é o método padrão para medir a carga eletrostática superficial de uma partícula. Embora a medição padrão do potencial zeta envolva analisadores caros que determinam a mobilidade eletroforética das partículas, o controle do pH de uma solução pode ser o modo inicial de controle das cargas superficiais (HALT e KAWATRA, 2017). O PIC é definido como o pH em que a partícula em suspensão apresenta carga eletrostática superficial igual a zero, de modo que conhecer o PIC e o pH da suspensão permite prever o comportamento do particulado (DINGER, 2006).

Um método fácil e barato para identificar o PIC, sem analisador de potencial zeta, utiliza apenas um pHmetro (ou papel medidor de pH), tubos de ensaio e soluções de ácido e de base. Esse método envolve a preparação de uma série de suspensões da amostra de partículas em água destilada, ajustando o pH de cada suspensão a valores inteiros, com o uso de ácido nítrico e hidróxido de potássio. Após deixar os tubos em repouso por um período, o PIC é identificado na amostra em que o particulado floculou e decantou, deixando o fluido sobrenadante límpido. Ao observar a floculação das partículas em diferentes valores de pH, identifica-se o PIC (DINGER, 2006). Pode-se determinar a concentração ótima de um supressor de poeira, por exemplo, adaptando o procedimento descrito, ao variar as concentrações do supressor em cada intervalo de pH.

2.9. Mecanismos físicos da emissão de poeira

Conforme os conceitos explicados nos capítulos anteriores, podemos classificar as vias não pavimentadas como fontes antropogênicas geradoras de poeira, do tipo estacionárias (localização fixa), com emissão difusa, que ocorre ao longo de uma área.

De acordo com a U.S. EPA (2006), as emissões de poeira em vias não pavimentadas variam conforme a fração de silte (partículas com diâmetro inferior a 75 micrômetros).

Três principais fenômenos físicos são responsáveis pela geração da poeira fugitiva oriunda de vias não pavimentadas: (1) Interação mecânica das rodas dos veículos; (2) tensões cisalhantes e transporte de partículas pela ação de correntes de

ar turbulentas decorrentes do movimento dos veículos; e (3) bombardeamento por salto (U.S. EPA, 1995a; DENBY *et al.*, 2018; U.S. EPA, 2020).

Veículos, ao trafegarem por uma via não pavimentada, geram interação mecânica entre as rodas e o solo. Partículas de poeira são arrastadas pela roda e projetadas contra o solo (Figura 2.18-1) e também ejetadas para o ar (Figura 2.18-2), formando a poeira fugitiva. Há também a interação do pneu com o solo, por meio de forças de cisalhamento no sentido horizontal (Figura 2.18-3), que causam o desmonte e moagem dos agregados do solo.

Outra forma de interação é a formação de poeira, decorrente da pressão exercida pela roda sobre o agregado (Figura 2.18-4), desmontando e moendo o agregado. Há também a poeira localizada entre o agregado depositado no solo durante o processo de construção da via e realimentada pela poeira fugitiva de fontes próximas e pela própria esteira de turbulência do veículo (Figura 2.18-5) (YOO *et al.*, 2024).

A superfície da via é atingida por correntes turbulentas de ar oriundas da esteira de turbulência (Figura 2.18-6), resultantes da passagem do veículo e da ação dos ventos atmosféricos (Figura 2.18-7). A velocidade do veículo exerce forte influência sobre a quantidade de poeira gerada, devido ao aumento da turbulência (BARNES e CONNOR, 2014; KACER *et al.*, 2024).

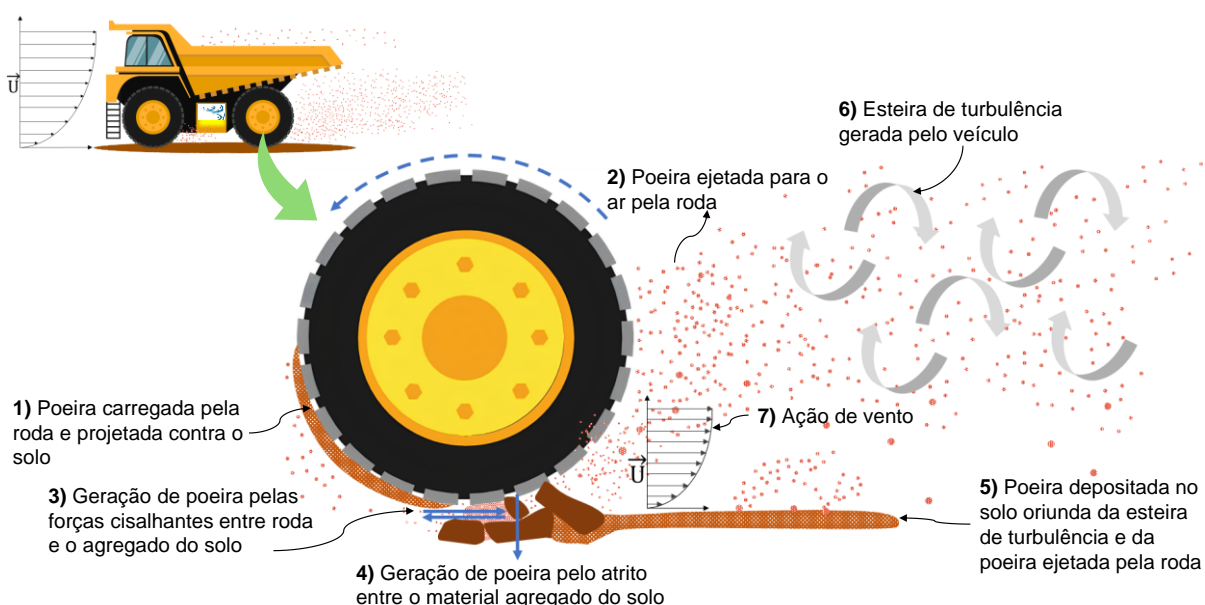


Figura 2.18 - Formação, abastecimento de reservatórios e emissão de poeira em vias não pavimentadas. Fonte: Adaptado de Barnes e Connor (2014).

Essas fortes correntes de ar turbulentas continuam atuando mesmo após a passagem do veículo (U.S. EPA, 2020) e são responsáveis por movimentar o MP da superfície da via. Parte da poeira formada pelos processos descritos acima é então carregada pela roda do veículo, iniciando novamente o processo conforme a Figura 2.18-1.

Observando esse ciclo, podemos concluir que a formação da poeira em vias não pavimentadas é um processo contínuo e progressivo (BARNES e CONNOR, 2014; ADDO *et al.*, 2024) e depende da disponibilidade de reservatórios de MP no leito da via, abastecidos continuamente pelos mecanismos descritos acima.

2.10. Meio Ambiente, Social e Governança (ESG)

ESG corresponde exatamente às práticas ambientais, sociais e de governança de uma empresa. O termo surgiu em 2004, no relatório *WHO CARES WINS* (GLOBAL COMPACT, 2004), como resultado da provocação do secretário-geral da ONU (Organização das Nações Unidas), Kofi Annan, a 50 CEOs de grandes instituições financeiras, sobre como integrar fatores sociais, ambientais e de governança no mercado de capitais (IFC e WORLD BANK, 2004).

O termo ESG ganhou ainda mais destaque em 2018, após uma carta emitida por Larry Fink (CEO da *Black Rock*), na qual ele informava que os critérios de ESG fariam parte do processo de tomada de decisão dos investimentos da companhia. Conforme o tema passou a ganhar ainda mais forma após 2018, surgiu um desentendimento quanto aos conceitos de sustentabilidade e de ESG.

A sustentabilidade tem como escopo solucionar os grandes desafios da humanidade, com foco no desenvolvimento sustentável e na atuação conjunta de governos, sociedade civil e setor privado, e possui como princípio os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) publicados pela ONU (ONU, 2025). O ESG se encarrega da gestão de riscos relacionados a temas “pré-financeiros” (ambientais, sociais e de governança) que impactam diretamente a perenidade da própria organização.

As práticas de ESG trazem benefícios à sociedade, reduzindo as externalidades negativas da organização e/ou potencializando as externalidades positivas, na medida em que cumprem sua cota de responsabilidade compartilhada na sustentabilidade. O ESG é o *business case* da sustentabilidade (POSTAL e RAPOSO, 2025).

No Brasil, o termo ESG e seus conceitos têm se difundido devido à preocupação crescente do mercado financeiro com a sustentabilidade e com os critérios de ESG adotados pelas empresas (RABELO e BOTEZELLI, 2025). As questões ambientais, sociais e de governança passaram a ser consideradas essenciais nas análises de riscos e nas decisões de investimento dos bancos, o que exerce forte pressão sobre o setor (POSTAL e RAPOSO, 2025).

Esse movimento tem pressionado as empresas a incluir o tema em suas agendas, tornando o ESG parte permanente dos processos das organizações. As práticas de ESG demonstram robustez e maturidade corporativa para os *stakeholders*, na medida em que há alinhamento entre o retorno financeiro e um impacto positivo e sustentável na sociedade e no meio ambiente (ISO, 2024; PACTO GLOBAL REDE BRASIL, 2025).

Uma vez que uma empresa esteja engajada no desenvolvimento e na sustentação dos pilares do ESG em suas operações, é necessário reportar o progresso e os desafios aos interessados. Atualmente, os relatórios de sustentabilidade são o principal meio utilizado para esse objetivo, ainda que não seja a principal função dessa ferramenta (FARIA e GRANHA, 2024). Nesse sentido, surgem as estruturas (*frameworks*) de ESG, padronizando a forma como as informações são reportadas e indicando quais são as informações mínimas necessárias a serem divulgadas, conforme os temas prioritários do setor em que a empresa atua (BARBOSA *et al.*, 2023; XLV, 2025).

A implementação do ESG exige a escolha de um ou mais *frameworks*, que têm como objetivo orientar a forma de medir os resultados das ações de meio ambiente, sociais e de governança e de demonstrar e reportar aos *stakeholders* o estado atual de realização, progresso e maturidade dos critérios ESG adotados (ISO, 2024).

Os principais *frameworks* disponíveis (Tabela 2.4) atualmente são (RICHTER *et al.*, 2025):

- a) *Global Reporting Initiative* (GRI);
- b) *Sustainability Accounting Standards Board* (SASB);
- c) *Task Force on Climate-related Financial Disclosures* (TCFD);
- d) *International Financial Reporting Standards* (IFRS-ISSB), obrigatório a partir de 2026; e
- e) *Carbon Disclosure Project* (CDP).

Tabela 2.4 - Principais características e diferenças entre os *frameworks* para comunicar e reportar ESG. Fonte: Adaptado de Richter *et al.* (2025).

	Escopo	Aplicabilidade	Foco
GRI	Escopo amplo que abrange uma gama de tópicos ESG. É o mais abrangente dos <i>frameworks</i> , aplicável a todas as indústrias e tipos de organizações.	Aplicável a qualquer organização, independentemente do setor, do tamanho ou da localização.	Equilíbrio entre o ambiental, o social e a governança.
SASB (ISSB)	Tem um escopo focado em tópicos materialmente relevantes para o desempenho financeiro, específicos de cada setor.	Aplicável a empresas específicas de cada um dos 77 setores, oferecendo padrões personalizados.	Fortemente orientado para questões financeiras e materiais.
TCFD	Concentra-se especificamente em riscos e oportunidades relacionados às mudanças climáticas.	Destina-se a empresas que desejam relatar como as mudanças climáticas afetam suas finanças.	Exclusivamente sobre riscos e oportunidades climáticas.
IFRS - ISSB	Busca harmonizar normas globais de sustentabilidade, com foco na materialidade financeira.	Focado em empresas globais que buscam harmonizar suas divulgações de sustentabilidade com padrões aceitos mundialmente.	Criação de normas globais de sustentabilidade com foco na relevância financeira.
CDP	Foca principalmente em questões ambientais, como emissões de carbono e gestão da água.	Qualquer organização pode relatar, mas é especialmente popular entre grandes empresas e cidades.	Principalmente ambiental, com foco em carbono, água e florestas.

Para integrar a gestão de poeiras em vias não pavimentadas ao ESG de uma empresa de mineração, algumas ações são necessárias (ICMM, 2023; FROES e ARAUJO, 2025; RICHTER *et al.*, 2025):

- a) Adotar padrões setoriais na governança (ex.: Princípios de mineração do ICMM, *International Council on Mining and Metals*);
- b) incorporar inventários e metas de emissões de material particulado na gestão ambiental corporativa;
- c) identificar as externalidades positivas e negativas da gestão de poeiras da empresa; e
- d) basear o monitoramento, o controle e a divulgação dos indicadores de desempenho da gestão de poeiras nos *frameworks*.

2.11. Incerteza experimental

O termo incerteza (*uncertainty*) surgiu com o princípio da incerteza, proposto no campo da mecânica quântica, em 1927, pelo físico Heisenberg. Desde há muito tempo, as pessoas tentam encontrar a melhor maneira científica de avaliar a qualidade dos resultados medidos em ensaio. Incerteza é um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem, com razoabilidade, ser atribuídos à medição. O parâmetro pode ser o desvio padrão associado, por exemplo (IPQ, 2012).

Ainda, conforme o IPQ (2012), o objetivo de conhecer a incerteza durante uma medição não é determinar um valor verdadeiro o mais próximo possível, mas sim atribuir um intervalo razoável para a variável medida. Ainda que fosse possível realizar uma medição perfeita, não seria possível reduzir o intervalo a um único valor. Dessa forma, a incerteza assume a forma de uma distribuição.

A estimativa da incerteza é uma atividade que deve ser executada pelo próprio executor da medição, e é essencial obter-se a incerteza da grandeza de interesse, podendo ser, por exemplo, através da Lei Geral da Propagação de Incertezas (JCGM, 2008), que será explorada abaixo:

Dada uma função F qualquer (Equação 2.20), relacionando uma grandeza de saída σ_y , tendo como entrada outras grandezas $(x_1, x_2 \dots x_n)$, temos que:

$$y = F(x_1, x_2 \dots x_n) \quad 2.20$$

Assumindo que as grandezas de entrada não são correlacionadas, conhecendo a incerteza da medição de cada variável (δx_n), a propagação de incertezas (MOFFAT, 1982) é dada pela Equação 2.21:

$$\delta_y^2 = \left(\frac{\partial F}{\partial x_1} \cdot \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} \cdot \delta x_2 \right)^2 + \dots \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} \cdot \delta x_n \right)^2 \quad 2.21$$

A equação de propagação de incertezas nos diz como calculamos e combinamos as contribuições das incertezas de cada variável δx_n com a incerteza total δ_y .

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Emissão de poeira

O estudo de Yates *et al.* (2005) investiga a heteroagregação entre partículas de sílica e alumina, processo relevante para as indústrias de tintas, farmacêutica e mineração. A pesquisa demonstrou que a adição de sílica a soluções de alumina induz a agregação, resultando em grandes aglomerados. Os resultados revelaram uma relação inversa entre o tamanho das partículas de sílica e o número necessário para agregação ótima, embora a massa total de sílica requerida aumente. Para razões de tamanho inferiores a 0,025 μm , o número de partículas excedeu o necessário para cobertura superficial ideal, enquanto para razões próximas a 1,0 μm , apenas 25 % da quantidade esperada foi requerida. Conclui-se que a heteroagregação é fortemente influenciada pela relação tamanho-superfície das partículas.

O estudo conduzido por Halt e Kawatra (2017) investigou como coagulantes, modificadores de pH e dispersantes afetam a floculação de concentrados de hematita. O estudo demonstrou que amido e outros componentes orgânicos podem aumentar a coesão entre as partículas, resultando em pelotas mais resistentes e com menor geração de poeira. Os autores destacaram que o controle do potencial zeta por meio de aditivos pode melhorar significativamente as propriedades das pelotas, enfatizando a relação entre a carga superficial das partículas e a formação de aglomerados. O trabalho contribui para compreender como as interações entre partículas podem ser manipuladas para otimizar a qualidade das pelotas de minério de ferro.

O método mais comum para determinar a velocidade de atrito em túneis de vento é ajustar os dados do perfil de escoamento livre usando a Lei Logarítmica de Parede. A parametrização do efeito da umidade e das características do solo na velocidade de atrito limite foi desenvolvida por diversos autores, destacando-se as metodologias de Shao *et al.* (1996) e de Fécan *et al.* (1999), amplamente reconhecidas e utilizadas em modelos numéricos atuais de emissão de poeira. A seguir, serão revisados, em ordem cronológica, os trabalhos que formaram a base do conhecimento atual sobre a determinação da velocidade limite.

Bagnold (1941) descreveu a velocidade de atrito limite para partículas de mesma dimensão em superfície seca e desprotegida, definindo-a como o equilíbrio entre as forças aerodinâmicas de arrasto e as forças gravitacionais. Sua formulação estimou adequadamente a velocidade limite para partículas em torno de 100 μm , mas

não identificou a velocidade mínima para partículas menores que 75 μm , nem os subsequentes aumentos da velocidade com a redução do tamanho das partículas.

Gillette (1978) realizou ensaios em túnel de vento com seção aberta, simulando a camada limite turbulenta sobre solos naturais, secos e perturbados, contendo elementos não erodíveis e agregados de diferentes tamanhos, para determinar as velocidades de atrito limite associadas a cada tipo de solo. A velocidade de escoamento foi medida ao longo da altura z com tubo de Pitot e ajustada pela Lei Logarítmica de Parede, enquanto as velocidades-limite foram identificadas visualmente a partir da velocidade de atrito que gerava movimento contínuo de partículas. A análise dos três solos testados evidenciou a influência da distribuição granulométrica superficial e da presença de elementos não erodíveis, mostrando que a velocidade de atrito necessária para iniciar a erosão eólica em solos com maior quantidade desses elementos é maior do que em solos com menor quantidade.

Greeley e Iversen (1987) ajustaram a equação de Bagnold proposta em 1941, inserindo o efeito das forças aerodinâmicas de sustentação e forças de coesão, chegando à Equação 3.1:

$$u_{*t} = A \cdot F(\text{Re}_t) \cdot G(D_p) \cdot \sqrt{g \cdot D_p} \quad 3.1$$

Sendo $F(\text{Re}_t)$ e $G(D_p)$ funções empíricas obtidas pelo ajuste das velocidades de atrito limite medidas no túnel de vento. A equação proposta foi capaz de prever a velocidade limite para todos os tamanhos de partículas, apesar de as duas funções empíricas apresentarem significados físicos de difícil interpretação.

Os modelos apresentados até agora para avaliar a velocidade limite desconsideram as forças que atuam sobre as partículas em função da umidade.

Mckenna-Neuman e Nickling (1989) elaboram um modelo para a velocidade limite, e também levam em consideração o peso da partícula, forças coesivas (forças capilares) e a velocidade de atrito, conforme as Equações 3.2 e 3.3:

$$u_{*t} = u^* \cdot \sqrt{1 + \alpha \cdot C_o} \quad 3.2$$

$$C_o = \frac{F_c}{P_g} \quad 3.3$$

Onde:

C_o : Número de coesão adimensional;

P_g : Peso da partícula; e

α : Constante geométrica (≈ 3).

Shao e Lu (2000) propuseram a Equação 3.4 para estimar a velocidade de atrito limite, mais simples que a proposta por Creeley e Iversen (1987), com a mesma efetividade, incluindo o efeito das forças de coesão interparticulares: forças de van der Waals e forças eletrostáticas:

$$u_{*t} = \sqrt{A_N \cdot \left(\sigma_p \cdot g \cdot D_p + \frac{\gamma}{(D_p \cdot \rho)} \right)} \quad 3.4$$

Onde:

A_N : Efeito das forças de coesão interparticulares (0,0123);

ϵ : Coeficiente empírico de ajuste ($3 \times 10^{-4} \text{ kg/s}^2$).

A equação proposta pelos autores é válida apenas para solos secos e sem cobertura, considerando-se partículas de tamanho uniforme. Segundo Lee e Park (2019), a maioria dos modelos de erosão por efeito do vento utiliza a Equação 3.4.

Apesar do trabalho de Fécan *et al.* (1999) não estar na sequência temporal da revisão apresentada até agora, se diferencia dos demais pela inclusão da influência da umidade e do percentual de argila do solo no equacionamento da velocidade limite proposto por MCKenna-Neuman e Nickling (1989) e Neuman e Sanderson (2008). A parametrização dos fatores acima que modelam o aumento da velocidade limite em função da umidade é dada pelo conjunto de Equações 3.5, 3.6 e 3.7:

$$u_{*tw}/u_{*t} = 1 \text{ para } w < w' \quad 3.5$$

$$u_{*tw}/u_{*t} = [1 + 1,21 \cdot (w - w')^{0,68}]^{0,5} \text{ para } w > w' \quad 3.6$$

$$w' = 0,0014 \cdot (\% \text{argila})^2 + 0,17 \cdot (\% \text{argila}) \quad 3.7$$

Onde w' representa a umidade adsorvida.

Dong *et al.* (2007) propuseram um modelo matemático empírico (Equação

3.8) para a velocidade limite em solos úmidos, no qual a relação entre a velocidade e a umidade é expressa por meio da determinação de três coeficientes, obtidos a partir de experimentos. A equação proposta baseia-se no modelo de Bagnold, apresentado em 1941.

$$u_{*tw} = \left[\gamma^* \cdot \sqrt{\left(g \cdot D_p + \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)} \right] \cdot (1 + 0,5 \cdot \lambda \cdot w^{k^*}) \quad 3.8$$

Onde γ^* , λ , k^* são parâmetros de ajuste adimensionais.

Os coeficientes foram determinados experimentalmente em túnel de vento, demonstrando que o modelo descreveu adequadamente as velocidades de atrito limite em solos úmidos. Os valores obtidos para os coeficientes ajustados foram: $\gamma^* = 478,20$, $\lambda = 0,16$ e $k = 1,52$.

Usando o aparato experimental descrito por Funk *et al.* (2008), Aimar *et al.* (2012) avaliaram a emissão de poeira de diferentes tipos de solo sob diferentes níveis de umidade. A análise por regressão linear, aplicando o conceito de umidade crítica, mostrou que a emissão de PM₁₀ diminui linearmente com o aumento da umidade nos solos de base orgânica, enquanto, nos solos arenosos, a redução ocorre apenas a partir de uma umidade específica. Os autores concluíram que solos arenosos possuem quantidade limitada de material particulado fino disponível antes da secagem completa e, de acordo com estudos anteriores, maiores umidades resultaram em maiores velocidades de atrito limite. O estudo indica que, quanto maior a quantidade de material orgânico no solo, menor será o impacto da umidade na redução das emissões de PM₁₀.

A influência da umidade na velocidade limite é bem documentada, porém, sua magnitude varia consideravelmente. Belly (1964) identificou uma evolução logarítmica da velocidade limite com a umidade, enquanto Hotta *et al.* (1986) encontraram uma relação linear. Dong *et al.* (2007) atribuíram essa discrepância à evaporação das amostras durante os testes no túnel de vento.

O desenvolvimento de um modelo de predição de erosão eólica passa pela experimentação em túnel de vento, pois pode fornecer condições de vento padronizadas e permitir que um grande número de medições seja realizado em um período relativamente curto e que os modelos sejam verificados.

Um aspecto crítico e fundamental para o controle da emissão de poeira em

vias é o conhecimento do fator de emissão associado. Tsai e Chiou (2001) construíram um túnel de vento para medir fatores de emissão sob diferentes condições de aceleração do vento. Foram usadas amostras de solo de duas vias não pavimentadas, que foram peneiradas para remover partículas maiores que 44 µm e completamente secas. Os resultados mostraram uma forte dependência dos fatores de emissão em relação às variações de aceleração testadas. Os resultados mostram que a variação da aceleração não impacta significativamente a velocidade limite.

Shao *et al.* (1996) desenvolveram um modelo de avaliação de erosão eólica (WEAM - *Wind Erosion Assessment Model*), com a proposta de diferenciá-lo dos modelos empíricos, que incorpora propriedades físicas, como umidade, cobertura vegetal e rugosidade superficial, além de fatores atmosféricos e de sua interação com o processo de erosão, especialmente quanto aos efeitos na velocidade de atrito limite. O modelo proposto se concentra na emissão de particulado em condições de solo específicas, não aborda o transporte de particulado de longas distâncias e também não considera os efeitos da mudança das características do solo ao longo do processo erosivo. O modelo foi testado tanto em túnel de vento quanto por meio de observações de campo. Apesar de o modelo ter apresentado excelente aderência aos experimentos realizados em túnel de vento, nas observações de campo com dados reais, foi capaz de prever os principais processos de erosão, mas permanecem algumas incertezas acerca dos efeitos da evolução das características do solo ao longo do processo erosivo.

De acordo com Fécan *et al.* (1999), modelos de emissão que consideram a influência da velocidade do vento e das características da superfície têm sido desenvolvidos para aplicação em larga escala. Esses modelos têm sido validados em experimentos realizados em túnel de vento, demonstrando capacidade de estimar a emissão de poeira em escala temporal e espacial. Para tornar esses modelos ainda mais precisos em regiões semiáridas, os autores propuseram a parametrização da influência da umidade decorrente da sazonalidade das chuvas sobre a velocidade limite. Para tanto, inseriram os parâmetros de umidade e percentual de argila na composição do solo no modelo de McKenna-Neuman e Nickling (1989), que relaciona o aumento da velocidade de atrito limite a solos arenosos.

Munkhtsetseg *et al.* (2016) estudaram experimentalmente a relação entre a umidade do solo e a velocidade de atrito limite e a intensidade de emissão de poeira. O experimento foi realizado em solo arenoso, com cobertura vegetal, em condições

naturais. A determinação da velocidade limite foi realizada com um contador de partículas, observando-se o ponto a partir do qual o fluxo de emissão aumentou rapidamente e de forma contínua. Os achados confirmam outros resultados de pesquisas semelhantes, publicados na literatura, de que a umidade exerce influência direta sobre a velocidade limite e a intensidade de emissão. A metodologia aplicada nesse trabalho chama a atenção para o fato de os testes terem sido realizados em solo em condições naturais.

Wu *et al.* (2019) estudaram a emissão de partículas PM₁₀ em túnel de vento para diferentes tipos de solo (sem perturbações), com o objetivo de desenvolver uma metodologia para determinar a taxa de emissão de poeira e identificar os principais mecanismos de emissão. Os resultados mostraram que as emissões não dependem apenas das características do solo, mas também da velocidade de atrito. Os autores reforçaram achados anteriores de que a emissão de PM₁₀ em grandes volumes pode ocorrer por meio do arrasto aerodinâmico antes que a velocidade de atrito limite para iniciar o *saltation* seja atingida. O estudo conclui que o arrasto aerodinâmico pode ser o mecanismo dominante de emissão de poeira em grande escala, especialmente em regiões áridas e semiáridas, não sendo um pré-requisito para a ocorrência de ventos fortes, mas sim de ventos de baixa intensidade e alta frequência.

Yulevitch *et al.* (2020) avaliaram, em seu artigo, a emissão de particulados em vias não pavimentadas, com foco na variação de silte por meio de testes em laboratório em um túnel de vento, integrados a um modelo numérico de dispersão de particulados na atmosfera. Consideraram, nos estudos, apenas a poeira emitida pela ação do vento, desconsiderando o efeito dos veículos como contribuintes das emissões, na mesma linha de pesquisa adotada por Katra (2019).

Os autores comparam os resultados de emissão obtidos com o túnel de vento com as emissões calculadas a partir dos coeficientes de emissão da AP-42 e concluem que o fluxo de MP, nos testes com o túnel, aumentou de acordo com o aumento do percentual de silte; entretanto, o modelo da AP-42 não foi capaz de prever o fluxo de MP causado pelo vento com precisão. Sugerem, então, que é necessária a combinação das equações da AP-42 com a erosão eólica natural, para estimar com precisão o total de emissões em vias não pavimentadas.

De acordo com a U.S. EPA (2006), os fatores de emissão foram desenvolvidos ao longo do tempo por meio de regressão linear múltipla e têm mostrado consistentemente que a quantidade de silte (< 63 µm) é crítica para estimar as

emissões, especialmente em solos secos. Entretanto, continua explicando que outras variáveis também são importantes. Por exemplo, em áreas industriais, onde caminhões de transporte (*haul trucks*) e outros equipamentos pesados são comuns, as emissões estão altamente correlacionadas ao peso dos veículos. Por outro lado, há muito menos variabilidade nos pesos dos carros e picapes que normalmente trafegam em vias não pavimentadas, e para essas vias, o teor de umidade do material da superfície pode ser mais determinante para estabelecer diferenças nos níveis de emissão.

Kavouras *et al.* (2016) investigaram os fatores de emissão de poeira (PM₁₀) em vias não pavimentadas na região semiárida entre os EUA e o México, com o objetivo de estimar os fatores de emissão de PM₁₀, avaliar a variabilidade ao longo do tempo e comparar as emissões oriundas do centro e das laterais das vias. Foi utilizado o sistema móvel *TRAKER* (*Testing Re-entrained Aerosol Kinetic Emissions from Roads*), instalado em um veículo, que mede continuamente as concentrações de PM₁₀ atrás dos pneus dianteiros. A metodologia utilizada apresenta a vantagem em relação à proposta da U.S. EPA (AP-42), ao considerar os fatores de emissão de particulados que variam no tempo e no espaço. Observou-se uma forte dependência dos fatores de emissão de PM₁₀ em relação à velocidade do veículo, à composição do solo e à disponibilidade ilimitada de material particulado. Os resultados do estudo destacam uma forte variabilidade espacial e temporal dos fatores de emissão de PM₁₀, de forma que uma alta resolução espaço-temporal nos estudos de emissões permite um controle mais eficaz das emissões

Zhao *et al.* (2017) realizaram estudos de campo para avaliar e caracterizar a emissão de particulados em duas vias não pavimentadas, utilizando oito diferentes tipos de amostradores convencionais (gravimétricos) e um protótipo de amostrador em tempo real. Quando comparados os resultados do amostrador protótipo com os dos amostradores convencionais, a conclusão foi que os convencionais sofrem influência direta da direção do vento nos resultados de leitura, podendo não capturar partículas maiores. Com os resultados dos dados coletados em campo pelos diferentes equipamentos, foi possível obter medições de massa e distribuição de tamanho de poeira fugitiva em um amplo intervalo de tamanho, variando de 0,5 a 75 µm.s

Le Vern *et al.* (2020) investigaram as emissões de poeira em vias não pavimentadas, que sofrem degradação por ação do tráfego de veículos. Os autores

caracterizaram experimentalmente a degradação do solo compactado por meio de uma roda em um simulador de tráfego de veículos. Em seguida, o solo degradado foi ensaiado em um túnel de vento para obter as velocidades de atrito, bem como determinar a distribuição do tamanho do particulado emitido. Para ambos os casos foram criados modelos matemáticos. Os resultados obtidos foram implementados no modelo de Shao (2009) para estimativa da emissão de poeira. O estudo concluiu que é fundamental incorporar, no modelo analítico, a turbulência gerada na esteira dos caminhões, os fatores ambientais e o cisalhamento direto dos pneus para obter modelos de emissão de poeira precisos.

Le Vern *et al.* (2022) investigaram os efeitos da degradação da superfície do solo e do momento (kg.m.s^{-1}) dos veículos nas emissões de poeira e na redução da visibilidade em vias não pavimentadas. Uma das principais motivações foi abordar as limitações dos modelos existentes, que não consideram a degradação progressiva do solo decorrente do tráfego e não caracterizam adequadamente as superfícies, limitando-se ao teor de silte. A metodologia empregou experimentos em pistas de asfalto, nos quais quatro tipos de granulometria (argila verde e três solos siltosos) foram espalhados com diferentes massas por unidade de área para simular vias não pavimentadas em diferentes estados de degradação. Três veículos distintos foram usados, com velocidades de 30, 45 e 60 km/h. A concentração de massa de partículas suspensas (PM_{10}) e as condições de visibilidade foram avaliadas.

Os resultados indicaram que os fatores de emissão de PM_{10} aumentam linearmente com o momento do veículo. Entretanto, esse critério, sozinho, não é suficiente para caracterizar o potencial de emissão, pois a presença de para-lamas pode reduzir significativamente as emissões, e o arrasto aerodinâmico também pode influenciar. Foram enfatizadas a influência e importância de considerar o estado de degradação da superfície do solo em modelos de emissão.

Além de Chepil (1956), já citado nesse texto, diversos autores estudaram a influência da umidade como forma de reduzir a erosão eólica.

Watson *et al.* (2000) demonstraram que a umidificação do solo era uma estratégia altamente eficaz para reduzir as emissões de poeira em canteiros de obras. No entanto, os pesquisadores alertaram que o excesso de umidade resultava em um problema secundário: o material do solo passava a aderir aos veículos, facilitando seu transporte para outras áreas. Perceberam também que o acréscimo de água diminuía a formação de poeira até um limite, depois desse, não havia mais influência. Com o

avanço dos estudos, eles notaram que ao acrescentar água, o material já umidificado formava uma membrana elástica pela interação do líquido com o sólido, e o líquido agia como uma película protetora. Essa ação do líquido em meio ao sólido ficou conhecida como ação capilar.

Flocchini *et al.* (1994) identificaram que a adição de água para elevar o teor de umidade da superfície de 0,56 % para 2 % pode resultar em uma redução superior a 86 % nas emissões de PM₁₀.

Liu *et al.* (2020) investigaram o desprendimento de partículas do solo sob a influência de pontes líquidas. Em geral, estudos anteriores avaliavam a remoção de partículas desconsiderando essas pontes ou tratando-as como estruturas rígidas. Os autores realizaram experimentos com partículas de sílica e de gelo e, com base nos resultados, propuseram um modelo matemático para estimar a velocidade necessária para iniciar o movimento de uma partícula submetida às forças de adesão interparticulares.

O modelo desenvolvido conseguiu representar os efeitos da deformação das pontes líquidas induzida pelo escoamento, além de incorporar as forças hidrodinâmicas (arrasto e sustentação) associadas ao desprendimento. Adicionalmente, o modelo considerou as forças adesivas laterais decorrentes da deformação dessas pontes. Em conjunto, o estudo contribui para compreender como a umidade pode aumentar a coesão entre partículas e, assim, reduzir a suscetibilidade do solo à erosão eólica.

Gholami *et al.* (2020), em uma pesquisa sobre o impacto do material particulado na saúde de trabalhadores de uma pedreira, reforçam que a pulverização de água ou de soluções supressoras de poeira por bicos de spray gera gotas que capturam partículas de poeira no ar. As gotas de água aumentam o peso das partículas de poeira, fazendo com que se aglutinem e caiam no solo, removendo-as da zona de respiração dos trabalhadores.

Além da umidade do solo, a umidade relativa do ar (UR) no ambiente exerce influência importante sobre os processos de erosão eólica. Mesmo em experimentos realizados em túnel de vento em laboratórios, a temperatura ambiente e a UR variam, o que influencia os resultados. É importante monitorar esses dois parâmetros para ajustar os experimentos.

Nesse sentido, Neuman e Sanderson (2008) realizaram estudos em túnel de vento, com partículas de tamanhos uniformes (75 µm, 125 µm e 210 µm) variando a

UR de 15 % a 80 %, e a velocidade limite foi identificada visualmente. Os resultados confirmam achados anteriores de que baixos níveis de UR têm forte influência sobre a emissão de partículas (BELLY, 1964; RAVI e D'ODORICO, 2005). Essa relação foi demonstrada por meio da criação de um modelo analítico que considera apenas a quantidade de água entre as partículas para estimar as forças entre elas e a velocidade limite.

Com base na breve revisão realizada neste capítulo, observa-se que tanto a umidade do solo quanto a UR do ar influenciam a emissão de material particulado. Nesse sentido, a integração dos diversos mecanismos que regulam a umidade com variáveis meteorológicas e operacionais de processo enriquece os modelos de emissão de poeira a serem estudados.

Apesar de a água ser amplamente usada como forma de suprimir a poeira, em grandes indústrias com grandes operações de mineração a céu aberto, os custos envolvidos na supressão podem ser extremamente altos.

Um exemplo muito comum de alto custo envolvido em operações na indústria diz respeito à supressão de poeira em vias não pavimentadas utilizadas para o transporte de minério. Outro problema comum é que, à medida que a água evapora, aplicações frequentes são necessárias para manter a alta eficiência da água pura como supressor, o que é uma desvantagem significativa e pode comprometer o uso sustentável dela (NYLEN e SHEEHAN, 2021).

Uma das formas de reduzir os custos, racionalizar o uso da água e aumentar a eficiência de supressão é a utilização de supressores em meio aquoso (ZHANG *et al.*, 2022). Os diversos aspectos dos mecanismos de ação dos supressores de poeira, seja através da higroscopicidade ou da capacidade de aglomeração, foram discutidos em capítulos anteriores.

Para obter sucesso na supressão de poeira utilizando supressores em meio aquoso, algumas perguntas precisam ser respondidas, quais sejam: qual a composição química, concentração, dosagem e forma de aplicação de um determinado supressor em um determinado processo industrial? Para responder a essas questões, diversos autores têm estudado as características das fontes emissoras de poeira e dos agentes químicos que podem ser usados como supressores.

Epps e Ehsan (2002) realizaram testes em laboratório com três tipos de agregados de solo, tratados com água e três supressores de poeira, com o objetivo

de avaliar sua resistência à erosão por vento e ao tráfego de veículos. As amostras foram submetidas a uma velocidade de vento de 32 km/h. Em um segundo teste, as amostras foram submetidas a 1.500 ciclos de tráfego simulado. Para simular a degradação do solo por ação do tráfego de veículos, foi construído um dispositivo com uma roda que exercia determinada pressão sobre os corpos de prova durante os movimentos. As seguintes variáveis foram consideradas nos experimentos: temperatura e tempo de cura do supressor, concentração e taxa de aplicação.

Os resultados obtidos com os supressores aplicados (38 % de CaCl_2 e 30 % de MgCl_2) reduziram significativamente a erosão tanto eólica quanto causada pelo tráfego, em comparação com a aplicação apenas de água ou sem tratamento. Os resultados também sugerem que a eficiência dos supressores está relacionada ao tipo de agregado do solo e que a taxa de aplicação do supressor pode ser função desse parâmetro. Com base nos resultados da pesquisa realizada, a importância da caracterização correta do solo, antes da definição do supressor a ser utilizado e das condições de aplicação, é reforçada.

Gulia *et al.* (2018) investigaram os agentes químicos acetato de cálcio e magnésio (CMA), cloreto de magnésio (MgCl_2) e cloreto de cálcio (CaCl_2) no aumento da eficiência da água como supressor de material particulado, podendo ser aplicados individualmente ou combinados. Ressaltam que as características químicas e físicas dos agentes supressores são parâmetros importantes que impactam a eficiência e que as concentrações recomendadas para os supressores são: 4 % - CMA, 30-35 % - MgCl_2 e 32-38 % CaCl_2 . O tempo de efeito dos supressores acima também está relacionado à concentração aplicada: quanto maior a dose, maior o intervalo entre aplicações, segundo os autores. Também reforçam que a quantidade de supressor a ser aplicada após a primeira aplicação é menor, correspondendo a 40 a 50 % da dose inicial. De acordo com a análise teórica realizada, o CaCl_2 se mostrou mais eficaz e de menor custo que os demais em aplicações realizadas na cidade de Delhi.

Omane *et al.* (2018) investigaram a influência de diferentes temperaturas atmosféricas na eficácia de supressores químicos no controle da emissão de poeira em vias não pavimentadas utilizadas no transporte de minério. Neste estudo, a água e os surfactantes químicos selecionados - sal, agentes livres de cloreto, polímeros e melão - foram testados em três temperaturas atmosféricas distintas (35 °C, 15 °C e -19 °C) ao longo de 72 h. Os resultados indicaram desempenhos diferentes em relação às temperaturas ambiente testadas, com a água pura tendo o menor

desempenho, mostrando a forte relação que a temperatura ambiente atmosférica exerce na eficiência dos supressores.

Katra (2019) investigou o desempenho de diferentes supressores em vias pavimentadas, com foco na poeira gerada apenas pela ação do vento, desconsiderando as emissões provenientes do tráfego. Foram testados diversos compostos, tanto sintéticos quanto orgânicos: lignina, resina, betume, polímero sintético (PVA) e salmoura de magnésio (*brine*). Os testes foram realizados tanto em túnel de vento em laboratório quanto em uma via de uma pedreira, utilizando um túnel de vento portátil. Os resultados indicam que a salmoura de magnésio (*brine*) foi especialmente eficaz na redução da poeira gerada pelo vento, alcançando mais de 90 % de redução em condições de vento de alta velocidade, tanto em laboratório quanto em campo, mesmo após o tráfego de caminhões ao longo do tempo. A eficácia do *brine* permaneceu alta por um período prolongado, ao contrário de outros produtos orgânicos (como lignina, resina, betume e PVA), cuja eficácia caiu significativamente após o tráfego contínuo de veículos.

Segundo Gonzalez *et al.* (2019), a água utilizada para supressão de poeira em minas de superfície pode representar até 9 % do consumo total da planta, e 97 % da poeira emitida é proveniente das vias não pavimentadas. O artigo investiga o uso do cloreto de magnésio hidratado como supressor de poeira. A propriedade explorada desse material foi a higroscopicidade, por meio de estudos de laboratório e de campo. O estudo de campo foi conduzido em uma mina de cobre a céu aberto, comparando o consumo de água e as emissões das vias tratadas apenas com água, em comparação com o uso de uma solução de cloreto de magnésio. Os resultados de laboratório mostraram que os solos tratados com a solução apresentaram retenção de água duas vezes maior do que os não tratados. Os resultados de campo demonstraram que, em média, o consumo de água para supressão nas vias tratadas com a solução foi 153 vezes menor do que nas vias tratadas apenas com água. Isso se traduz em uma economia de água de aproximadamente 99 %.

Zhang *et al.* (2022) realizaram uma pesquisa sobre o progresso da performance da água com a adição de agentes químicos, como forma de supressão. Ao final, analisaram as vantagens e desvantagens de cada método. De acordo com os autores, supressores do tipo ligantes ou coesivos (*bonding*) e compostos são mais utilizados em aplicações voltadas à prevenção da emissão de poeira de fontes estáticas, como vias e pilhas, devido à sua excelente propriedade de adesão.

Os biopolímeros à base de polissacarídeos são uma alternativa aos supressores. Sieger *et al.* (2023) avaliaram o potencial de 14 polissacarídeos e proteínas de diversas plantas e animais em dois solos de mineração (um com base de areia e outro com base de sílica-areia). Os ensaios de laboratório mostraram que o tipo de biopolímero e a concentração interferem diretamente na resistência à penetração, na retenção de umidade e na espessura da crosta formada. Foi identificado que as proteínas formam crostas de espessura semelhante à dos polissacarídeos, mas requerem maiores concentrações. Com base nos resultados dos testes, a goma xantana, a carboximetilcelulose, o amido de milho, o concentrado proteico de fava e a proteína plasmática apresentam o maior potencial para atuar como supressores de poeira.

Além da umidade e dos agentes químicos, os elementos não erodíveis absorvem parte do momento transferido da atmosfera para a superfície e reduzem a força de cisalhamento sobre as partículas móveis. Esses elementos de rugosidade podem ser tanto vegetação (viva ou morta) quanto frações de solo não erodíveis. Diversos trabalhos têm mostrado que a presença de elementos não erodíveis no solo ajuda a prevenir a erosão eólica, por meio do aumento da velocidade limite (GILLETTE, 1978; SHAO *et al.*, 1996).

Uma das maneiras de evitar que as poeiras fugitivas se tornem suspensas é o uso de barreiras contra o vento (*wind fences*), mecanismos que reduzem a velocidade do vento abaixo da velocidade crítica, evitando que as poeiras fugitivas entrem em suspensão. Esses mecanismos devem ser instalados junto às fontes geradoras.

Depois que as partículas entram em suspensão, as *wind fences* não são mais eficientes e devem-se usar as chamadas barreiras contra a poeira (*dust fences*), que têm como objetivo abater o material particulado que já está em suspensão. Esse tipo de sistema geralmente fica a jusante das fontes geradoras ou é enclausurado.

Brantley *et al.* (2014) estudaram o efeito da presença de uma barreira de plantas ao longo de uma via sobre a concentração de MP e de carbono negro (CN) nas vizinhanças, atuando como uma *dust fence*. Os resultados indicaram forte dependência da direção do vento e da hora do dia nas concentrações de BC, entretanto, não houve alterações significativas nas concentrações de MP nos estudos realizados. Os resultados também sugerem que a largura e o arranjo da *dust fence* interferem nos resultados. Os resultados obtidos vão de encontro a alguns autores

que afirmam que não há um consenso sobre se as *wind fences* realmente reduzem a emissão de poeira, ou se eventualmente até pioram os níveis de emissão, especialmente a montante da fonte geradora.

A eficiência do sistema de quebra-vento também foi relacionada ao seu arranjo e às estruturas, em estudos realizados por ŘEHÁČEK *et al.* (2017). Os autores monitoraram a velocidade do vento ao longo das barreiras contra o vento em quatro pontos distintos, utilizando anemômetros. As características do quebra-vento foram descritas por meio de fotogrametria terrestre, por meio da porosidade óptica, no momento das medições. Os resultados indicam uma dependência significativa entre o valor da porosidade óptica e a eficiência do quebra-vento. Foi comprovado um efeito significativo do quebra-vento na redução do fluxo de ar no lado de sotavento (*leeward*) do quebra-vento, em uma faixa correspondente a aproximadamente seis vezes a altura dos quebra-ventos, dependendo da porosidade óptica.

3.2. ESG aplicado à gestão de material particulado

De acordo com o relatório anual de 2023 da Ernst & Young sobre os dez principais riscos para os negócios de mineração no mundo, o risco associado a ESG ficou no topo pelo terceiro ano consecutivo. Sendo que a principal preocupação dos investidores nas operações das mineradoras foi o impacto nas comunidades locais (64 % dos investidores consultados apontaram esse aspecto), sendo o manejo de recursos hídricos o terceiro aspecto de maior preocupação (ERNEST YOUNG, 2023).

Olhando para o relatório emitido em 2024 pela mesma entidade sobre os principais riscos da mineração para o ano de 2025, e o tema da gestão ambiental apareceu em segundo lugar na lista dos dez principais riscos, superando o aspecto de ESG, que não apareceu na lista. É importante observar que o manejo dos recursos hídricos voltou a figurar como aspecto de destaque no risco (BCB, 2025).

As práticas de ESG estão diretamente ligadas à gestão do MP de uma indústria, especialmente na mineração. Os três pilares (*Environmental, Social and Governance*) possuem interação direta e indireta com o tema de gestão de poeira (FIKRU *et al.*, 2024; FROES e ARAUJO, 2025).

O primeiro pilar, *Environmental*, de acordo com Berryman *et al.* (2024), apresenta claros sinais da relação com a emissão de poeira em mineradoras. Ainda que as frações de poeira emitidas pelas fontes geradoras não sejam inaláveis ou respiráveis, podem impactar a qualidade de vida das comunidades vizinhas às áreas

de mineração, causando desconfortos no dia a dia .

De acordo com Komnitsas (2020), o segundo pilar, *Social*, é crítico no que se refere à poluição atmosférica causada pela poeira, pois impacta diretamente a Licença Social de Operação (*Social License to Operate*, SLO) de uma mineradora. O MP, em muitas ocasiões, é visível a olho nu, de forma que a população o observa se acumulando nos lares, veículos e plantas e começa a questionar se não se trata de uma ameaça grave e iminente para a família.

Essa exposição da poeira, torna-se então um símbolo de desrespeito corporativo para com os moradores, ocasionando o início dos conflitos (HIGGINBOTHAM *et al.*, 2010; WRIGHT *et al.*, 2014), e a partir desse ponto, podem iniciar as perdas financeiras, com as interrupções das operações como forma de protesto, perda da licença social, exposição negativa na mídia, pressões políticas e em última instância perda das licenças formas de operação (KAMENOPOULOS e AGIOUTANTIS, 2021). Com base nisso, se não bastassem os argumentos de saúde e meio ambiente para embasar a preocupação com o controle e a supressão de MP, há um risco operacional e financeiro elevado associado e, portanto, estamos, sim, falando sobre dinheiro.

O terceiro pilar, *Governance*, diz respeito à forma como a empresa monitora, reporta e gerencia os riscos não financeiros. De acordo com Gao *et al.* (2021) , uma gestão eficiente do MP de uma mineradora depende fortemente da resposta de uma estrutura robusta e atuante de governança corporativa. Além de garantir a conformidade com todas as legislações pertinentes (HIGGINBOTHAM *et al.*, 2010), a transparência e a divulgação dos dados relativos à emissão e ao controle de particulados estão no escopo da governança de uma mineradora. O gerenciamento da poluição atmosférica não pode ser tratado como uma tarefa operacional de baixo nível; deve ser reconhecido como um risco material, podendo representar uma ameaça ou uma oportunidade, que deve ser ativamente supervisionado nos níveis mais altos da organização (GAO *et al.*, 2021).

Para traduzir essa governança em ação eficaz, as empresas podem adotar estruturas sistemáticas de gerenciamento de riscos, por exemplo, a Hierarquia de Controles. Essa estrutura prioriza as medidas de controle mais eficazes e confiáveis em uma ordem específica. Essa abordagem, que é exigida por alguns regulamentos de mineração, exige que as empresas primeiro tentem eliminar o perigo, depois o substituam por algo mais seguro, depois usem controles de engenharia para isolar as

peças dele, seguidos por controles administrativos (regras e procedimentos) e, finalmente, como último recurso, confiando em Equipamentos de Proteção Individual (EPI) (QUEENSLAND GOVERNMENT, 2017).

A literatura enfatiza que, como a poeira fugitiva é difícil de controlar e seus impactos são generalizados e imprevisíveis, a estratégia de uma empresa para gerenciar essas emissões é um forte indicador de seu compromisso com os pilares ambiental e social do ESG. Chama a atenção também que investidores e partes interessadas devem examinar como as empresas abordam a poeira fugitiva, pois o mau gerenciamento pode levar a danos reputacionais significativos e ameaçar a licença social de uma empresa para operar, especialmente em setores com alto potencial de impactos fora do local (COHEN, 2023).

As divulgações de ESG e as avaliações de risco destacam cada vez mais os riscos ambientais e sociais, incluindo aqueles decorrentes da poeira fugitiva, como fatores críticos que influenciam a reputação corporativa, a confiança dos investidores e a estabilidade financeira de longo prazo.

Uma estrutura mais avançada que está ganhando força no setor é o Gerenciamento de Controle Crítico (CCM). Conforme ensina ICMM (2015), em vez de tratar todos os procedimentos de segurança como igualmente importantes, o CCM se concentra em identificar o punhado de controles críticos que são absolutamente essenciais para evitar um evento de grandes proporções. A estrutura então coloca foco na verificação de que esses poucos controles críticos são projetados corretamente, estão funcionando conforme o esperado em todos os momentos e têm linhas claras de responsabilidade. Essa abordagem vai além da simples conformidade para um estado de gerenciamento de risco ativo e verificado, que é uma marca registrada de uma governança forte.

Salnikov *et al.* (2024), em uma recente publicação, chamaram a atenção para o papel dos princípios de ESG na gestão da qualidade do ar de uma mina de chumbo-zinco (Pb-Zn). Destaca a importância da mineração usar os princípios para avaliar se existem riscos não financeiros (no caso, materializados como ameaças) que possam comprometer a alavancagem de capital, obtenção de licenças operacionais, desempenho dos ativos, licenças sociais. Os autores estudam o caso da implantação de uma planta de processamento de Pb-Zn. Identificaram o risco de poluição atmosférica por material particulado na forma de poeira, dadas as condições ambientais locais e a possibilidade de potencialização dos perigos associados aos

poluentes existentes na atmosfera, pela ação da intensa radiação solar do local, gerando substâncias perigosas secundárias. Ao todo, foram identificados 15 agentes com potencial de poluição do ar através da análise preliminar de riscos. Na segunda parte do estudo, se debruçaram sobre o sistema de gerenciamento da qualidade do ar da empresa e concluíram que o sistema está alinhado com os princípios de ESG, chamando a atenção para a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade do ar na região.

De acordo com Fu *et al.* (2024), o primeiro pilar do ESG engloba aspectos ambientais diretos e indiretos. Os aspectos diretos estão ligados à emissão de poluentes, ao ruído, ao manejo da água, ao manejo de resíduos, por exemplo. Os aspectos indiretos estão tomando cada vez mais importância, devido ao conceito de ciclo de vida de um produto, serviço ou investimento. Ou seja, não basta tratar apenas do processo ou produto em si, mas também deve-se incluir na análise de ESG as relações com os fluxos de energia e materiais, que suportam a cadeia produtiva. Aspectos indiretos estão relacionados, geralmente, com partes envolvidas na cadeia produtiva do negócio.

Aspectos ambientais indiretos em relatórios de ESG foram alvo de estudos de Kozakiewicz (2025). Os pesquisadores apresentaram uma estrutura para identificar e descrever aspectos indiretos em três principais grupos: (1) Ciclo de vida e cadeia de suprimentos; (2) Competência e tecnologia; e (3) Integração e engajamento da comunidade.

A estrutura proposta também possibilita identificar não somente potenciais impactos negativos, mas também impactos indiretos positivos. Isso ocorre quando há emissão dos relatórios ESG, em que os aspectos ambientais indiretos identificam efeitos mais amplos das operações de mineração, como as emissões da cadeia de suprimentos, as colaborações tecnológicas e as iniciativas de engajamento com a comunidade. Os autores reforçam que, ao identificarem e gerirem os aspectos indiretos, pode ocorrer o fortalecimento das relações com as comunidades locais e demais *stakeholders*, promovendo a confiança e reforçando a licença social de operação. Um dos aspectos ambientais indiretos que a estrutura proposta identifica é a intensidade do uso da água nas operações. Por exemplo, controlar o consumo de água com um indicador, por exemplo: m^3 de água usada por tonelada de produto produzido ($m^3_{\text{água}} / t_{\text{produzida}}$).

Froes e Araujo (2025) apresentam um estudo de caso de sucesso relacionado

a um modelo de sustentabilidade corporativa, que integra Operações, Meio Ambiente e a Gestão Social, aplicado em Moatize, Moçambique. Além do cumprimento das normas e boas práticas internacionais da mineração, o grande diferencial é a integração e o engajamento das comunidades atingidas pelas operações.

Após a implementação dos controles e o pleno atendimento aos padrões de qualidade do ar, os autores notaram que a percepção de incômodo das comunidades permanecia, e então surgiu a necessidade de ir além dos controles e técnicas de engenharia. Inspirados pelas boas práticas recomendadas pelo IFC (2012), que menciona que as empresas devem ter meios de interagir com as comunidades afetadas para entender e atender às demandas sociais e ambientais, implementaram um modelo de monitoramento participativo, unindo as operações da empresa, o meio ambiente e a comunidade afetada. Os três pilares do modelo foram: (1) monitoramentos ambientais (realizados pelos funcionários); (2) monitoramentos externos (realizados pelos comunitários); e (3) visitas conjuntas e comunicação transparente.

4. METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POEIRA EM LABORATÓRIO

4.1. Descrição geral da metodologia

Com o objetivo de desenvolver e testar uma metodologia para entender os mecanismos de emissão e mitigação de poeira em vias não pavimentadas, as seguintes macroetapas foram propostas (Figura 4.1):

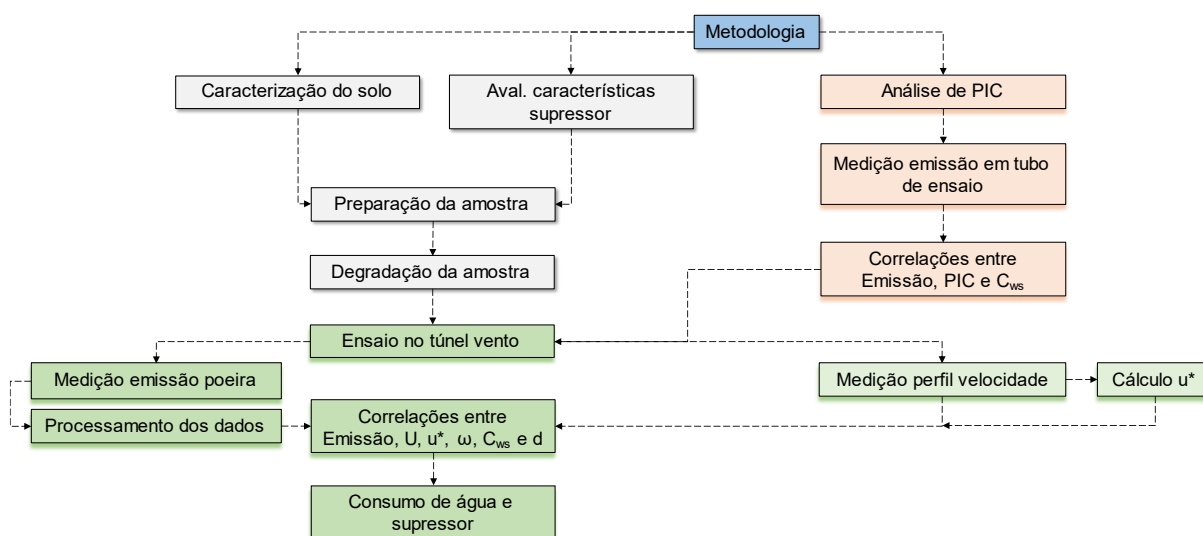


Figura 4.1 - Metodologia proposta para a quantificação das emissões e a avaliação da eficiência dos supressores .

- a) Caracterização do solo;
- b) Análise do ponto isoelétrico de carga (PIC) utilizando o ajuste de pH;
- c) Estudo de emissão em tubo de ensaio e correlação com PIC e C_{ws} ;
- d) Preparação das amostras: ajuste de umidade, compactação e aplicação de supressor;
- e) Degradação do leito do corpo de prova;
- f) Ensaio em túnel de vento;
 - Medição do perfil de velocidades u (m/s);
 - Determinação da velocidade de atrito u^* (m/s) e correlações com: variações da velocidade do vento U (m/s), umidade do solo ω (%); concentração de supressor C_{ws} (%) e dosagem de supressor d (L/m²);
 - Medição da emissão de particulado e correlações com: U ; ω , C_{ws} ;

- e d;
- Medição da concentração média;
- g) Processamento dos dados; e
- h) Cálculo do consumo de água e de supressor para as condições ensaiadas.

Foram realizados, ao todo, 16 ensaios em túnel de vento, considerando as condições e os parâmetros apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Configurações dos ensaios realizados em túnel de vento.

#	ω (%)	U (m/s)	d (L/m ²)	C _{ws} (%)
1	3	8,0	0	0
2	3	12,0	0	0
3	3	16,0	0	0
4	3	20,0	0	0
5	5	8,0	0	0
6	5	12,0	0	0
7	5	16,0	0	0
8	5	20,0	0	0
9	7	16,0	0	0
10	5	16,0	1,75	3
11	5	12,0	1,75	3
12	5	8,0	1,75	3
13	5	16,0	1,75	2
14	5	16,0	1,75	4
15	5	16,0	1,17	3
16	5	16,0	2,33	3

A maior parte dos ensaios da Tabela 4.1 foi conduzida em execução única, sem réplicas, pois a metodologia proposta possui caráter exploratório e visa identificar os parâmetros que influenciam a emissão de material particulado e avaliar tendências e comportamentos gerais do fenômeno. Os ensaios dos números 3, 7 e 9 foram realizados em duplicata.

Foi avaliada a emissão de material particulado, simulando uma via não pavimentada, variando-se os seguintes parâmetros: (a) velocidade do vento; (b) umidade do leito; (c) com aplicação de supressor (CS) e sem aplicação de supressor (SS); e (d) dosagem e concentração do supressor.

Os ensaios foram realizados com corpos de prova de solo degradados. Também foram avaliados a velocidade de atrito e o perfil de velocidades no túnel de vento. Em seguida, realizou-se a análise das incertezas experimentais.

4.2. Caracterização do solo da via

A via estudada na metodologia é composta por solo predominantemente laterítico, construída com controle de compactação. Entretanto, a ausência de pavimentação expõe a superfície a variações de umidade, à ação dos ventos e aos efeitos da degradação decorrentes do tráfego intenso de veículos pesados. Essa exposição mantém constante o processo de geração de material particulado disponível na superfície, com reabastecimento contínuo dos reservatórios de MP, o que favorece a emissão e a ressuspensão dessas partículas.

Ao todo, foram coletados 100 kg de solo, ao longo de uma linha transversal à via, em três pontos diferentes. As amostras foram retiradas de uma seção quadrada de 400 mm de lado e 100 mm de profundidade

Para a caracterização do solo da via não pavimentada, os seguintes ensaios são propostos: (a) granulometria por peneiramento; (b) granulometria por difração laser; (c) massa específica real (picnometria); e (d) massa específica aparente (em função da umidade).

Análise granulométrica por peneiramento

De acordo com a norma ABNT 6457 (2024), para a avaliação da granulometria do solo, a quantidade mínima de massa seca necessária para a realização do peneiramento é função da partícula de maior diâmetro. Para tanto, foi selecionada uma fração da amostra e passada pela peneira de 76,2 mm, desprezando o material retido. Do material passante, foi selecionada uma quantidade de acordo com a dimensão estimada dos grãos maiores, conforme indicado na Tabela 4.2.

O procedimento utilizado para a determinação da granulometria por peneiramento foi adaptado às normas ABNT 6457 (2024) e ABNT 7181 (2025). O peneiramento foi realizado com uma peneira vibratória, com amplitude de vibração de 1 mm, durante 15 min.

Tabela 4.2 - Massa de amostra necessária para análise granulométrica. Fonte: Adaptado de ABNT 6457 (2024).

Dimensões dos maiores sólidos contidos na amostra (observação visual)	Quantidade mínima a ser utilizada
< 5 mm	1 kg
5 mm a 25 mm	4 kg
> 25 mm	8 kg

As frações retidas de material passante nas peneiras são calculadas (Equação 4.1) para determinar os percentuais de peneiramento grosso e fino, o que permite a análise da distribuição granulométrica do material.

$$P_R = \frac{M_R}{MTS} \cdot 100 \quad 4.1$$

Onde:

P_R : Porcentagem retida na peneira (%);

M_R : Massa retida na peneira (g); e

MTS : Massa total seca da amostra (g).

Com a porcentagem retida, foi determinada a porcentagem que passa pela peneira (P_p) utilizando a Equação 4.2:

$$P_p = 100 - \sum P_R \quad 4.2$$

O resultado é a média dos cálculos de duplicatas, com aproximação de centésimos. Foi gerada uma tabela com os dados e foi plotado um gráfico, no qual os diâmetros das partículas são inseridos no eixo das abscissas (em escala logarítmica), enquanto os percentuais de material (passante ou retido) são inseridos no eixo das ordenadas (em escala decimal).

O D_{50} , ou diâmetro mediano, é o tamanho de partícula correspondente a 50 % do passante acumulado (quanto do material passou por aquela abertura de malha) na curva granulométrica obtida pelo peneiramento, em base-massa.

Análise granulométrica por difração laser

O menor diâmetro de partícula que pode ser avaliado no peneiramento é de 53 μm . Com o objetivo de avaliar a fração ultrafina de partículas do solo, realizou-se a granulometria por difração laser, utilizando o equipamento Mastersizer 3000, do fabricante Malvern Panalytical. Essa técnica consiste na medição dos ângulos de difração do raio laser, relacionados ao diâmetro da partícula medida.

Determinação da massa específica aparente

Para compreender como a umidade afeta as amostras de solo que estão sendo estudadas, foi determinada a massa específica aparente (ρ_a).

A massa específica aparente considera o volume total do material, o que inclui tanto os sólidos quanto os espaços vazios (poros) entre eles. Os ensaios foram realizados com um cilindro de aço de volume conhecido. Os ensaios iniciaram com umidade mínima de 0 % e finalizaram após o valor máximo da curva ser atingido, quando se observa a saturação de água no interior do cilindro.

Com os valores das massas obtidos em cada umidade e com o volume conhecido, foi determinada a massa específica aparente através da Equação 4.3:

$$\rho_a = \frac{M_u}{V_c} \quad 4.3$$

Onde:

M_u : massa de material úmido;

V_c : volume do cilindro.

Determinação da massa específica real

A massa específica real (ρ_r) considera apenas o volume dos sólidos, excluindo os espaços vazios (poros). É definida pela relação entre o peso específico da amostra e o da água. Foi utilizado um picnômetro (conforme norma ASTM D854) para tamanhos de particulados menores que 4,75 mm ou 100 % de passantes em malha nº 4 (4.760 μm).

O picnômetro permite determinar, com segurança e boa repetibilidade, a massa específica real de sólidos. É de extrema importância a calibração do picnômetro e a aplicação das correções de temperatura para minimizar possíveis erros no cálculo da densidade. As medições também não devem diferir mais de $\pm 0,02$ em relação à média obtida.

A massa específica real para determinada temperatura durante o ensaio é calculada através da Equação 4.4:

$$\rho_r = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad 4.4$$

Onde:

ρ_r : massa específica real do solo na temperatura do ensaio;

M_1 : peso do picnômetro vazio;

M_2 : peso do picnômetro mais amostra;

M_3 : peso do picnômetro mais amostra mais água;

M_4 : peso do picnômetro mais água.

4.3. Avaliação das características do supressor

Propriedades do supressor utilizado

Para a realização dos ensaios no túnel de vento, foram preparados corpos de prova com supressor aplicado.

O supressor de poeira utilizado é composto por uma mistura de polímeros naturais (lipídios e hidratos de carbono), com propriedades umectantes e retardantes de evaporação. De acordo com o fabricante, atua como um tênue revestimento primário selante. Principais características físico-químicas:

- a) Aparência: líquido castanho;
- b) pH (solução aquosa a 1 % a 20 °C): 5,5 a 7,5;
- c) densidade aparente (23 °C): 1,00 a 1,25 g/cm³;
- d) viscosidade: 100 a 700 cSt;
- e) solubilidade: solúvel em água e insolúvel em solvente orgânico; e
- f) concentração indicada para vias não pavimentadas: 3 %.

Ensaio de tensão superficial do supressor

Foi realizado o ensaio de tensão superficial no supressor estudado, com o objetivo de avaliar sua eficácia em reduzir a tensão superficial da solução aquosa supressora, promovendo maior aderência e cobertura das partículas de poeira.

Para realizar o ensaio, utilizaram-se o procedimento e uma balança desenvolvidos por Reis *et al.* (2015), com base no método da placa de Wilhelmy (Figura 4.2).



Figura 4.2 - Balança para medição de tensão superficial. Fonte: Adaptado de Reis et al. (2015).

Foram testadas, para tensão superficial, as concentrações de 0 a 10 %, com intervalos de 0,5 %.

4.4. Ponto Isoelétrico de Carga (PIC)

Na ausência de um medidor de potencial zeta, empregou-se a técnica de medição do pH para 11 pontos de amostra, adaptada de Regalbuto *et al.* (2004). A técnica consistiu em adicionar 10 g de amostra de solo a 30 mL de solução aquosa, sob 11 diferentes condições de pH inicial, ajustadas com soluções de HCl e de NaOH 0,1 mol/L (Figura 4.3). O pH final da solução foi medido após 24 h de equilíbrio.

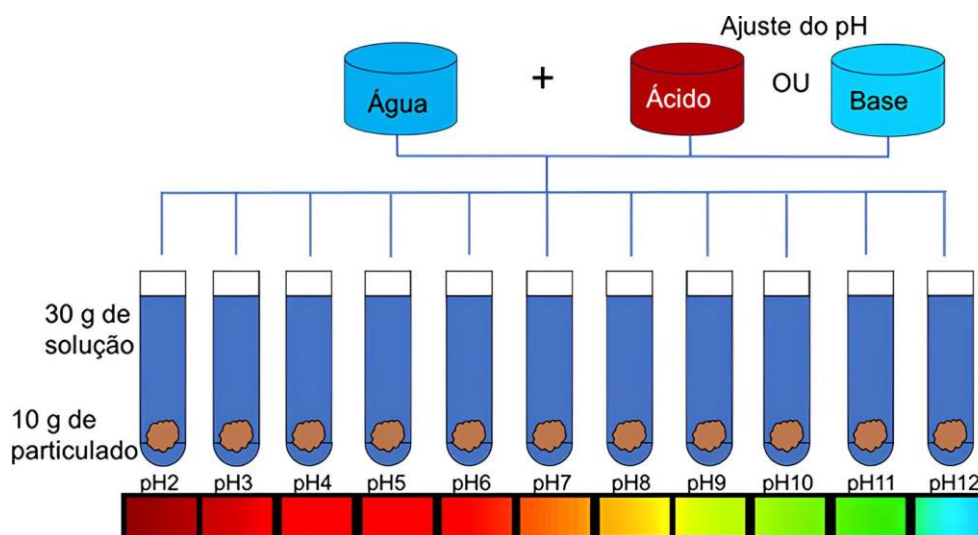


Figura 4.3 - Configuração do ensaio de 11 pontos para determinação do pH inicial.

A metodologia de estudo foi desenvolvida em três etapas: (1) avaliação da influência do pH; (2) avaliação da influência da concentração do supressor; (3) ensaio final com combinação dos melhores parâmetros. Todos os ensaios mencionados na

metodologia foram realizados em triplicata.

Etapa 1: Foi avaliado o PIC (ponto isoelétrico) de uma série de 11 amostras de material particulado em água deionizada (em triplicata), com o pH ajustado para cada amostra utilizando ácido nítrico e hidróxido de potássio. Foram avaliadas amostras com pH entre 2 e 12. O tempo de ensaio foi de 24 h, e o pH foi medido no início e ao final do ensaio. Para identificação do ponto isoelétrico, foram plotados os valores de pH inicial (eixo das abcissas) e final (eixo das ordenadas), e identificou-se o pH em torno do qual ocorreu a menor variação entre o pH inicial e o final (pHi), marcada por uma assíntota horizontal. Ao final do ensaio, no tubo de ensaio em que o pH atingiu o PIC, o particulado terá decantado, deixando o fluido sobrenadante límpido.

Em seguida, foi realizado o ensaio de emissão de poeira em tubo de ensaio, em triplicata, considerando o agente supressor (água), para os seguintes valores de pH: pHi-2, pHi-1, pHi, pHi+1, pHi+2, a fim de obter o pH que emitiu a menor quantidade de poeira (pH*), conforme Figura 4.4.



Figura 4.4 - Ensaio de emissão de poeira em tubo de ensaio na etapa 1.

Etapa 2: Foi investigada a concentração ótima do supressor, por meio da técnica de ensaio de emissão em tubo de ensaio, com água de pH neutro, nas seguintes concentrações de supressor: C_{ws-2} , C_{ws-1} , C_{ws} , C_{ws+1} , C_{ws+2} . Utilizou-se o valor de concentração inicial (C_{ws}) de 3 %, conforme recomendado pelo fabricante. A concentração que emitiu a menor quantidade de poeira (C_{ws}^*) foi determinada, conforme a Figura 4.5.

Etapa 3: Nesta etapa, foram avaliadas as emissões de poeira variando o pH* de 5 a 9 (pH*-2, pH*-1, pH*, pH*+1, pH*+2), com pH* = 7 e concentração C_{ws}^* , obtida

na etapa 2. O resultado da etapa 3 indicou a combinação ideal entre o pH da água (pH^{**}) e a concentração do supressor (C_{ws}^*) para obter a solução supressora de maior eficiência, conforme a Figura 4.6.

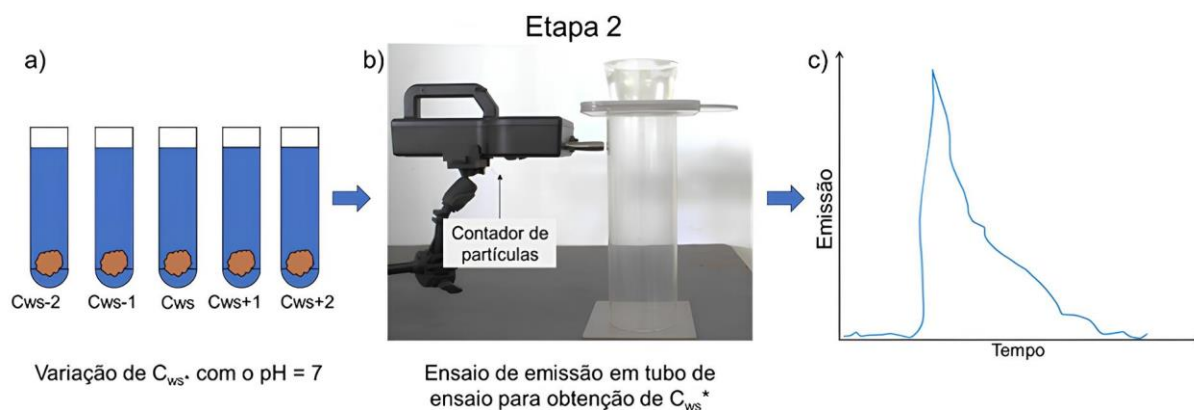


Figura 4.5 - Emissão de poeira em tubo de ensaio na etapa 2.

O ensaio de emissão em tubo de poeira consiste na queda do material a ser estudado de uma altura suficiente para gerar material particulado em suspensão (MACARINGUE *et al.*, 2022). A emissão de poeira é contabilizada por meio de um contador de partículas instalado na parte superior do tubo (Figura 4.7).

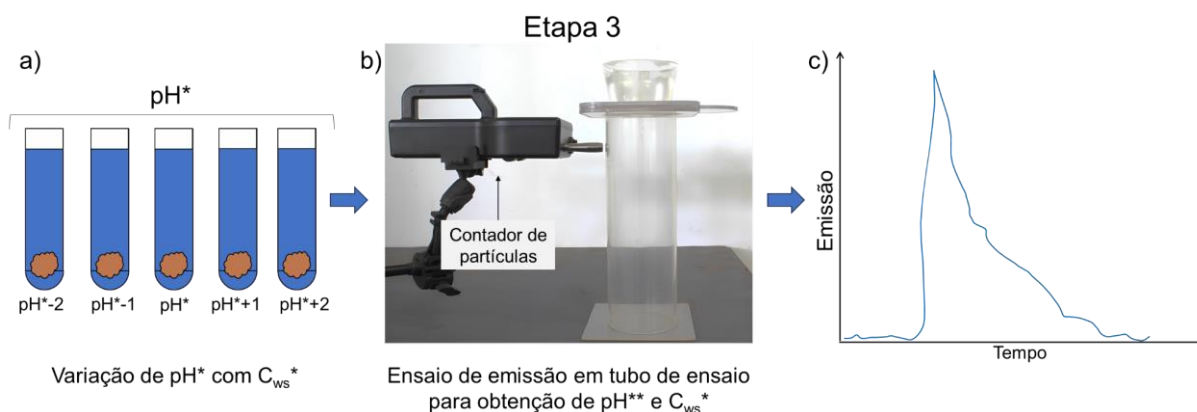


Figura 4.6 - Emissão de poeira em tubo de ensaio na etapa 3.

Embora esse tipo de ensaio seja utilizado para simular a emissão de particulado na transferência do fluxo de minério, como ocorre durante o empilhamento, a retomada da pilha, nos chutes de transportadores de correia e nos viradores de vagão, foi utilizada nessa pesquisa para avaliar o desempenho de soluções supressoras de poeira provenientes de vias não pavimentadas.

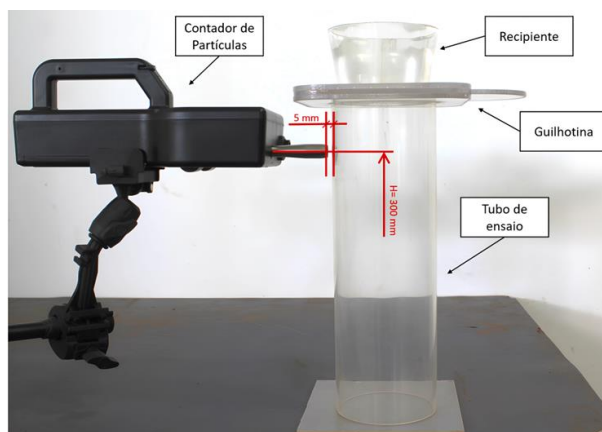


Figura 4.7 - Aparato experimental para ensaio em tubo de poeira.

4.5. Preparação dos corpos de prova

Antes dos ensaios no túnel de vento, os corpos de prova foram preparados. A sequência de preparações e ajustes necessários para os ensaios está resumida na Figura 4.8:

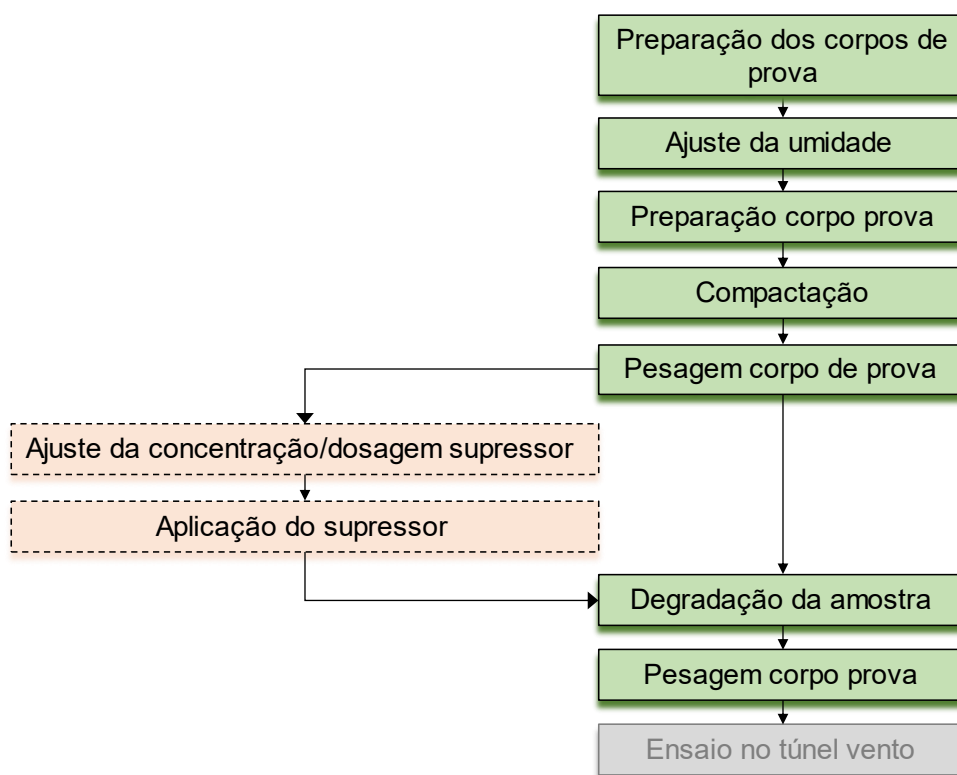


Figura 4.8 - Esquema de preparação dos corpos de prova.

Corte granulométrico

Com o objetivo de remover aglomerados de solo das amostras, realizou-se o corte granulométrico manual, utilizando uma peneira de 2,36 mm. Devido ao elevado teor de umidade do material, a secagem em estufa foi realizada por 24 h, com temperatura entre 100 °C e 105 °C, antes do corte granulométrico. Para confirmar a secagem completa, após as 24 h iniciais, o material foi pesado a cada 1 h, até que não fosse observada variação de massa, adotando-se essa condição como critério de secagem. Esse procedimento foi adotado antes do corte granulométrico, pois a formação de agregados é favorecida em ambiente com alto índice de umidade.

Ajuste da umidade de referência

Após a realização do corte granulométrico, o material a ser ensaiado teve sua umidade ajustada ao valor da umidade de referência (ω). Foi calculada a massa de água (M_a) necessária para atingir a umidade de referência (base seca), utilizando a Equação 4.5.

$$M_a = \omega \cdot M_s \quad 4.5$$

Onde M_s é a massa de material seco.

A umidade em base seca, então, é calculada pela Equação 4.6 e comparada ao valor de referência.

$$\omega (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad 4.6$$

Onde M_u é a massa úmida.

O preparo da amostra úmida foi realizado com um misturador automatizado de velocidade controlável, no qual o material seco é introduzido no aparelho e a água é adicionada gradualmente.

Após a mistura estar homogeneizada, são retiradas três amostras para terem as umidades conferidas e comparadas com a umidade de referência. O restante da mistura é enviado para a realização dos ensaios. A umidade resultante dos ensaios de conferência é denominada umidade medida (ω_m), e a que será utilizada para os cálculos posteriores.

Compactação da amostra

A compactação da amostra seguiu a orientação das normas DNIT (2007a) e DNIT (2007b) estabelecendo uma carga equivalente ao ensaio Proctor, com energia de 55 golpes.

O aparelho Proctor, Figura 4.9, consiste em um molde cilíndrico de aço com aproximadamente 1.000 cm³ de volume, com uma peça de extensão removível (mesmo molde da norma ABNT NBR 7182:2020) e uma ferramenta de compactação guiada por um tubo aberto na parte inferior (o martelo de compactação), com cilindros pequeno e grande, e energias de impacto normal, intermediária e modificada, esta última com 55 golpes. No presente estudo, utilizou-se o cilindro grande com energia modificada, conforme indicado pela norma DNIT (2007b).

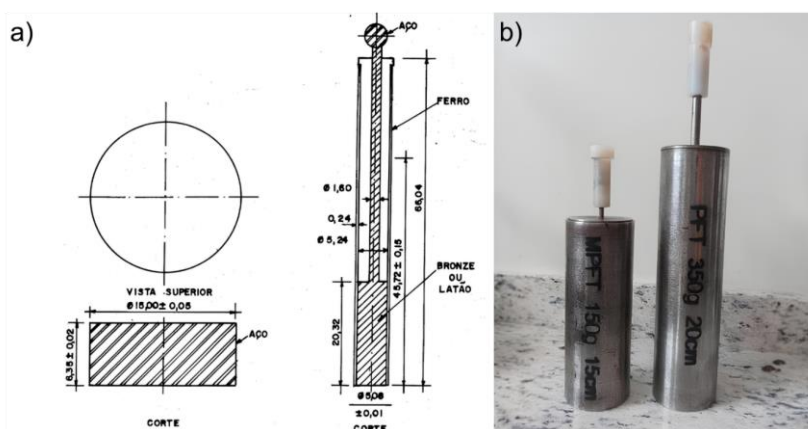


Figura 4.9 - Aparelho de Proctor.

Para os objetivos desta pesquisa, não é necessário obter toda a curva de compactação, pois visa-se determinar a umidade do solo correspondente à maior compactação. Realizou-se somente um ensaio em uma umidade média e mediu-se a massa específica aparente, denominada, para fins de ensaio, massa específica de referência (ρ_{re}), obtida a partir do ensaio com 55 golpes do MPF (Proctor Fagerberg Modificado).

Para obter a compactação do solo na bandeja de testes equivalente à compactação da via, calculou-se a massa de material necessária com base na massa específica de referência e no volume da bandeja. Em seguida, o material foi depositado na bandeja e compactado até atingir a massa total necessária. Para atingir a massa específica de referência, com área do molde da bandeja de 600 mm x 300 mm e altura máxima de 30 mm, a altura de compactação útil foi considerada de 25

mm. A compactação foi realizada em cinco posições distintas para garantir a uniformidade, conforme mostra a Figura 4.10.

Observa-se que este controle da compactação deveria ser realizado para cada valor de umidade. Porém, ajustando-se a um valor médio de umidade, a variação de compactação é desprezível para os propósitos dos ensaios de emissão de poeira.

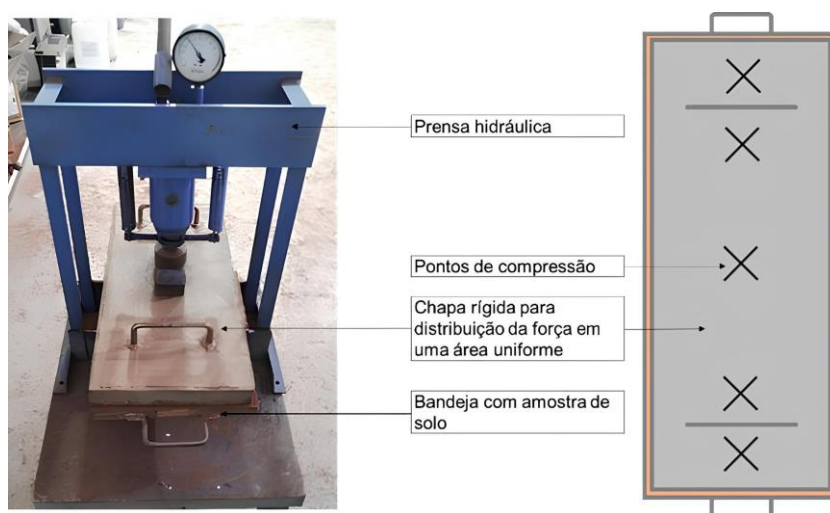


Figura 4.10 - Equipamento e esquema de compactação do corpo de prova.

Aplicação de supressor

Foram ensaiados corpos de prova com e sem supressor. Para os ensaios com supressor, as soluções foram preparadas conforme as concentrações e dosagens requeridas e, em seguida, aplicadas manualmente sobre os corpos de prova, com o cuidado de deixar a camada mais uniforme possível.

Degradação do corpo de prova

A superfície de uma via não pavimentada sofre degradação natural por ação de ventos e pela intensa passagem de veículos pesados. Essa degradação leva à formação de reservatórios de MP fino na superfície. Esse material fino, principalmente PM₁₀, é emitido para a atmosfera por meio da ação dos ventos, da interação das rodas com a superfície da via e da esteira de turbulência gerada pelo deslocamento do veículo.

Para simular a degradação da via não pavimentada, foi projetado e construído um mecanismo de ação pneumática que simula as rodas de um veículo, conforme ilustrado na Figura 4.11.

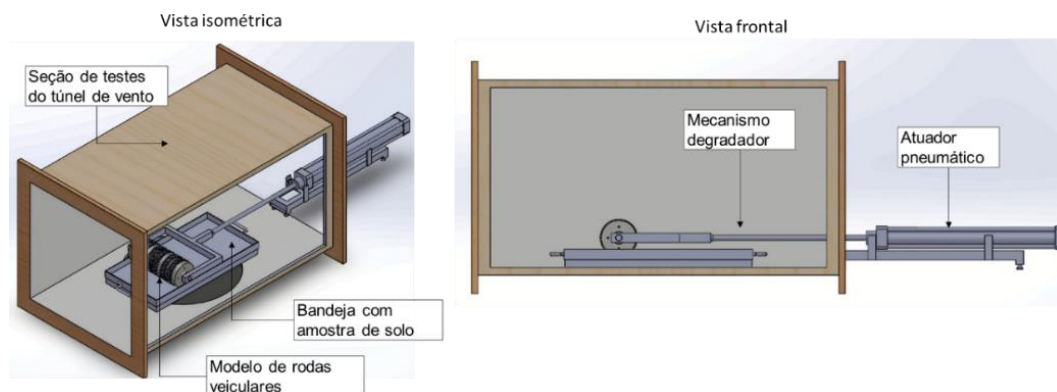


Figura 4.11 - Mecanismo de degradação do corpo de prova.

As principais dimensões do conjunto de degradação são apresentadas na Figura 4.12. Os modelos das rodas dos veículos foram fabricados em uma impressora 3D no laboratório FabLab CAMTUC, no campus da UFPA em Tucuruí. O modelo de impressão foi baseado nas dimensões e formas de um pneu de caminhão rodoviário típico utilizado na mineração. O modelo do pneu utilizado para a construção do modelo 3D e para a impressão foi o Aeolus Aro 24" AE41 12.00R24 160B TT 24 Lonas.

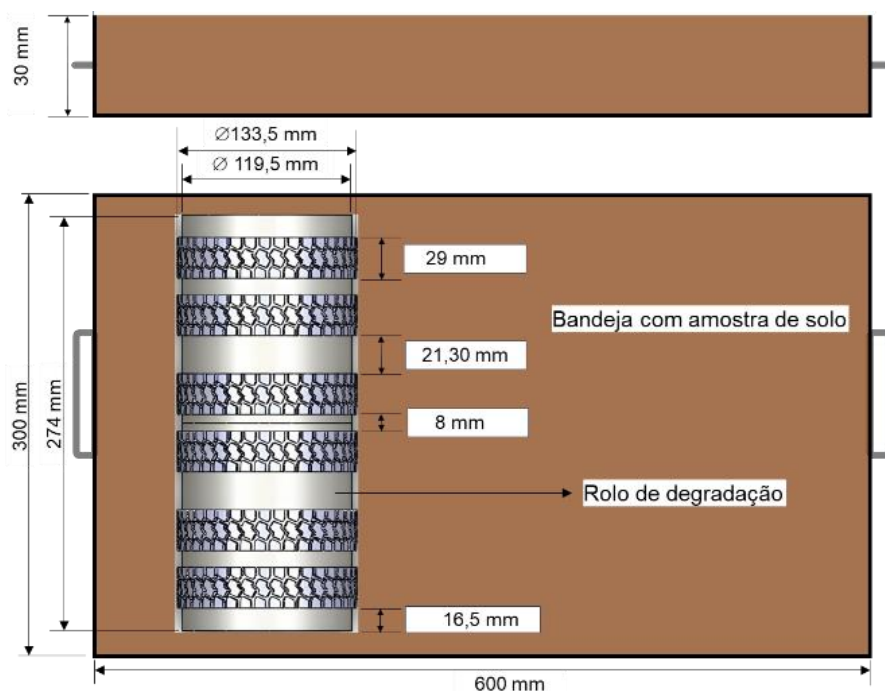


Figura 4.12 - Dimensões da bandeja de testes e rodas do mecanismo degradador.

As medições dos detalhes e das ranhuras do pneu foram realizadas em campo e confirmadas com o manual do fabricante (Figura 4.13). As principais características do dispositivo degradador são: (a) peso total do dispositivo: 22 kg; (b) distância de deslocamento: 460 mm; e (c) velocidade de deslocamento: 0,23 m/s.



Figura 4.13 - Esquema de construção do modelo de impressão das rodas do mecanismo degradador.

Após as amostras a serem preparadas para as configurações dos ensaios, foram degradadas através do mecanismo de degradação, com 10 ciclos, sendo um ciclo composto pelo avanço do conjunto de rodas até o final da bandeja e pelo seu retorno para a posição inicial, conforme mostrado na Figura 4.14:

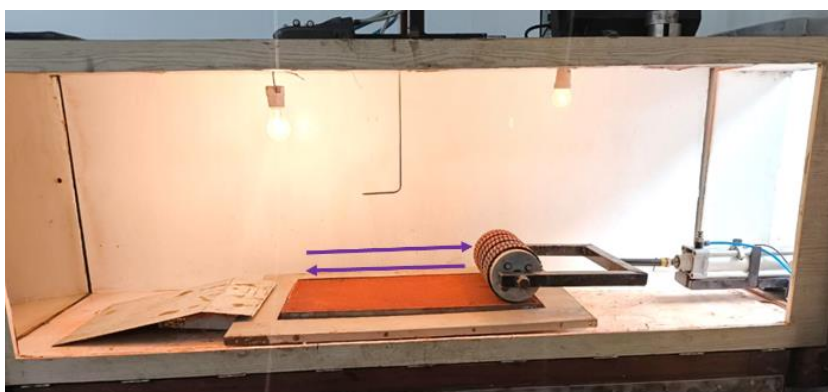


Figura 4.14 - Mecanismo de degradação instalado na seção de testes do túnel de vento.

4.6. Ensaios em túnel de vento

O túnel de vento utilizado (Figura 4.15) está instalado no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FluidPar), do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NDAE), localizado na cidade de Tucuruí, no oeste do Pará, e resultou do projeto de pesquisa de Menezes *et al.* (2015). O túnel de vento é constituído por seção aberta e possui seção de testes com dimensões de 600 mm x 600 mm, comprimento de 1,8 m, razão de contração de 9 e velocidade máxima de 30 m/s. De acordo com o autor, o túnel de vento apresenta um perfil de velocidade uniforme nas direções vertical e horizontal ao longo da seção de testes.



Figura 4.15 - Túnel de vento do laboratório FluidPar. Fonte: Adaptado de Menezes et al. (2015).

Fontana (2021) descreve as funções das principais partes do túnel de vento utilizado nesse trabalho, conforme a Figura 4.16.

A função da seção de contração é conectar a seção de estabilização à de testes, gerando um escoamento uniforme, sem perturbações no fluxo de ar.

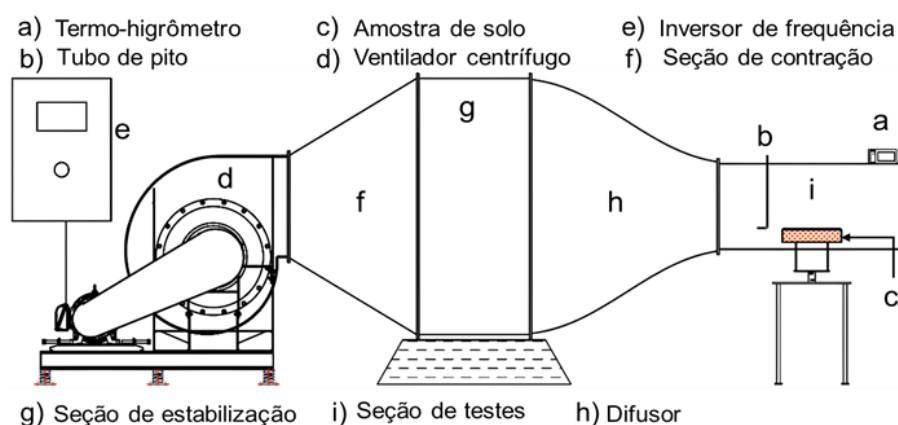


Figura 4.16 - Partes principais do túnel de vento. Fonte: Adaptado de Fontana (2021).

A seção de estabilização tem a função de retificar o fluxo por meio de elementos retificadores, aproveitando a baixa velocidade do escoamento (devida à grande seção transversal) e minimizando a perda de pressão.

O difusor reduz a velocidade do ar com o mínimo de perdas possível, considerando que a perda está associada ao ganho de pressão. Com o intuito de evitar a separação da camada limite, utilizaram-se placas divisórias laterais e horizontais no interior do difusor.

A área da seção de testes determina as demais dimensões do túnel. Um detalhe prático construtivo da seção de testes é a presença de uma janela de observação do modelo em teste. Na seção de testes, o escoamento deve ser o mais

estável possível, com elevada uniformidade e baixa turbulência.

A umidade relativa do ar (UR) e a temperatura ambiente (T_{amb}) apresentam um desafio metodológico, pois são incontornáveis e ditadas pelas condições climáticas do dia (MENEZES *et al.*, 2015). Para mitigar essa variabilidade, a estratégia adotada foi realizar os experimentos em períodos de maior estabilidade climática diária. Adicionalmente, o registro contínuo dessas condições ambientais durante cada ensaio é essencial para garantir a confiabilidade e a interpretação correta dos resultados.

Medição do perfil de velocidades do vento e velocidade de atrito

As velocidades do vento usadas durante os testes foram ajustadas modificando a frequência de alimentação do motor elétrico do túnel, por meio de um inversor de frequência. O campo de velocidades (u) foi medido usando um tubo de Pitot tipo L de 6 mm de diâmetro ($\pm 0,3$ m/s) e um micromanômetro portátil KIMO, modelo MP-200, com incerteza de $\pm 0,8$ Pa (AC Tool, 2025). O tubo de Pitot foi instalado na seção de testes do túnel de vento (Figura 4.17-c), assegurando o alinhamento com o fluxo de ar, e conectado ao manômetro (Figura 4.17-e) para medir a diferença de pressão. Essa diferença de pressão registrada no micromanômetro é usada para calibrar a velocidade do vento no túnel, com o Pitot centralizado no centro geométrico do túnel (300 mm acima da base).

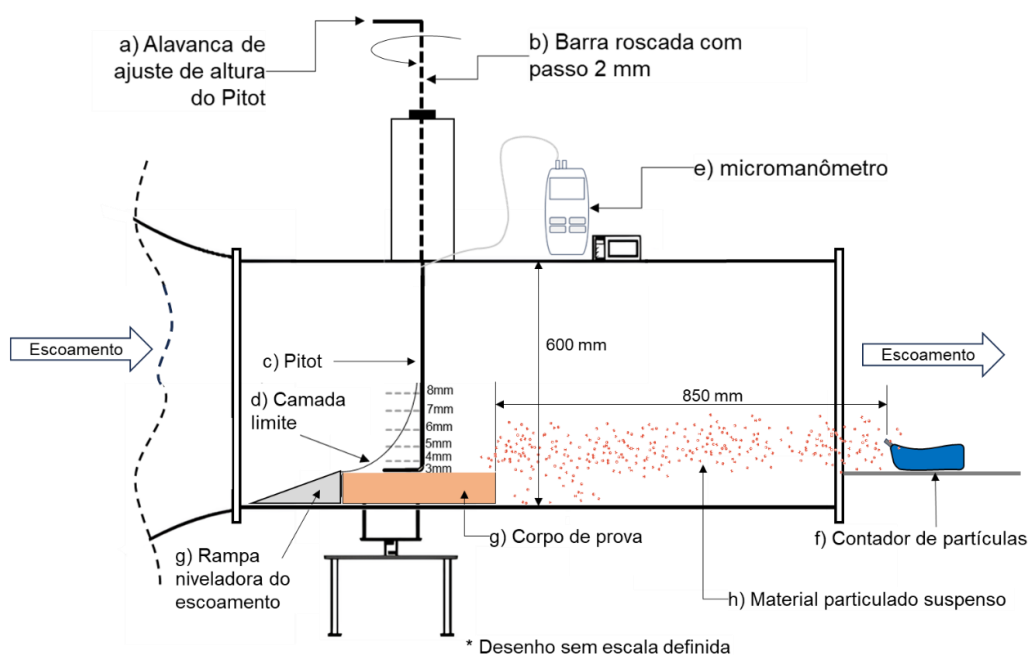


Figura 4.17 - Esquema de medição do perfil de velocidades na seção de testes do túnel de vento.

Após a calibração da velocidade de teste, o tubo de Pitot foi posicionado no leito da amostra em teste, de modo que o primeiro ponto de medição ficasse a 3 mm acima do leito (metade do diâmetro do Pitot). O contador de partículas foi então acionado. Com o Pitot na altura desejada, aciona-se o micromanômetro que realiza a medição durante 30 segundos, registrando a média dos valores lidos nesse intervalo. Em seguida, ajusta-se a altura de medição para o novo valor desejado. O ajuste da altura é feito girando a alavanca de ajuste (Figura 4.17-a) e conferindo-se com um paquímetro. Cada volta da alavanca corresponde a 2 mm, que é exatamente o passo da rosca de 2 mm. Ao todo, foram realizadas medições do campo de velocidades em 12 alturas distintas, conforme a Figura 4.18.

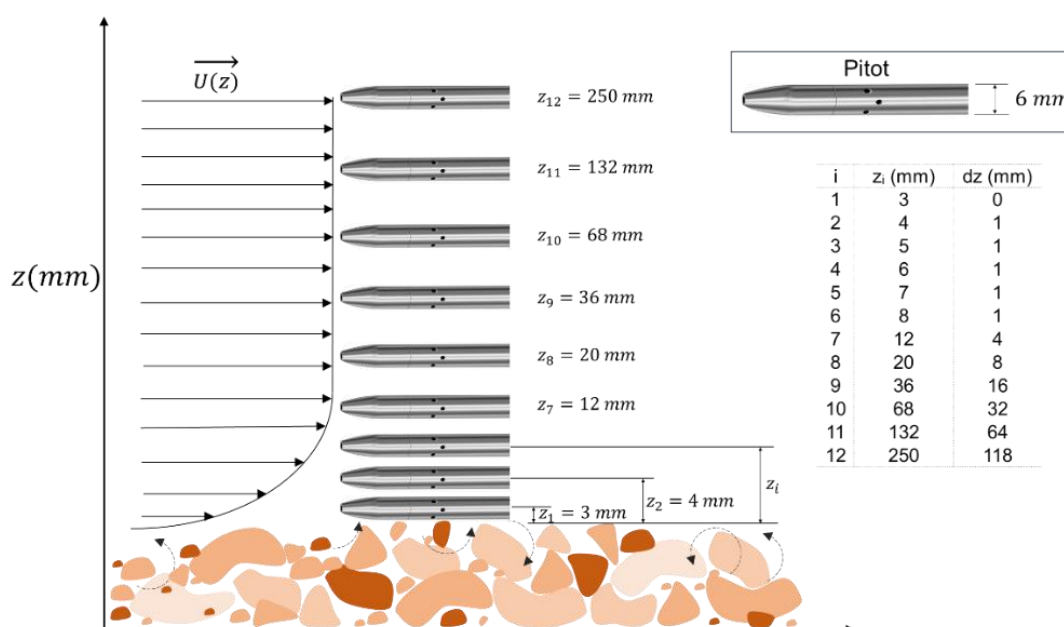


Figura 4.18 - Pontos de medição do perfil de velocidades.

Para fins de explicação da metodologia aplicada ao cálculo da velocidade de atrito, foi utilizado o campo de velocidades medido nas alturas $z = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 20$ e 36 mm, para uma velocidade do vento $U = 20$ m/s e umidade $\omega = 5$ %, conforme detalhado a seguir. Para a análise dos resultados, foram considerados apenas seis pontos, o suficiente para representar a camada limite e determinar a u^* .

Na Figura 4.19 estão plotados os dados do campo de velocidades (u) em função de z , demonstrando o perfil de velocidades para as condições citadas no túnel de vento. Na Figura 4.20 foram plotados os dados do campo de velocidades em uma escala $\log z$.

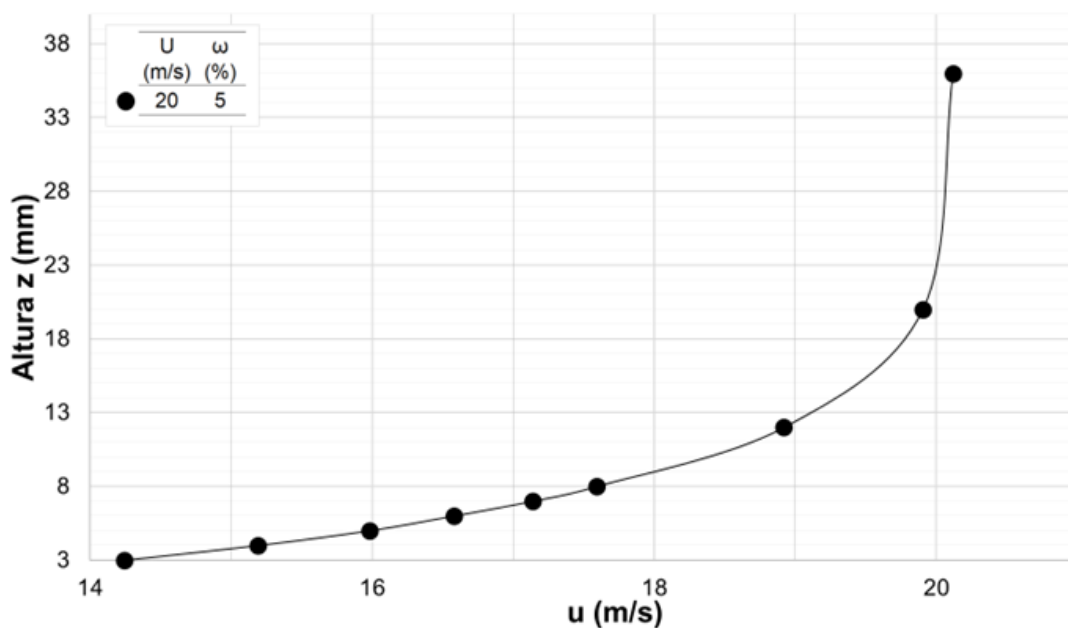


Figura 4.19 - Perfil de velocidades do túnel de vento para $U = 20$ m/s.

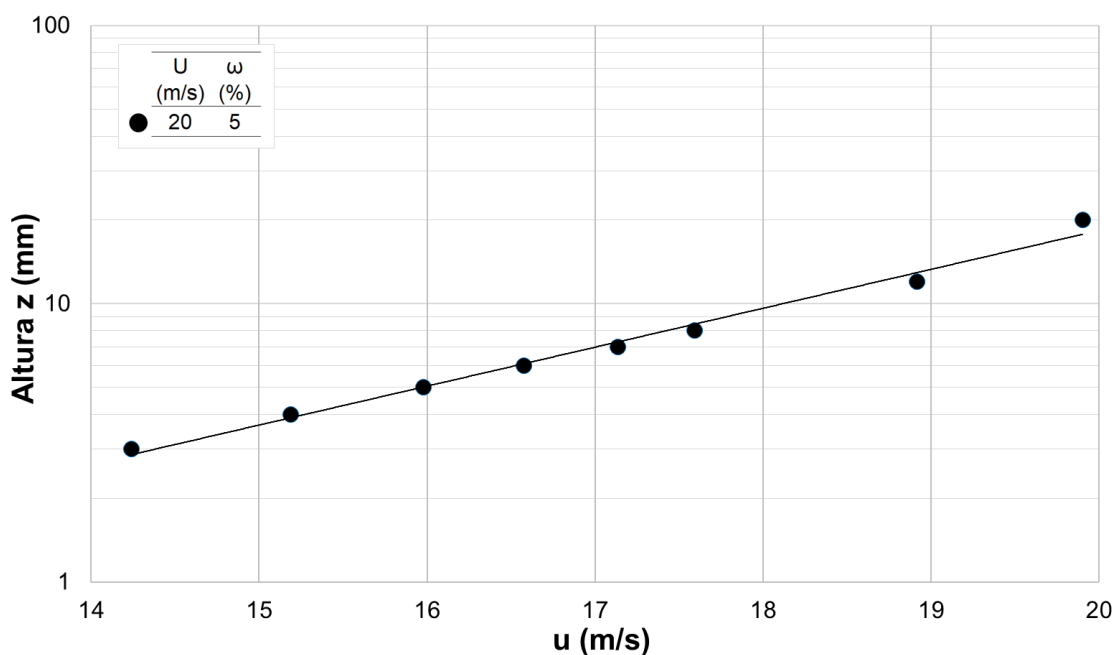


Figura 4.20 - Perfil de velocidades com eixo das ordenadas em escala \log_{10} .

Para o cálculo da velocidade de atrito, o campo de velocidades foi plotado em um gráfico semilogarítmico, com o eixo das ordenadas representando $\log_{10}(z)$ em escala decimal, conforme a Figura 4.21. A reta resultante do ajuste dos dados dessa curva possui inclinação "A", que, quando aplicada à Equação 2.16, fornece a velocidade de atrito. Quanto menor a inclinação da reta em relação ao eixo horizontal, maior será a velocidade de atrito.

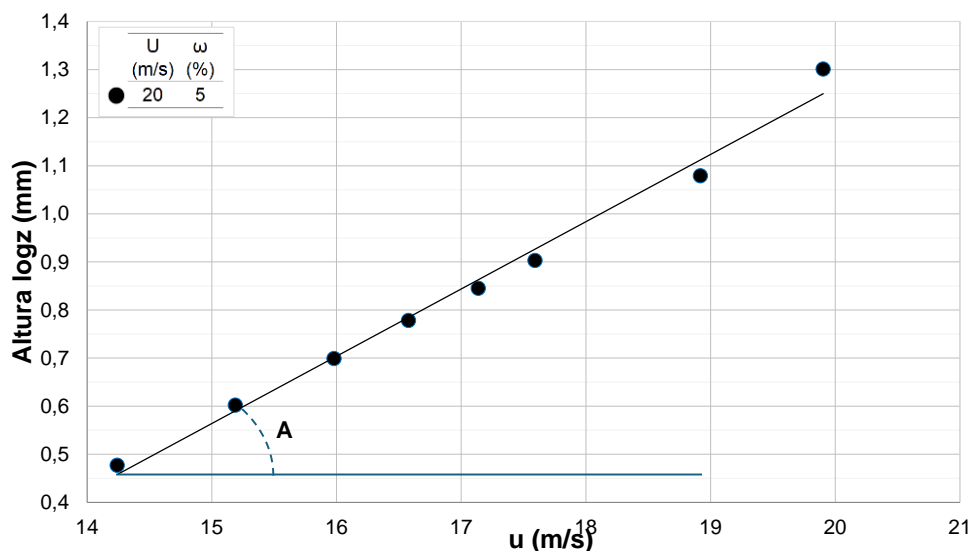


Figura 4.21 - Campo de velocidades com alturas log z plotados em escala decimal.

Medição da emissão de poeira

Para a medição do particulado emitido, utilizou-se o contador de partículas modelo DustTrack™ 8533 DRX, com exatidão de $\pm 0,1\%$, do fabricante TSI Inc. (DustTrack, 2014).

A Figura 4.22 ilustra o funcionamento do contador de partículas. O aerossol é aspirado a uma vazão de 2,83 L/min para uma câmara óptica, a cada 1 segundo. Desse total, 1 L/min passa por um filtro HEPA (*High-Efficiency Particulate Air*) para gerar ar limpo. Isso reduz a recirculação de partículas e protege a câmara óptica. O 1,83 L/min restante de aerossol entra na câmara óptica, onde é iluminado por um laser de 655 nm. A luz espalhada ($90 \pm 62^\circ$) é captada e focada em um fotodetector. As partículas pós-câmara são coletadas em um filtro interno de alta eficiência. O filtro HEPA tem capacidade para capturar 50 mg de poeira e, depois desse limite, começa a impactar o fluxo e precisa ser limpo ou substituído (WANG *et al.*, 2009). Por segurança, a limpeza do filtro foi realizada ao término de cada ensaio.

Depois disso, o sinal do fotodetector é digitalizado e processado (Figura 4.22-b). O sinal fotométrico estima a concentração de massa de PM_{10} , enquanto a contagem de partículas únicas estima a distribuição de massa de partículas $> 1 \mu m$. Esses dados são combinados para calcular a concentração de massa segregada por tamanho (WANG *et al.*, 2009).

O contador de partículas foi posicionado a jusante do corpo de prova (Figura 4.23), na saída da seção de testes, e acionado cinco minutos antes do acionamento

do túnel de vento.

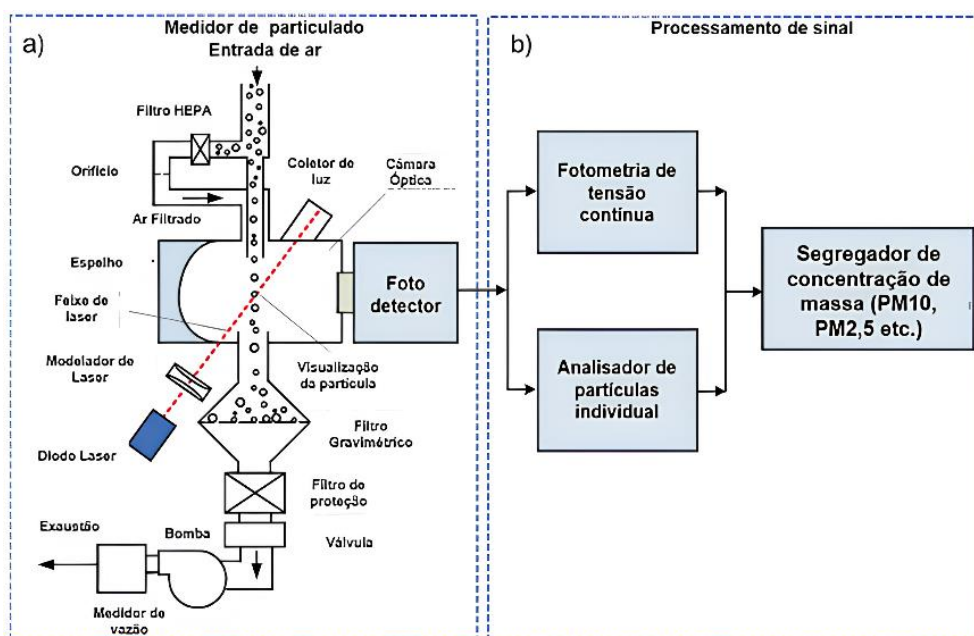


Figura 4.22 - Diagrama do contador de partículas. Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2009).

Ao término do ensaio da amostra, os valores de PM_{10} do contador são registrados e esses dados compõem a base de dados para a geração das curvas de emissão (em termos de concentração média) em função da umidade do solo e dos demais parâmetros associados ao uso de supressor.



Figura 4.23 - Tubo de Pitot e contador de partículas instalados na seção de testes do túnel de vento.

Medição da concentração média de emissão

A concentração de partículas emitidas no intervalo total dos ensaios Δt , ou no tempo de referência, Δt_R , é obtida pela massa do número total de partículas (N_{tp}) dividido pelo volume total de ar aspirado nesse mesmo intervalo (Equação 4.7):

$$C_{p\Delta t} = \frac{\rho_p \cdot V_p \cdot N_{tp\Delta t}}{V_{a\Delta t}} = \frac{m_{tp\Delta t}}{Q_c \cdot \Delta t} \quad 4.7$$

Onde:

$C_{p\Delta t}$: concentração de partículas no intervalo Δt ($\mu\text{g}/\text{m}_a^3$);

ρ_p : massa específica real da partícula ($\mu\text{g}/\text{m}_p^3$);

V_p : volume de uma partícula de diâmetro PM_x (m_p^3);

$N_{tp\Delta t}$: número de partículas contadas no intervalo Δt ;

$V_{a\Delta t}$: volume de aspirado pela bomba do contador no intervalo Δt (m_a^3);

Q_c : vazão volumétrica da bomba do contador (m_a^3/s);

Δt : intervalo total dos ensaios.

$m_{tp\Delta t}$: massa total de partículas no intervalo Δt (μg).

Para a metodologia adotada, foi considerada uma amostragem com o intervalo de medição constante, $\Delta t_a = 1$ segundo, com número de pontos $N_a = 7.234$ (Figura 4.24), obtendo-se Δt_R usando a Equação 4.8.

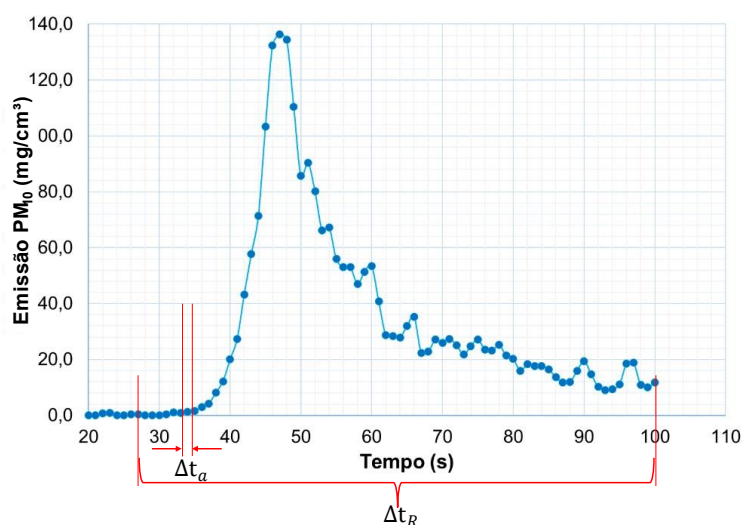


Figura 4.24 - Δt_a e Δt_R para cálculo da concentração média da emissão.

$$\Delta t_R = N_a \cdot \Delta t_a \quad 4.8$$

Sendo: Δt_R : intervalo de medição de referência; N_a = número de entradas de medição; e Δt_a : intervalo de medição da amostragem.

A concentração média de MP emitido durante os ensaios no túnel de vento (substituindo-se Δt por Δt_R) foi obtida usando a Equação 4.9:

$$C_{p\Delta t_R} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N_a} m_{tpi\Delta t_a}}{Q_c \cdot N_a \cdot \Delta t_a} = \frac{1}{N_a} \cdot \sum_{i=1}^{i=N_a} \frac{m_{tpi\Delta t_a}}{Q_c \cdot \Delta t_a} = \frac{1}{N_a} \cdot \sum_{i=1}^{i=N_a} C_{pi\Delta t_R} \quad 4.9$$

Cálculo da eficiência de supressão

Um parâmetro básico de quantificação da emissão de poeira é a eficiência de supressão, definida por Zhou *et al.* (2018) pela Equação 4.10:

$$\eta_s = \frac{C_a - C_b}{C_a} \quad 4.10$$

Onde C_a e C_b são respectivamente, as concentrações de emissão de poeira para as duas configurações de ensaios a e b, medidas em massa de particulado por volume de ar, normalmente expressas em $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A concentração padrão utilizada nos ensaios dessa pesquisa corresponde à concentração média da emissão de partículas PM_{10} .

Processamento dos dados

Após a realização dos ensaios, todos os dados foram processados e analisados. Uma vez que os ensaios foram realizados em datas e horários diferentes, houve variações na concentração de particulados no ambiente de ensaio, resultando em concentrações mínimas iniciais distintas e, conseqüentemente, em patamares de emissão diferentes entre os ensaios. Para comparar os dados de emissão de forma equivalente, todas as curvas foram normalizadas, subtraindo-se de cada ponto medido o valor mínimo observado no intervalo.

Como pode ser observado na Figura 4.25, considerando o tempo total de um ensaio (7.234 s, aproximadamente 2 h), não seria possível analisar, em detalhe, os

momentos iniciais, quando ocorrem os picos de emissão.

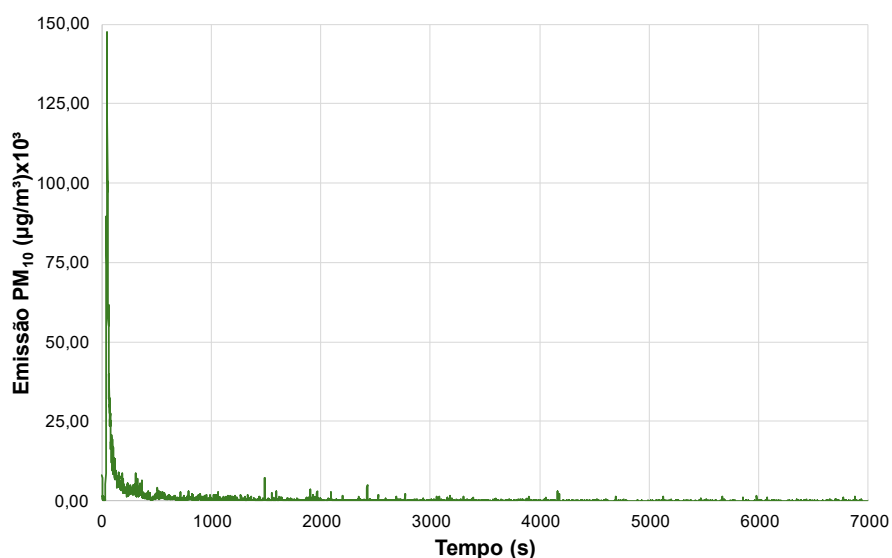


Figura 4.25 - Emissão de PM₁₀ em função do tempo em escala decimal.

Por esse motivo, optou-se por utilizar escala logarítmica no eixo do tempo. Conforme representado na Figura 4.26, é possível observar que o contador de partículas foi acionado antes do túnel de vento, informação que não seria possível obter no gráfico em escala decimal.

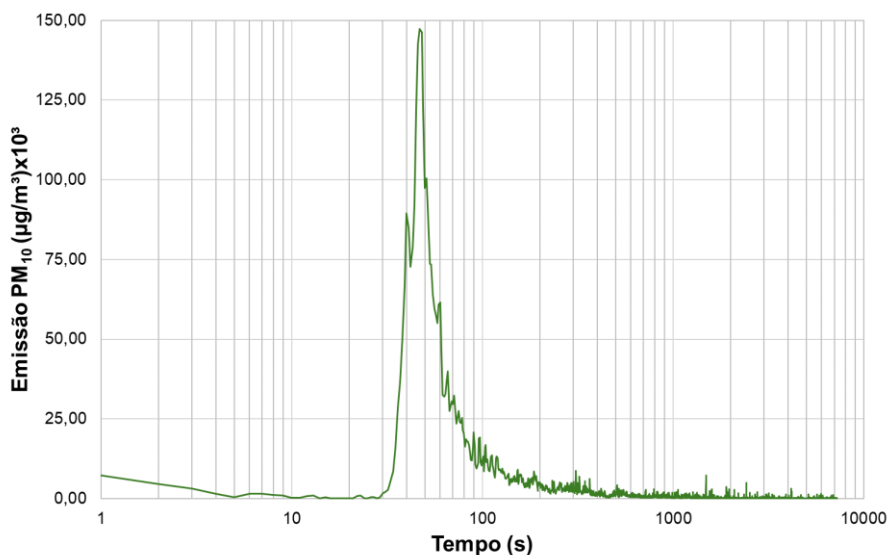


Figura 4.26 - Emissão de PM₁₀ em função do tempo em escala logarítmica.

Cálculo da incerteza experimental

As incertezas aleatórias não serão tratadas neste trabalho, pois o número de

repetições previsto para os ensaios é reduzido, em função das limitações de tempo e de disponibilidade de material para testes. Foram consideradas nesse trabalho as incertezas sistemáticas para os valores de umidade (ω %), velocidades de atrito (u^* m/s) e velocidades do campo de velocidades (u m/s), conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Equações para o cálculo da incerteza experimental.

Equação	y	x ₁	x ₂	σ_y
$\omega (\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100$	ω	M_u	M_s	$\delta_{\omega} = \sqrt{\left(-\frac{M_u}{M_s^2} \cdot \delta M_u\right)^2 + \left(\frac{1}{M_s} \cdot \delta M_u\right)^2}$
$u (\text{m/s}) = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P}{\left(\frac{P_{\text{atm}}}{R \cdot T_{\text{amb}}}\right)}}$	u	ΔP	T_{amb}	$\delta_u = \sqrt{\left(\frac{R \cdot T_{\text{amb}} \cdot \delta \Delta P}{2 \cdot \Delta P \cdot P_{\text{atm}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P \cdot R \cdot \delta T_{\text{amb}}}{2 \cdot P_{\text{atm}} \cdot T_{\text{amb}}}\right)^2}$
$u^* (\text{m/s}) = \frac{1}{5,75 \cdot A}$	u^*	A	-	$\delta_{u^*} = \sqrt{\left(-\frac{1}{5,75 \cdot A^2} \cdot \delta A\right)^2}$

Onde:

$\delta M_u, \delta M_s$: Incerteza de medição da balança ($\pm 0,01$ g).

ΔP : Diferença de pressão medida com o manômetro digital.

$\delta \Delta P$: Incerteza de medição do manômetro digital ($\pm 0,8$ Pa).

T_{amb} : Temperatura ambiente medida pelo termômetro digital.

δT_{amb} : Incerteza de medição com termômetro digital ($\pm 0,21$ °C).

R: Constante dos gases.

δA : Incerteza de A.

P_{atm} : Pressão atmosférica.

Não foi considerada a incerteza de medição da pressão atmosférica na incerteza de medição da velocidade (u).

Os resultados para as incertezas de medição associadas à umidade e às velocidades de atrito estão listados na Tabela 6.3 e as incertezas associadas às medições do campo de velocidades estão listadas no Apêndice A.

Para o cálculo da incerteza de A que compõe a incerteza do valor da velocidade de atrito, foi seguido o seguinte passo a passo:

Conhecendo a inclinação da reta tangente (A) que ajusta os dados de $\log(z)$

e u, plotados nos eixos y e x, respectivamente, calculam-se os valores ajustados de \hat{y}_i e seus resíduos e_i utilizando as Equações 4.11 e 4.12:

$$\hat{y}_i = a + Ax_i \quad 4.11$$

$$e_i = y_i - \hat{y}_i \quad 4.12$$

O erro padrão residual é dado pela Equação 4.13:

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n e_i^2}{n - 2}} \quad 4.13$$

A expressão $(n - 2)$ aparece porque foram estimados dois parâmetros: intercepto e inclinação.

Por fim, o erro padrão da inclinação A é dado pela Equação 4.14:

$$\delta A = \frac{s_e}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad 4.14$$

5. METODOLOGIA ESG

5.1. Descrição geral da metodologia

Com o objetivo de propor uma metodologia que integre a gestão da emissão de poeira proveniente de vias não pavimentadas no contexto de ESG, foram usados dois padrões de relatórios de sustentabilidade: GRI (GRI, 2024) e IFRS (IFRS, 2023a; b).

A norma GRI foi utilizada por permitir a identificação de temas com materialidade socioambiental. As normas IFRS S1 e S2 foram adotadas por serem padrões globais e por focarem, respectivamente, na materialidade financeira e ambiental. Além de, a partir de 2026, serem obrigatórias no Brasil para empresas de capital aberto. A metodologia geral aplicada está representada na Figura 5.1:

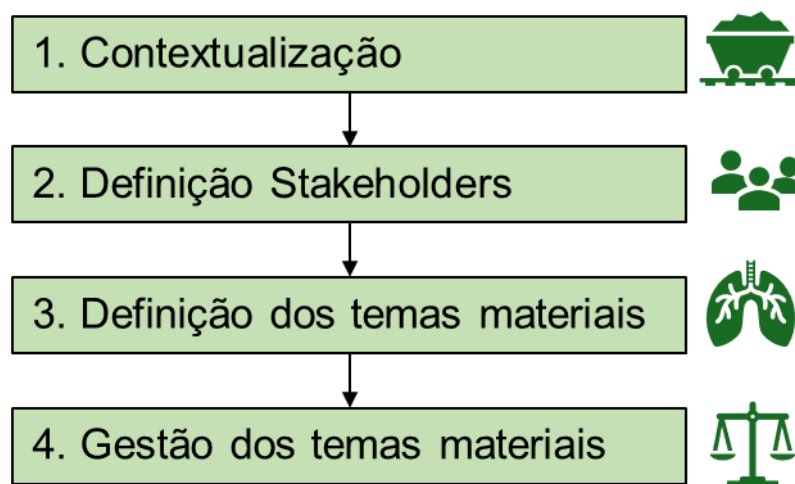


Figura 5.1 - Metodologia geral para avaliação ESG.

Contextualização

O primeiro passo foi contextualizar as operações de uma mineradora hipotética, definindo o fluxo do processo produtivo (Figura 5.2). Também foram identificados os seguintes aspectos: tipo de mina, as fontes potenciais de emissão de poeira, o clima, a proximidade de comunidades e dos demais *stakeholders*, os suprimentos de água e as regulações pertinentes. Para auxiliar na contextualização, utilizou-se a norma setorial GRI 14 - Setor de Mineração 2024, da GRI (2024), que aborda especificamente a indústria da mineração.

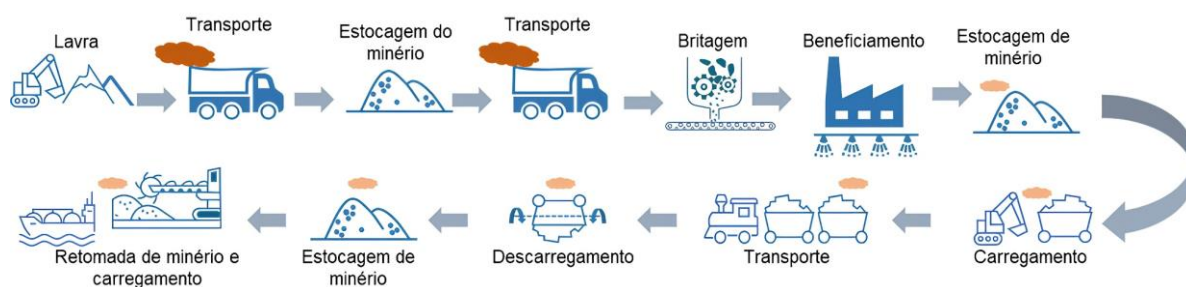


Figura 5.2 - Fluxo típico de um processo genérico de mineração em mina de céu aberto.

Apesar de o fluxo típico de uma mineradora a céu aberto (open pit), mostrado acima, indicar diversas fontes de emissão de MP, essa pesquisa se concentrou nas vias não pavimentadas como fontes emissoras. Para o caso hipotético estudado, considerou-se o tráfego de caminhões rodoviários com peso bruto de 70 toneladas. O transporte de minério das frentes de lavra até os pontos de estocagem intermediários e, depois, até o processo de britagem é realizado por caminhões, conforme ilustrado na Figura 5.2.

A supressão de poeira nas vias não pavimentadas é realizada principalmente com água, por meio de caminhões-pipa. A supressão ocorre sob demanda, ou seja, não há monitoramento sistemático nem gestão do material particulado.

O clima na região é marcado por duas estações bem definidas: chuvosa e seca. No período de seca, a estiagem é considerada um fator de risco para as operações, pois a água é captada principalmente de fontes naturais. O recurso hídrico no período de estiagem afeta, inclusive, as comunidades vizinhas à mineradora, que utilizam a mesma fonte superficial de água para fins de subsistência.

Do ponto de vista da regulamentação e da legislação, a mineradora precisa atender aos critérios e limites estabelecidos pelo CONAMA para a emissão de material particulado.

Stakeholders

O segundo passo foi definir os principais *stakeholders* do negócio de mineração, abrangendo desde os clientes internos e os órgãos reguladores, passando por toda a cadeia de valor e pela sociedade (comunidades) em torno.

Considerando os impactos decorrentes da emissão de material particulado pelas fontes citadas anteriormente, os principais públicos afetados foram as comunidades locais e os trabalhadores.

Temas materiais

Em seguida, foram investigados e definidos os temas materiais e duplos materiais, seguindo seis etapas principais, conforme a Figura 5.3. Nesta metodologia foram abordadas duas categorias de temas materiais: (1) temas materiais de impacto socioambiental (*Inside-out*); e (2) temas materiais de impacto financeiro na empresa (*outside-in*). As análises das etapas propostas foram realizadas em planilhas do *Microsoft Excel*[®].

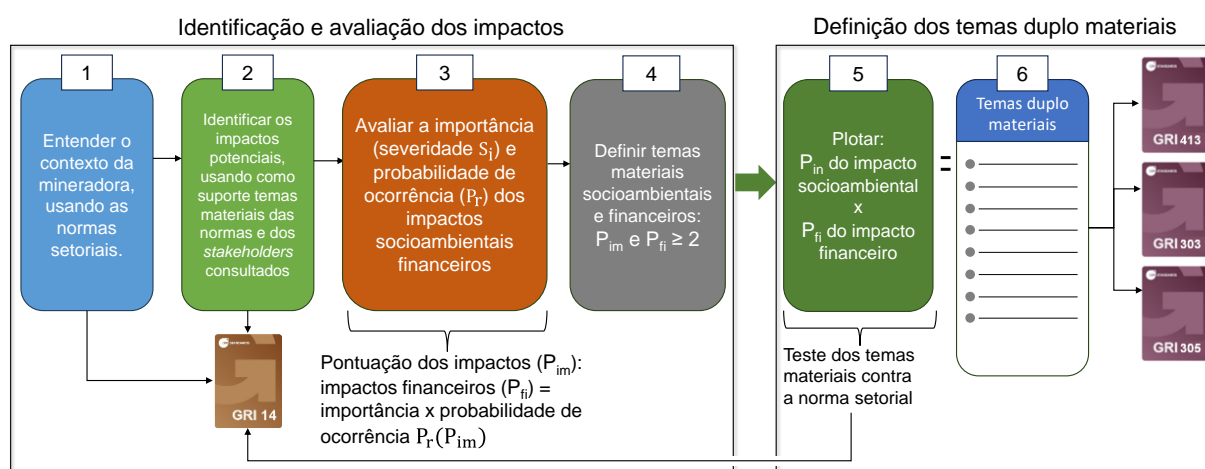


Figura 5.3 - Esquema para identificação da dupla materialidade. Fonte: Adaptado de GRI (2024).

Para o desenvolvimento da etapa 1 (conforme Figura 5.3), as normas setoriais da GRI (2024) foram consultadas para subsidiar o entendimento do contexto da empresa em estudo no setor de mineração. Nessa etapa, foi analisado como o negócio da mineradora se desenrola no contexto da sustentabilidade e como isso afeta os *stakeholders*. Essa etapa auxiliou a escolha dos possíveis temas materiais, realizada na etapa 2.

Na etapa 2 (conforme Figura 5.3), os possíveis temas materiais e seus impactos positivos e/ou negativos, reais ou potenciais, foram identificados e mapeados com base nas normas setoriais GRI 14 - Setor de Mineração 2024, da GRI (2024), IFRS S1 (SASB, 2023) e IFRS S2 (2023b). É importante reforçar que o foco principal das normas IFRS S1 e IFRS S2 é estabelecer padrões para a divulgação de informações de sustentabilidade que sejam financeiramente relevantes para a empresa e, portanto, úteis aos investidores.

Na Tabela 5.1, estão resumidos os temas materiais (socioambientais e

financeiros) consultados em cada uma das normas citadas anteriormente, que poderiam conter alguma relação com emissão de material particulado, e que foram utilizados para compor os temas materiais que foram analisados na metodologia.

Tabela 5.1 - Temas materiais abordados pelas principais normas e padrões de relatórios de ESG.

Normas – Tipo de materialidade – Temas materiais das normas		
Materialidade socioambiental	Materialidade financeira	Materialidade financeira
GRI-14	IFRS S1 (SASB)	IFRS S2
Comunidades locais	Relações comunitárias	Resiliência climática
Água e efluentes	Gestão de água	
Emissões atmosféricas	Qualidade do ar	
Adaptação e resiliência climática		

É nessa etapa que ocorre o engajamento dos *stakeholders* na metodologia adotada, para ajudarem nas análises das materialidades. A materialidade financeira e seus impactos foram expressos em função dos riscos, podendo ser uma ameaça ou uma oportunidade para o negócio, conforme os itens V e VI da Tabela 5.2.

Para cada tema material proposto, oriundo da combinação dos temas materiais da Tabela 5.1, além dos sugeridos pelos *stakeholders*, foram listados diversos impactos socioambientais e financeiros possíveis. Estes impactos foram avaliados na etapa 3, se possuem ou não materialidade para o negócio.

Na etapa 3 (conforme Figura 5.3), a probabilidade de ocorrência e a importância dos impactos identificados, com base nos temas materiais, foram avaliadas de forma qualitativa e quantitativa. Para a análise quantitativa da materialidade, consideraram-se os valores de IQAr apresentados posteriormente na Tabela 6.5. Por se tratar de uma metodologia proposta, aplicada a uma mineradora fictícia, todos os impactos são tratados como potenciais. Esses impactos podem ser negativos (ameaças) ou positivos (oportunidades), ou se tratando de impacto financeiro podem ser uma ameaça ou uma oportunidade.

A importância de um impacto é definida pela sua severidade, e a severidade é composta pelos seguintes indicadores:

- a) Escala: o tamanho da gravidade do impacto no meio ambiente, nas pessoas e na economia;
- b) Escopo: o quão o impacto está disseminado no meio ambiente, na

sociedade e na economia. Por exemplo, o número de indivíduos afetados ou a extensão do dano ambiental; e

- c) Remediabilidade: o quanto é difícil reparar o dano causado pelo impacto.

A composição da importância de cada impacto, ou seja, quais indicadores de severidade são utilizados, é apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Combinação de indicadores por tipo de impacto. Adaptado de GRI (2024).

Tipo de impacto	Indicadores de severidade	Tipo de impacto	Indicadores de severidade
I. Impactos socioambientais positivos e reais	(S _a) Escala (S _b) Escopo	III. Impactos socioambientais negativos e reais	(S _a) Escala (S _b) Escopo Remediabilidade
II. Impactos socioambientais positivos potenciais	(S _a) Escala (S _b) Escopo	IV. Impactos socioambientais negativos e potenciais	(S _a) Escala (S _a) Escala (S _c) Remediabilidade
V. Impactos financeiros (Ameaças)	(S _a) Escala		
VI. Impactos financeiros (Oportunidades)	(S _a) Escala		

A severidade de cada indicador foi avaliada em uma escala de 1 a 5, e a descrição é apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Descrição das severidades de cada indicador. Adaptado de GRI (2024).

Severidade	(S _a) Escala	(S _b) Escopo	(S _c) Remediabilidade
1- Insignificante	Mínimo impacto	Limitado a um local específico dentro da empresa	Fácil de remediar, no curto prazo
2- Negligenciável	Baixo (metas da empresa não alcançadas, mas requisitos legais alcançados)	Concentrado (dentro dos limites da empresa)	Remediável com grande esforço no curto prazo
3- Moderado	Médio (metas da empresa alcançadas, mas requisitos legais não alcançados)	Médio (poluição atmosférica e recursos naturais comprometidos)	Difícil de remediar, requer médio prazo
4- Extensivo	Alto (não atingiu metas da empresa nem cumpriu os requisitos legais)	Generalizado na empresa e região de influência (<i>Stakeholders</i>)	Muito difícil para remediar, requer longo prazo
5- Significante	Muito alto (maior evento em todos os requisitos nos últimos anos)	Global/total	Irremediável

O cálculo da importância (IMP) é definido pela média aritmética dos indicadores de severidade (Tabela 5.3) aplicáveis ao tipo de impacto (Tabela 5.2) em análise, e é expresso matematicamente pela Equação 5.1:

$$IMP = \frac{\sum_{i=a}^c S_i}{N_s} \quad 5.1$$

Onde:

S_a = Severidade da escala;

S_b = Severidade do escopo;

S_c = Severidade da remediabilidade; e

N_s = Número de indicadores de severidade aplicáveis.

A Equação 5.1 deve ser ajustada quanto aos indicadores de severidade aplicáveis, conforme listados na Tabela 5.2. A importância do impacto possui a mesma escala que a severidade de cada indicador, conforme a Tabela 5.3. Para impactos potenciais, ou seja, que ainda não se tornaram realidade, foi introduzido o conceito de probabilidade de ocorrência (P_r).

A pontuação de impacto socioambiental (P_{im}) e a pontuação de impacto financeiro (P_{fi}) foram obtidas através da multiplicação da importância dos impactos pela probabilidade de ocorrência, conforme as Equações 5.2 e 5.3, respectivamente. Conforme demonstrado na Tabela 5.2, para impactos positivos, o indicador de remediabilidade não se aplica à Equação 5.2.

$$P_{im} = IMP \cdot P_r(P_{im}) \quad 5.2$$

Onde $P_r(P_{im})$ é probabilidade de ocorrência de P_{im} .

Para o cálculo da pontuação do impacto financeiro (P_{fi}), a importância é definida apenas pelo indicador de severidade de escala, conforme indicado na Tabela 5.2.

$$P_{fi} = S_a \cdot P_r(P_{fi}) \quad 5.3$$

Onde $P_r(P_{fi})$ é a probabilidade de ocorrência de P_{fi} .

Após avaliados os impactos em termos de probabilidade de ocorrência e importância, e obtidas as pontuações, foram aplicados os critérios da Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Critérios para definição da existência de materialidade.

Tipo de materialidade	Critério	Quadrante da matriz (Figura 5.4)
Materialidade socioambiental	$P_{im} \geq 2$	Inferior direito
Materialidade financeira	$P_{fi} \geq 2$	Superior esquerdo
Dupla materialidade	P_{im} ou $P_{fi} \geq 2$	Superior direito
Não possui materialidade	P_{im} e $P_{fi} < 2$	Inferior esquerdo

O gráfico da Figura 5.4 é formado pelas pontuações obtidas para os impactos socioambientais (eixo x) e financeiros (eixo y) e foi utilizado como referência para a identificação visual dos temas com materialidade para o negócio.

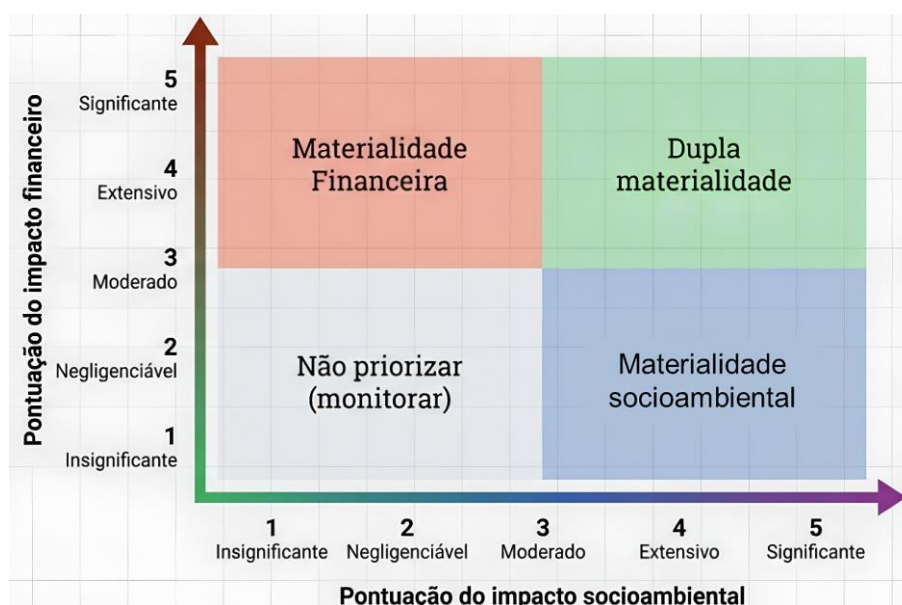


Figura 5.4 - Matriz de dupla materialidade para análise dos temas materiais (eixo x: pontuação do impacto socioambiental, eixo y: pontuação do impacto financeiro).

A priorização dos impactos na etapa 4 (conforme Figura 5.3), analisados e definidos pelos principais *stakeholders*, fundamentou a definição dos temas com dupla materialidade na etapa 5 (conforme Figura 5.3).

Um tema material analisado (socioambiental ou financeiro) pode apresentar um ou mais impactos. Além do que, um tema material que causa impacto na sociedade, na economia e no meio ambiente também pode gerar impacto financeiro na empresa, ou seja, representar um risco. Um risco é classificado como gerador de ameaças, oportunidades ou ambos, conforme mostrado na Tabela 5.2 (ABNT ISO, 2018).

Na etapa quatro (conforme Figura 5.3), foram analisados quais temas

materiais socioambientais e financeiros apresentaram pontuação maior ou igual a dois, portanto, possuindo materialidade no contexto da empresa de mineração analisada.

As normas setoriais foram consultadas para verificar se os impactos se enquadram ou não no negócio hipotético de mineração analisado.

Após a definição dos temas materiais socioambientais e financeiros na etapa 4, foram testados em relação aos temas propostos pelas normas setoriais da GRI (2024), garantindo que nenhum tema foi deixado de fora da avaliação. Todos os temas materiais relevantes, tanto do ponto de vista da emissão de particulados, foram considerados na análise de temas materiais, independentemente de apresentarem ou não dupla materialidade.

A gestão dos temas materiais (item 4 da Figura 5.1) consistiu em:

- a) descrição dos impactos reais e potenciais, negativos e positivos na economia, no meio ambiente e nas pessoas;
- b) descrição das medidas para prevenir ou mitigar impactos negativos potenciais utilizando a metodologia desenvolvida no Capítulo 4;
- c) descrição das medidas para gerenciar impactos positivos reais e potenciais; e
- d) descrição das metas e indicadores usados para avaliar o progresso da gestão.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Ensaios Experimentais

Caracterização do material

O ensaio de granulometria por peneiramento (Figura 6.1) indicou um diâmetro médio (D_{50}) de 2,70 mm, enquanto o ensaio de granulometria por difração laser (Figura 6.2) revelou um diâmetro médio (D_{50}) de 37 μm . A presença considerável de frações finas na composição é compatível com solos predominantemente lateríticos.

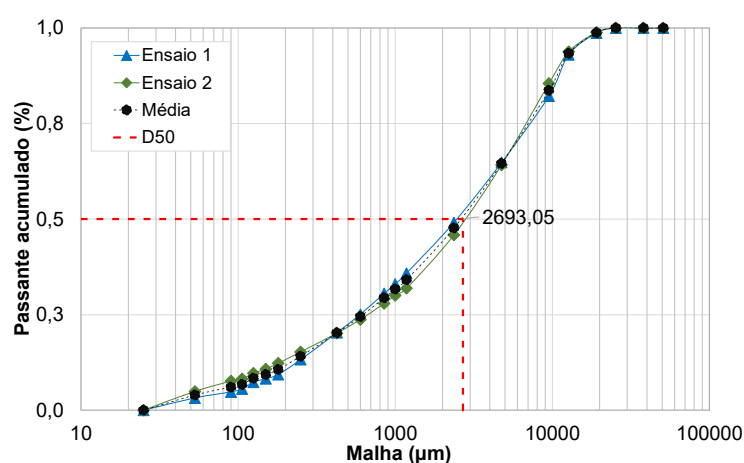


Figura 6.1 - Curva granulométrica obtida por peneiramento conforme ABNT 7181 (2025).

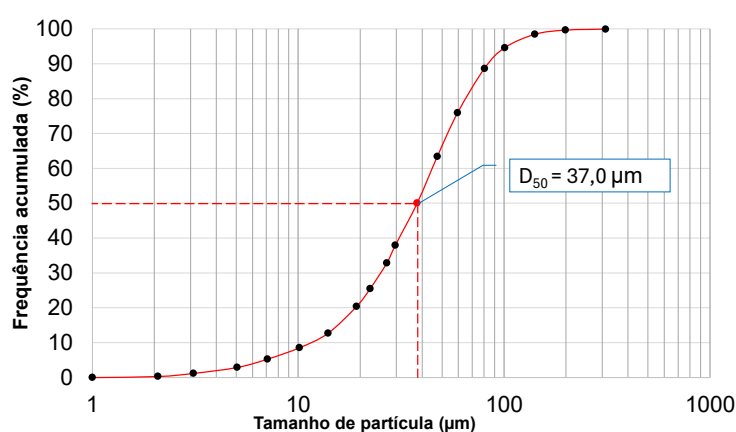


Figura 6.2 - Curva granulométrica obtida por difração laser, equipamento Mastersizer 3000, Malvern Panalytical.

Além disso, a presença de partículas com diâmetro inferior a 100 μm , sugere um alto potencial de emissão do solo na via estudada, especialmente quando sofre

degradação superficial contínua, como ocorre com intenso tráfego de veículos pesados.

Avaliação da tensão superficial do supressor

Com o objetivo de avaliar o comportamento físico-químico do supressor de poeira utilizado nos ensaios de emissão, realizaram-se ensaios para determinar a tensão superficial da solução aquosa em função da concentração do produto. Os testes foram conduzidos em triplicata para garantir a repetibilidade dos resultados experimentais.

A Figura 6.3 apresenta os valores experimentais e um ajuste de curva que fixa o valor de origem na tensão superficial da água e assume uma tendência assintótica a partir de 1 %.

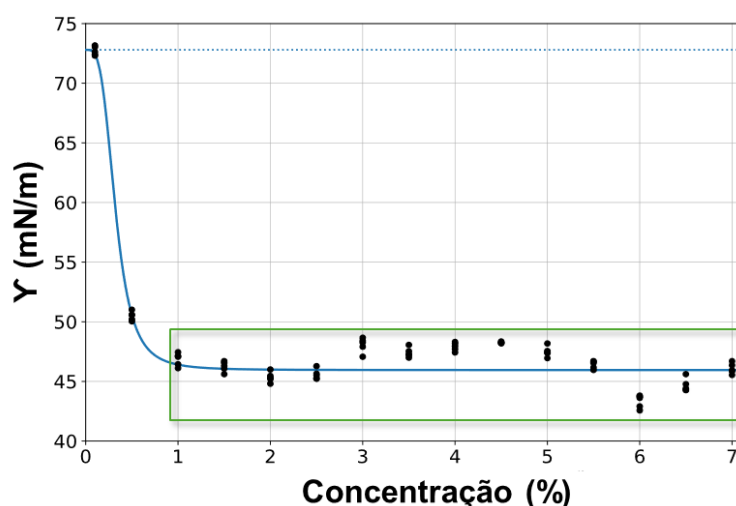


Figura 6.3 - Tensão superficial do supressor em função da concentração.

Com base nas informações do gráfico da Figura 6.3, foi possível identificar em qual região de concentração os menores valores de tensões superficiais se estabilizaram, ou seja, em torno de 2 % de concentração do supressor. Aumentar a concentração acima de 3 % produz variações marginais na tensão superficial e nas propriedades físico-químicas relevantes, o que não é suficiente para melhorar significativamente o desempenho de supressão.

Tendo em vista que a recomendação de concentração do fabricante é de 3 %, optou-se por realizar os testes de emissão em túnel de vento, conforme a metodologia proposta, nas concentrações de 2 %, 3 % e 4 %.

Avaliação do PIC

Foram realizados ensaios para determinar o pH que conduz ao ponto isoelétrico de carga (PIC), o que deveria resultar em alta eficiência na supressão de poeira. Na ausência de um medidor de potencial zeta, utilizou-se a técnica dos 11 pontos, conforme descrito na metodologia, para identificar o pH que conduz ao estado de carga nula.

Inicialmente, realizaram-se ensaios apenas com água. Como resultado, identificou-se um comportamento assintótico do pH final em torno de seis (representado pela linha horizontal na Figura 6.4), o que conduz ao PIC. A condição visual observada após 10 min e 24 horas do ensaio, para os diferentes valores de pH, é apresentada na Figura 6.5.

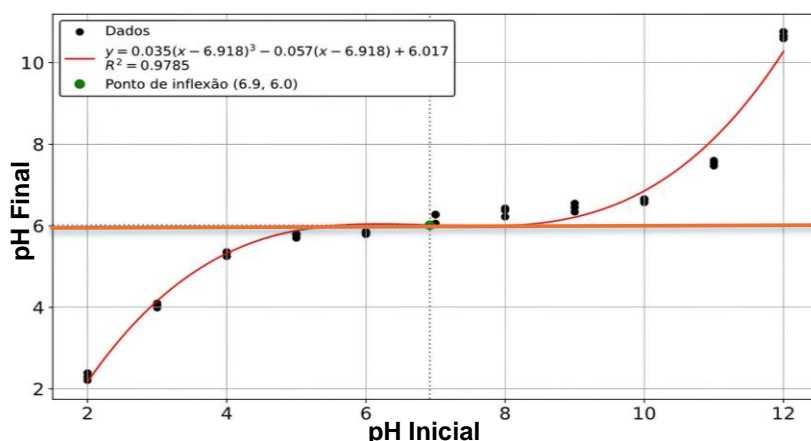


Figura 6.4 - Curva dos resultados dos ensaios dos 11 pontos.

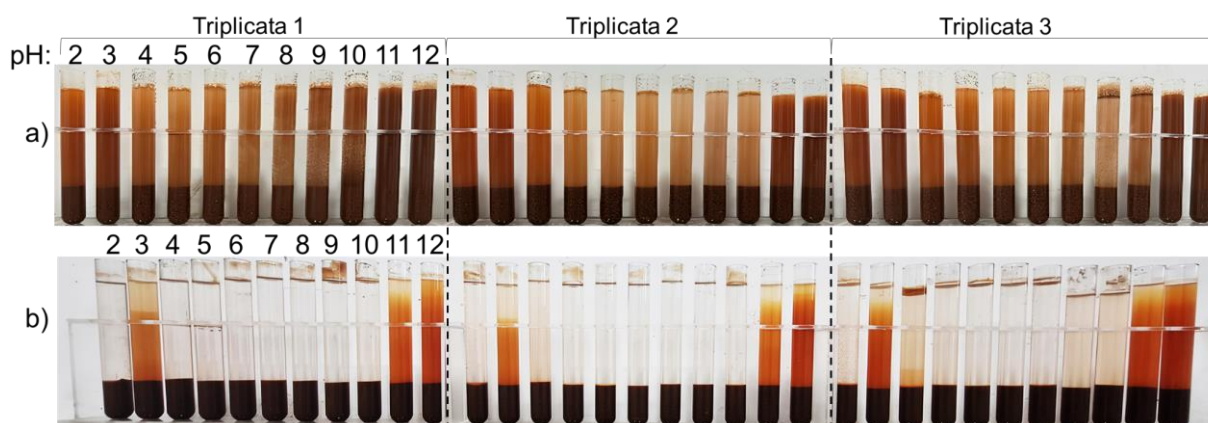


Figura 6.5 - Triplicata dos ensaios de sedimentação em função do pH. a) 10 minutos de ensaio; b) 24 horas de ensaio.

Como o intervalo de pH inicial (pHi) que apresentou estabilidade ficou entre 6

e 8, foram realizados ensaios de emissão considerando $\text{pHi} = 7$ como valor central, incluindo quatro pontos adicionais, variando de 5 a 9. Conforme os ensaios apresentados na Figura 6.6, o $\text{pH}^* = 6$ apresentou a menor taxa de emissão, pois favoreceu a agregação entre partículas finas em suspensão, conforme demonstrado nos ensaios de 11 pontos.

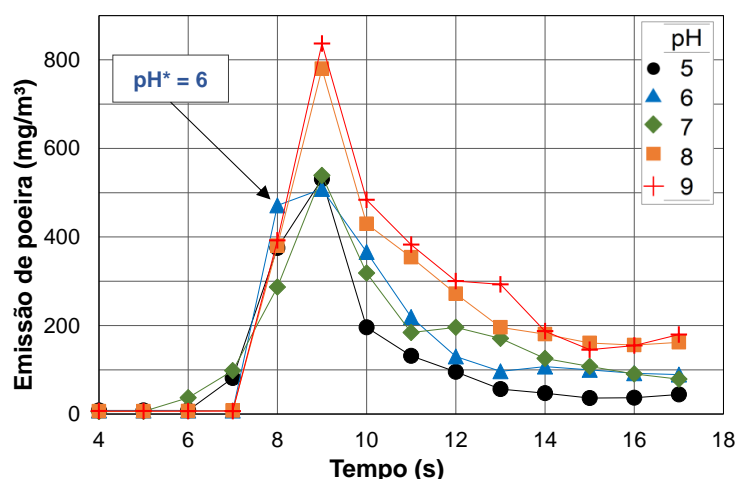


Figura 6.6 - Resultado do ensaio de emissão de poeira da etapa 1, com pH da água variando entre 5 e 9, sem supressor.

Na etapa seguinte, os ensaios foram realizados adotando-se $\text{pH}^* = 6$. Foram avaliadas cinco concentrações, considerando a concentração central $C_{\text{wsi}} = 3\%$, conforme recomendação do fabricante. Foram testadas cinco concentrações: 1 %, 2 %, 3 %, 4 % e 5 % (Figura 6.7).

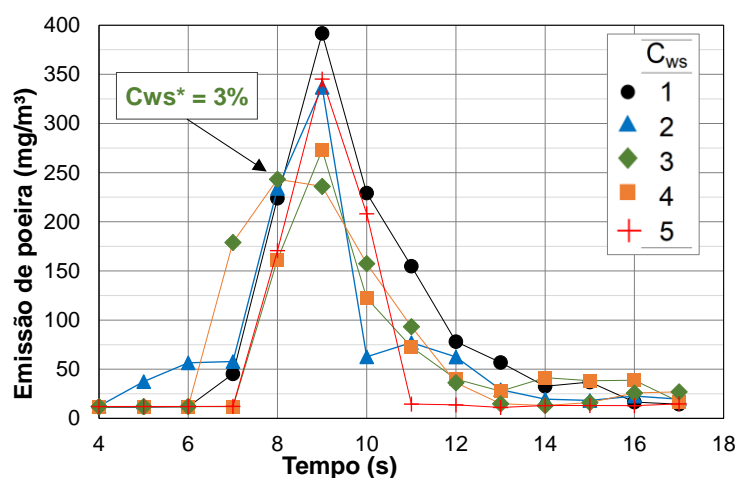


Figura 6.7 - Resultado do ensaio de emissão de poeira da etapa 2, com $\text{pH}^* = 6$ como valor central, e com C_{ws} variando entre 1 e 5 %.

Observou-se que a concentração de 3 % ($C_{\text{ws}}^* = 3\%$) apresentou a maior

eficiência de supressão e que seu incremento não resultou em melhores resultados, conforme já esperado, considerando os ensaios de tensão superficial.

Na etapa final, para confirmar o valor de $\text{pH}^* = 6$ encontrado na etapa 1, variou-se o pH em torno de 7, com a concentração de melhor desempenho para supressão, $C_{\text{ws}}^* = 3\%$, obtida na etapa 2.

Após a análise dos resultados, a combinação encontrada que maximiza a eficiência de supressão de poeira foi $C_{\text{ws}}^* = 3\%$ e $\text{pH}^{**} = 6$ (Figura 6.8), confirmando a recomendação do fabricante quanto à concentração e ao pH^* obtidos na metodologia de determinação do PIC.

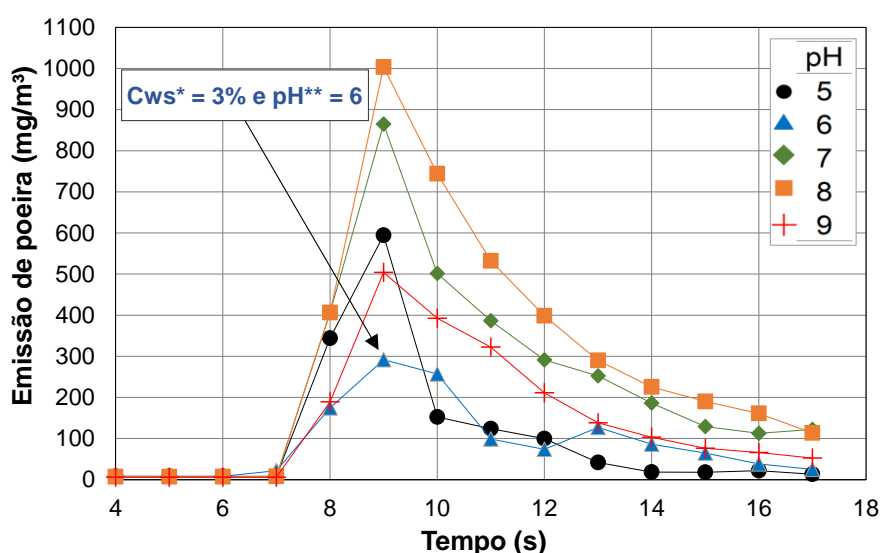


Figura 6.8 – Resultado do ensaio de emissão de poeira da etapa 3, para $C_{\text{ws}}^* = 3\%$, com variação do pH.

Compactação da amostra

Para compactação das amostras, foi obtida a massa específica aparente de referência (ρ_{re}), para a umidade média $\omega = 4,12\%$, e obtidos os valores de massa seca e massa de água necessários, conforme Tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6.1 – Cálculo da massa específica aparente de referência.

Ensaio	Tara do cilindro (g)	Cilindro + material (g)	Material (kg)	ρ_a (kg/m³)	Desvio padrão	Média ρ_{re} (kg/m³)
Ensaio 1	7.712	13.600	5,888	1.822,93		
Ensaio 2	7.712	13.611	5,899	1.826,34	1,8141	1.825,00
Ensaio 3	7.712	13.609	5,897	1.825,72		

Tabela 6.2 - Massa seca e de água para 4,12 % de umidade.

Umidade mínima	
Massa seca (g)	7.000
Teor de umidade (%)	4,12
Massa de água (g)	288,40

A massa total de material (m_T) a ser compactada foi obtida por meio da Equação 6.1:

$$m_T = \rho_{re} \cdot V_b \quad 6.1$$

Dessa forma, os ensaios foram realizados com uma massa de aproximadamente 8,213 kg na bandeja de testes.

Degradação dos corpos de prova

Os corpos de prova foram degradados conforme descrito na metodologia. Na Figura 6.9, mostram-se corpos de prova com $\omega = 5\%$, sem supressor, submetidos a diferentes valores de U . Observa-se que, com o aumento de U , a remoção de partículas do leito dos corpos de prova aumentou (Figura 6.9-b).

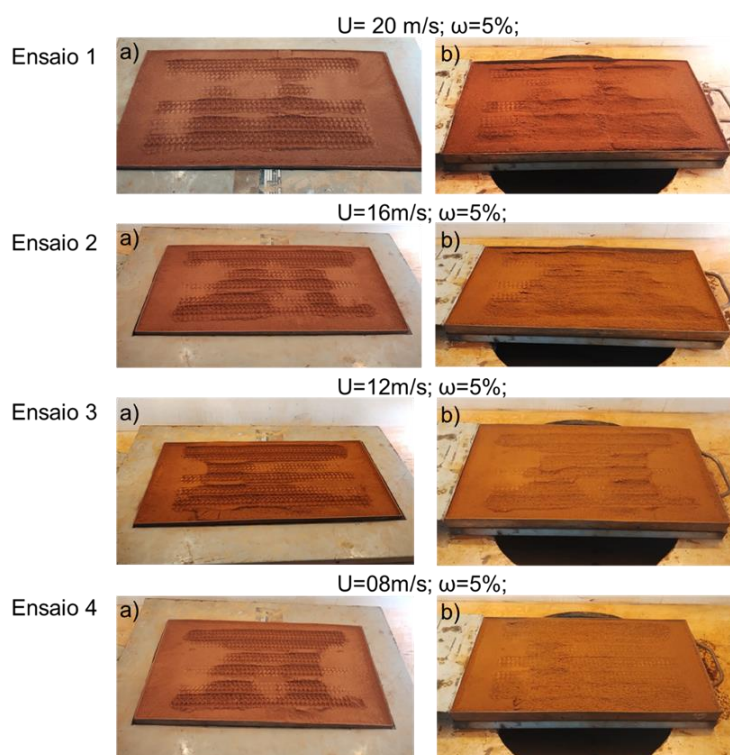


Figura 6.9 - Ensaio de degradação e emissão, sem supressor, variando a velocidade do vento, com $\omega = 5\%$: a) amostra degradada; b) amostra após ensaio de emissão.

Na Figura 6.10, apresentam-se os corpos de prova correspondentes aos ensaios de emissão de uma amostra com supressor, com concentrações variando de 2 % a 4 %. Foram mantidas a umidade em 5 % e a velocidade do vento em 16 m/s. É possível observar, na Figura 6.10-b, que a remoção de partículas do leito do corpo de prova foi inversamente proporcional ao aumento da concentração do agente supressor. Outro aspecto que chama a atenção nos ensaios apresentados na Figura 6.10-a é que o supressor aparenta ter proporcionado maior estabilização do leito, o que reduziu a degradação à medida que se aumentava a concentração. Esse comportamento está associado às características dos supressores ligantes (coesivos), conforme representado na Figura 2.11.

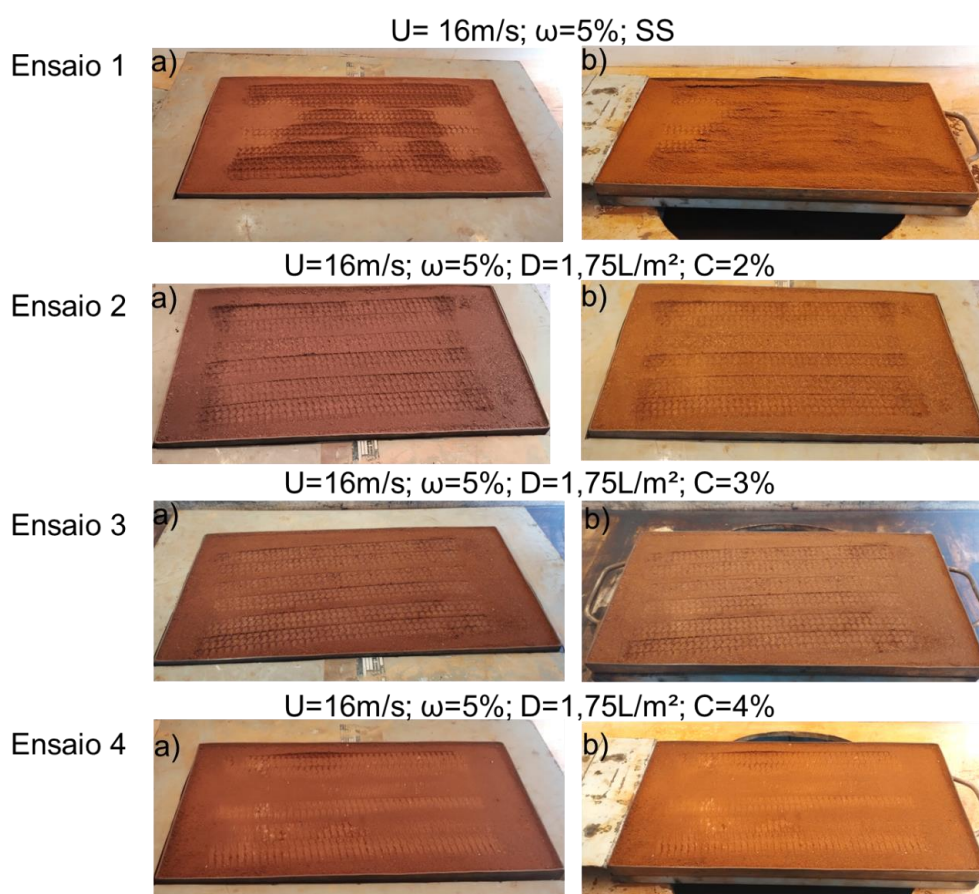


Figura 6.10 - Ensaio de degradação e emissão para $\omega = 5\%$, variando C_{ws} : a) amostra degradada; b) amostra após ensaio de emissão.

A Figura 6.11 apresenta os resultados do ensaio de emissão, com as dosagens 1,17 L/m², 1,75 L/m² e 2,33 L/m². Os resultados são similares aos da Figura 6.10, reforçando a influência do supressor na estabilização do leito do corpo de prova, tornando-o mais resistente à degradação (Figura 6.11-a) e reduzindo

substancialmente a remoção de partículas (Figura 6.11-b).

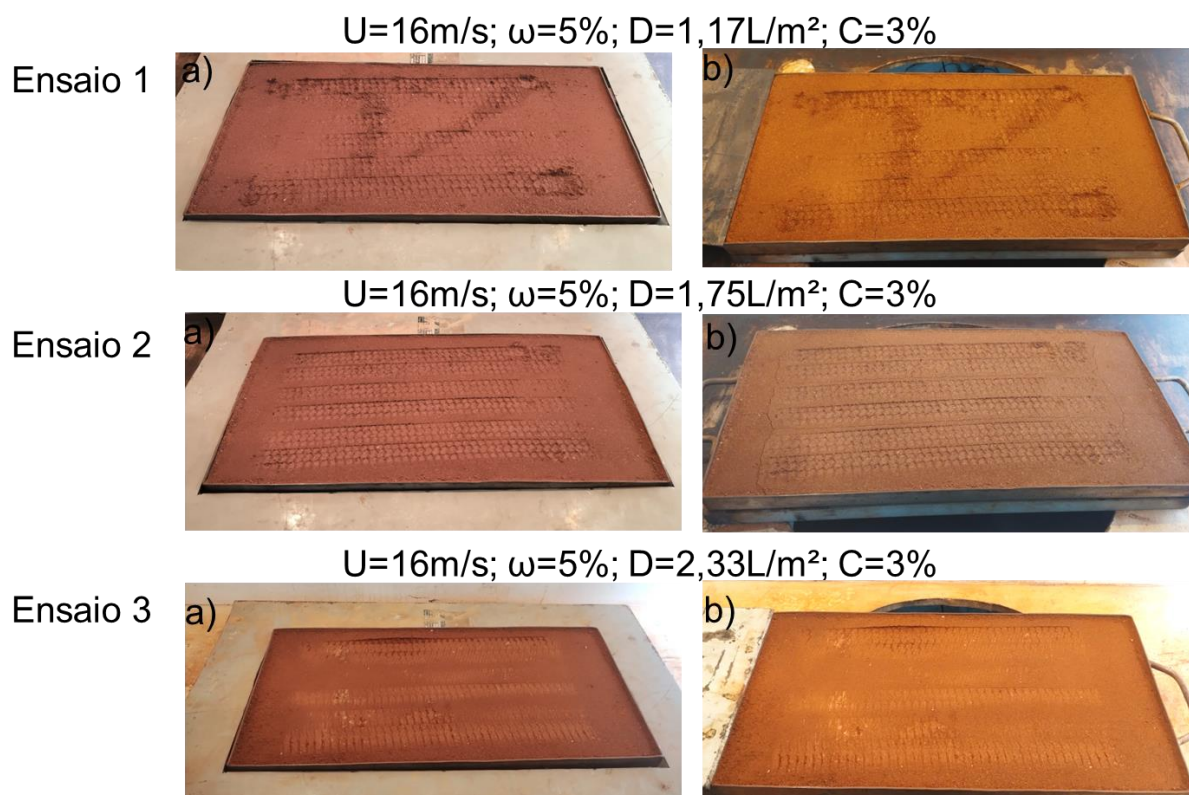


Figura 6.11 - Ensaio de degradação e emissão para $\omega = 5\%$, variando d : a) amostra degradada; b) amostra após ensaio de emissão.

Perfil de velocidade do vento

Para investigar o perfil de velocidades no túnel de vento, foram realizados ensaios com velocidades de vento de 8, 12, 16 e 20 m/s, e umidades de 3 %, 5 % e 7 %, sem aplicação de supressor. Para umidade de 7 % foi realizado ensaio somente para a velocidade de 16 m/s. A Figura 6.12 apresenta os perfis de velocidades obtidos. Foi possível observar uma camada limite típica de escoamento turbulento e um perfil vertical uniforme no centro do túnel, ambos decorrentes da contração do túnel de vento. Os resultados confirmam o perfil de velocidades do estudo para esse túnel de vento realizado por Menezes *et al.* (2015). Resultados semelhantes para ensaios de perfil de velocidade em túnel de seção curta foram encontrados por Hlevca e Degeratu (2020) .

Por se tratar de um túnel de seção curta, o perfil de escoamento obtido não se comportou como o de uma camada limite atmosférica típica. Esse fato não trouxe

prejuízos às análises realizadas, pois o objetivo foi a comparação dos resultados obtidos com as técnicas aplicadas, validando a metodologia proposta. Por outro lado, para esse tipo de ensaio, seria mandatória a medição da camada limite de campo, e então, os ensaios seriam reproduzidos em túnel de vento de seção curta utilizando a técnica apresentada por Hlevca e Degeratu (2020), ou utilizando um túnel de vento de camada limite, com os devidos ajustes.

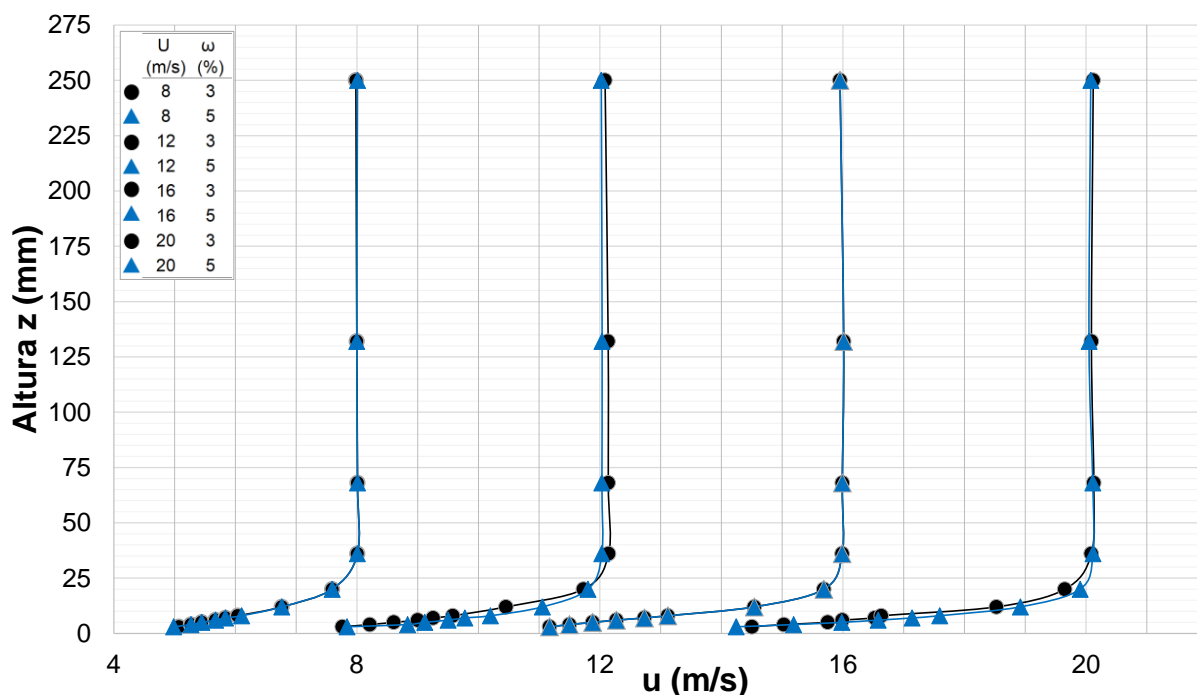


Figura 6.12 - Perfil de velocidades do vento para $\omega = 3\%$ e $\omega = 5\%$, sem aplicação de supressor.

O efeito da umidade do solo é observado por uma leve diminuição da velocidade local, caracterizando um efeito esperado no perfil de velocidade, capturado pelo valor de velocidade de atrito, como será discutido mais adiante. Esses resultados estão em concordância com os achados de Sharratt e Vaddella (2014) e Gao, B. *et al.* (2021).

Velocidade de atrito e emissão de poeira

Os estudos realizados por diversos pesquisadores, como Dupont (2020) e Panebianco e Buschiazzo (2022), tratam a velocidade de atrito como o parâmetro dinâmico que controla o início e a intensidade da emissão eólica de partículas, por estar diretamente relacionada ao perfil logarítmico da velocidade do vento na superfície da via.

Com o intuito de avaliar a relação entre as velocidades de atrito em diferentes condições do leito do solo estudado, esse parâmetro foi calculado para todas as configurações dos ensaios. Na Figura 6.13, são apresentadas as velocidades de atrito considerando o leito do solo estudado sem supressor, com umidades de 3 % e 5 % e velocidade do vento de 16 m/s, sem aplicação de supressor. Os resultados sugerem uma forte relação entre a velocidade do vento, a velocidade de atrito e a umidade do solo. Com o aumento da umidade, é possível observar a elevação da velocidade de atrito (maior cisalhamento do vento no leito), representada pela diminuição do ângulo entre as retas e o eixo horizontal. Isso implica que, na presença de maior umidade, o sistema precisa de ventos mais intensos (velocidade de atrito maior) para superar as forças que tendem a retardar o início do movimento das partículas.

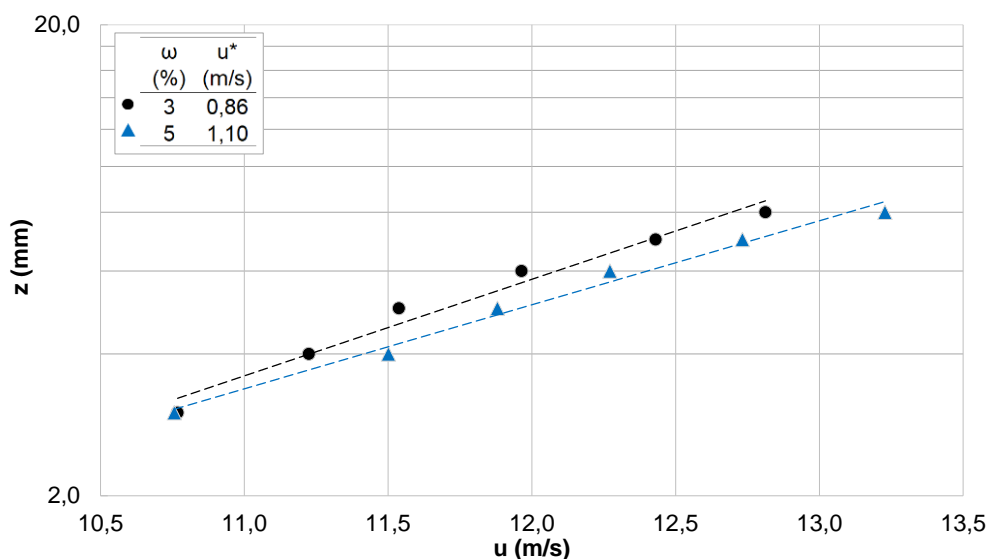


Figura 6.13 - Velocidade de atrito em função da umidade, para $U = 16$ m/s, sem supressor.

A literatura demonstra de forma consistente, que o aumento do teor de água no material influencia diretamente a velocidade de atrito. Esses resultados estão em conformidade com os obtidos por Fécan *et al.* (1999) e De Oro *et al.* (2019).

Como esperado, com o aumento das forças coesivas entre as partículas devido à umidade, houve a diminuição na emissão de poeira.

Esse comportamento é demonstrado na Figura 6.14, na qual, para a mesma velocidade do vento (16 m/s), variou-se a umidade, com o objetivo de analisar os respectivos valores de emissão de particulados, em termos de concentração média.

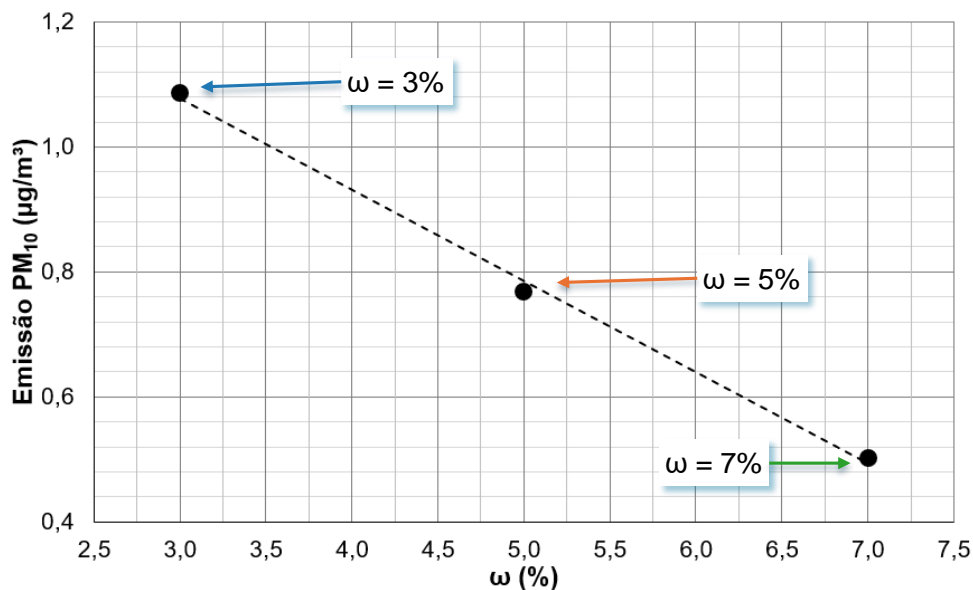


Figura 6.14 - Concentrações médias de emissões de poeira em função da umidade (3, 5 e 7 %), para $U = 16$ m/s, sem supressor.

Na Figura 6.15 são apresentados os valores de velocidade de atrito (u^*) em função da velocidade do vento (U) para uma umidade de 5 %, confirmando o comportamento típico observado na literatura, como, por exemplo, nas pesquisas de Panebianco e Buschiazzo (2022) e de Yulevitch *et al.* (2020).

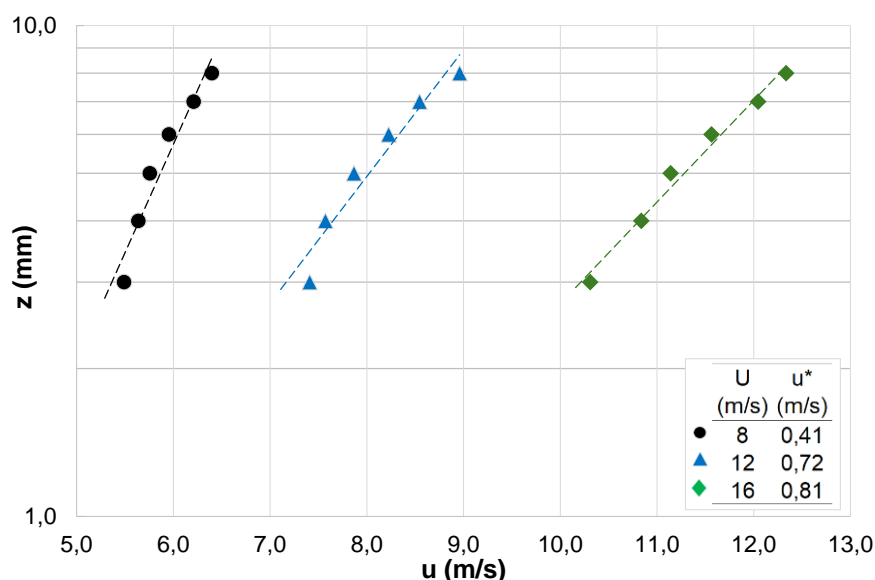


Figura 6.15 - Velocidade de atrito (u^*) em função de u , para diferentes velocidades de vento U ($\omega = 5$ %, $C_{ws} = 3$ %, $d = 1,75$ L/m²).

Foram realizados ensaios para avaliar a velocidade de atrito em função da dosagem do supressor (Figura 6.16) e da concentração (Figura 6.17). A aplicação de supressores de poeira em vias não pavimentadas implica diretamente no aumento da

coesão superficial entre as partículas do solo, alterando o comportamento aerodinâmico da superfície em relação ao cisalhamento causado pelo vento e, portanto, resultando no aumento da velocidade de atrito, conforme demonstrado nas Figuras 6.16 e 6.17.

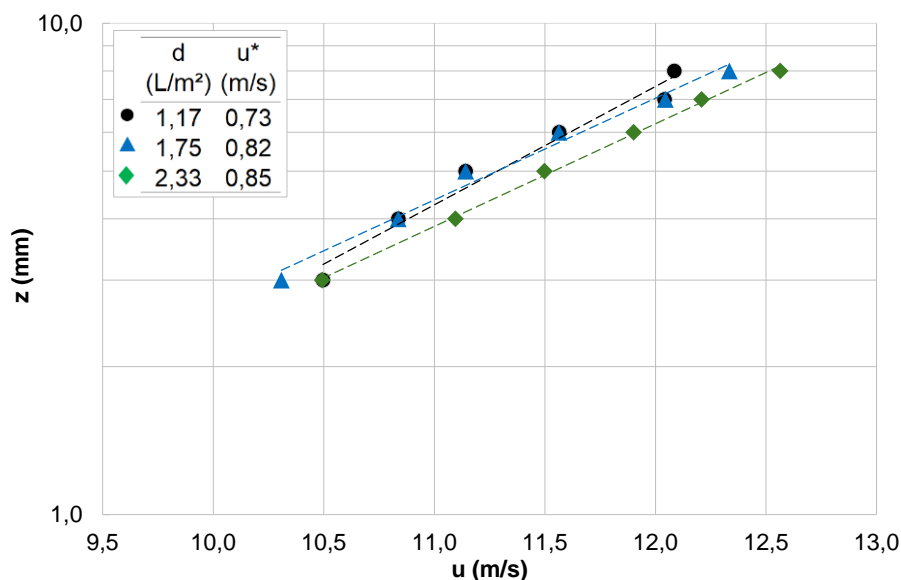


Figura 6.16 - Velocidades de atrito em função da dosagem, para $U = 16$ m/s e $\omega = 5$ %.

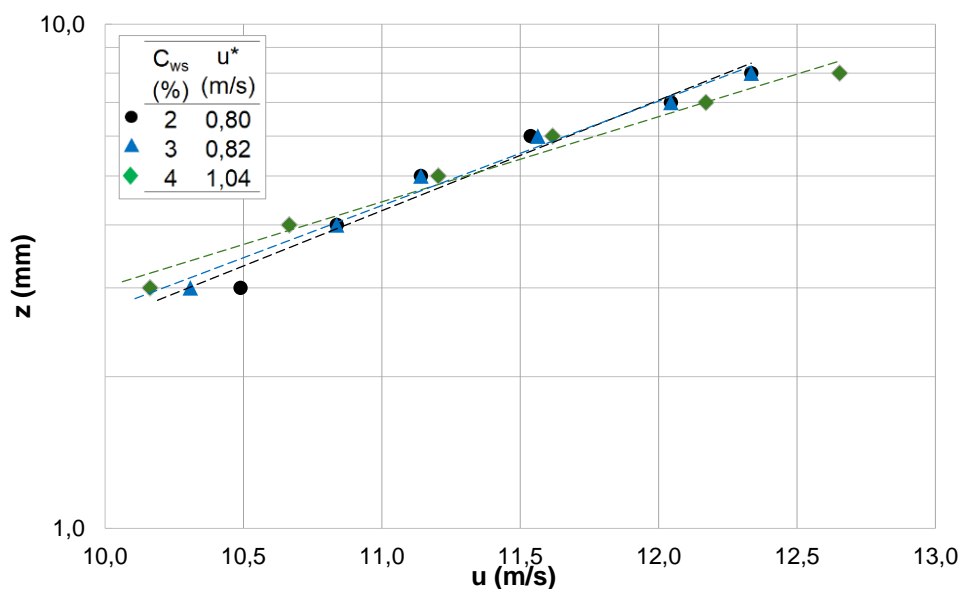


Figura 6.17 - Velocidades de atrito em função de C_{ws} , para $U = 16$ m/s e $\omega = 5$ %.

Os resultados sintetizados na Figura 6.18 mostram, de forma sistemática, o aumento dos valores de velocidade de atrito em função do incremento de ω , C_{ws} e d , ainda que cada parâmetro tenha apresentado um patamar próprio de velocidades de

atrato. A variação da média das velocidades de atrito para cada condição da Figura 6.18 é representada pela linha contínua na cor laranja denominada “valores médios das velocidades de atrito”.

A diferença nos patamares dos valores de u^* sugere que o parâmetro de dosagem foi mais eficiente do que a concentração e a umidade para reduzir a rugosidade superficial do leito da via.

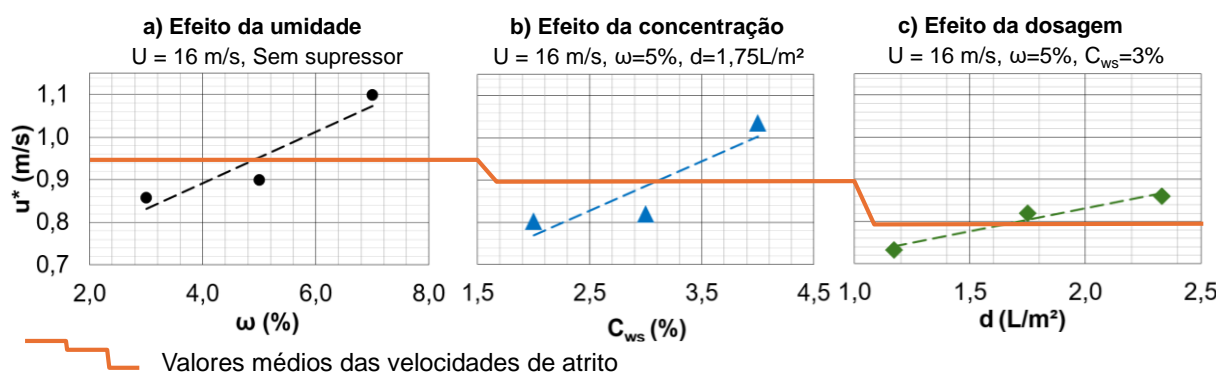


Figura 6.18 - Velocidades de atrito em função da: a) ω ; b) C_{ws} ; e c) d . Para $U = 16$ m/s.

Resultados de emissão de poeira

As Figuras 6.19 a 6.23 apresentam os resultados de emissão de poeira (concentração medida em cada Δt_a) em função do tempo, considerando uma janela temporal de 7.234 segundos. As Figuras 6.19, 6.20 e 6.21 confirmam os resultados esperados, segundo os quais a emissão de poeira aumenta proporcionalmente ao aumento da velocidade do vento, considerando umidades de 3 % e 5 %.

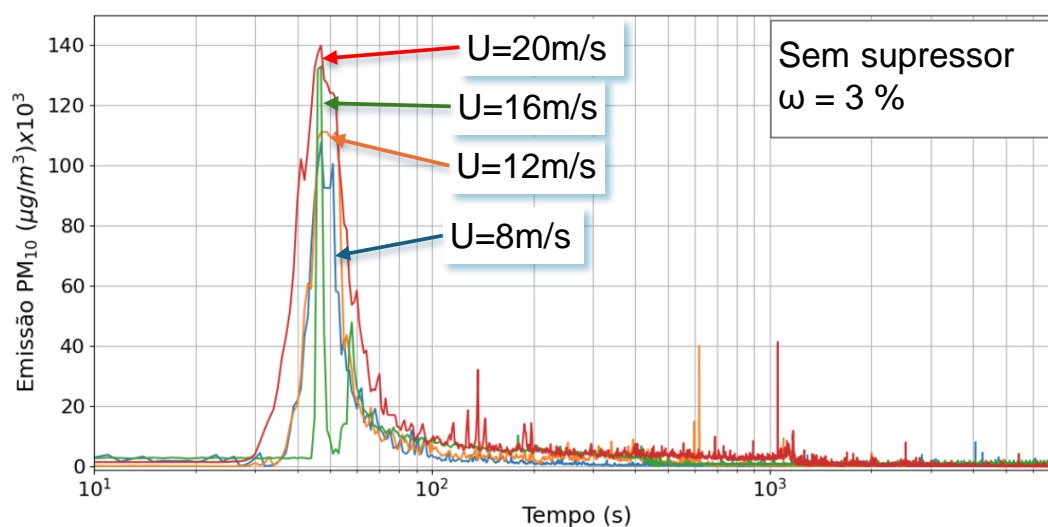


Figura 6.19 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 3\%$, variando U , sem supressor.

Em todos os casos apresentados, é possível observar um pico de emissão nos primeiros segundos, seguido de uma redução significativa após algum tempo. Esse comportamento está relacionado à condição inicial de degradação do solo, que facilita a movimentação de partículas que entram em movimento de *saltation*, liberando partículas PM₁₀ pelo choque subsequente dessas partículas, como descrito por Shao (2009).

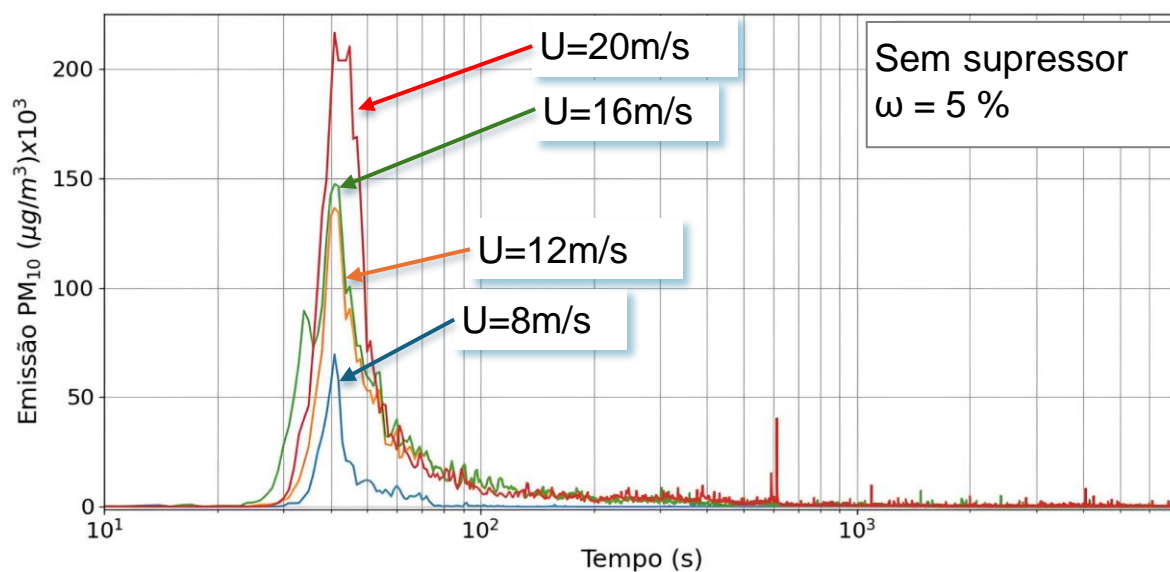


Figura 6.20 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5\%$, variando U , sem supressor.

Adicionalmente, a degradação do leito dos corpos de prova, como ocorre em uma via real por efeito da passagem de veículos, faz com que sejam gerados “reservatórios” de partículas, que estarão suscetíveis de serem transportados pela ação dos ventos. Esses “reservatórios” de MP no leito do corpo de prova são limitados por não possuírem mecanismos ativos de recarga (discutidos nos capítulos anteriores), ao contrário do que ocorre em uma via real. Vale ressaltar que, nos ensaios realizados sem degradação do solo, a emissão foi substancialmente baixa, sugerindo que a capacidade de emissão de MP de um solo, de forma contínua, depende fortemente da realimentação dos “reservatórios”.

Depois que a disponibilidade de partículas de dimensões e características suficientes para serem carregadas pelo vento cessa, as partículas maiores e/ou agregadas permanecem no leito sob ação de forças coesivas, seja pela umidade do solo ou pela ação do supressor, intensificadas pela compactação. Uma das alternativas para a recarga dos “reservatórios” durante os ensaios seria o emprego de um mecanismo de degradação contínua ao longo dos ensaios.

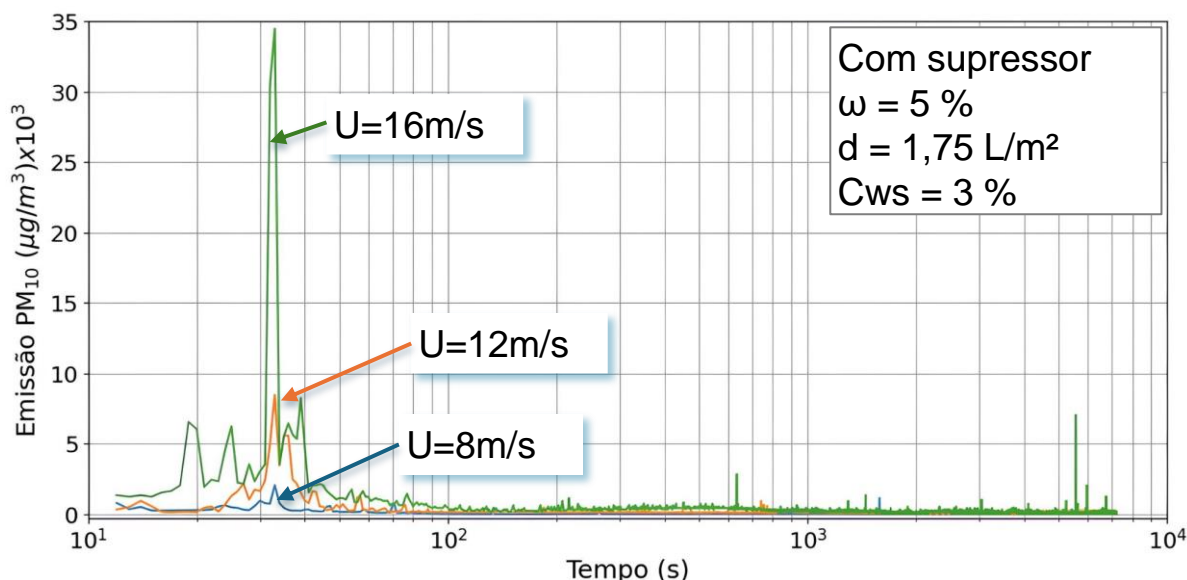


Figura 6.21 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5 \%$; $C_{ws} = 3 \%$; $d = 1,75 \text{ L/m}^2$, variando U .

Desses resultados, em especial para $U = 20 \text{ m/s}$, é possível observar que picos subsequentes de emissão ocorreram eventualmente, com maior frequência para $\omega = 3 \%$, no mesmo intervalo de ensaio. Esse comportamento sugere que a umidade interfere diretamente nas forças de coesão entre as partículas. Entretanto, como não foi realizada a análise do processo de secagem do leito do corpo de prova não é possível afirmar que a formação dos picos subsequentes ao pico de maior intensidade decorreu desse processo.

Conforme apresentado nas Figuras 6.21, 6.22 e 6.23, a aplicação de supressor, em qualquer combinação de concentração e dosagem, reduziu substancialmente as emissões em comparação com os casos sem supressor, independentemente da umidade e da velocidade do vento. Para fins de comparação das emissões, foi inserido nos gráficos das Figuras 6.22 e 6.23 o ensaio com uma umidade de 5% e uma velocidade do vento de 16 m/s , sem a aplicação de supressor.

A aplicação de supressor, variando-se a dosagem e mantendo-se a concentração em 3% , sugere uma atenuação mais eficiente dos picos de emissão do que variando a concentração para uma mesma dosagem, conforme apresentado nas Figuras 6.22 e 6.23. Embora a dosagem de $2,33 \text{ L/m}^2$ tenha apresentado um pico superior à maioria dos demais ensaios com supressor (Figura 6.22), ao analisar a emissão em termos de concentração média, observou-se um valor menor, como será discutido posteriormente. Esse pico de emissão pode estar associado a um depósito de material particulado formado durante o manuseio da bandeja de testes, ou ainda,

devido à não remoção de material particulado não compactado das bordas da bandeja após a compactação.

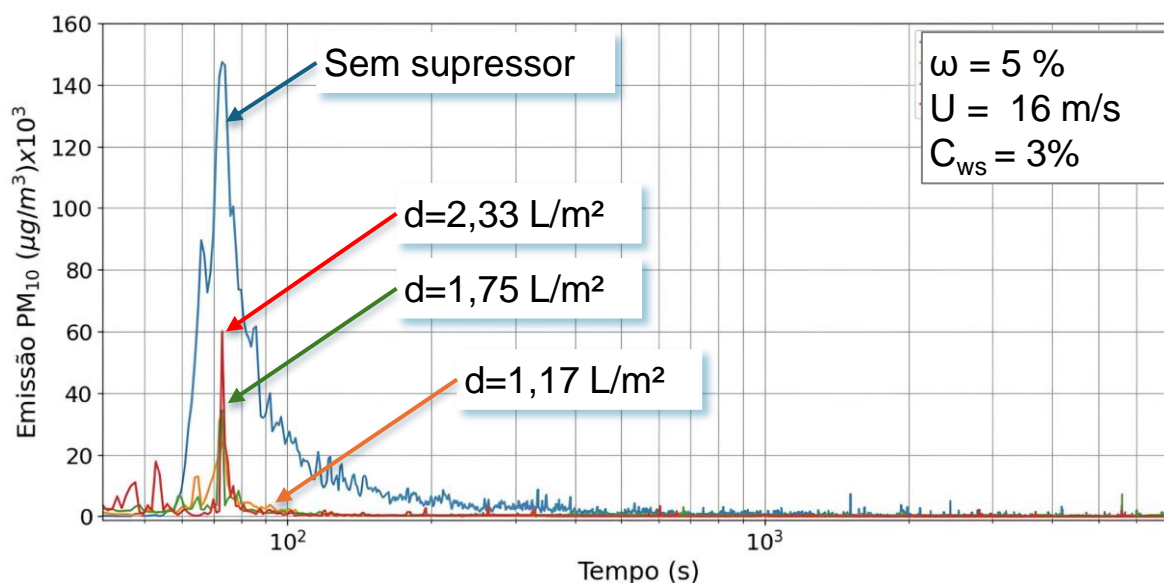


Figura 6.22 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5\%$; $C_{ws} = 3\%$, $U = 16$ m/s; variando d .

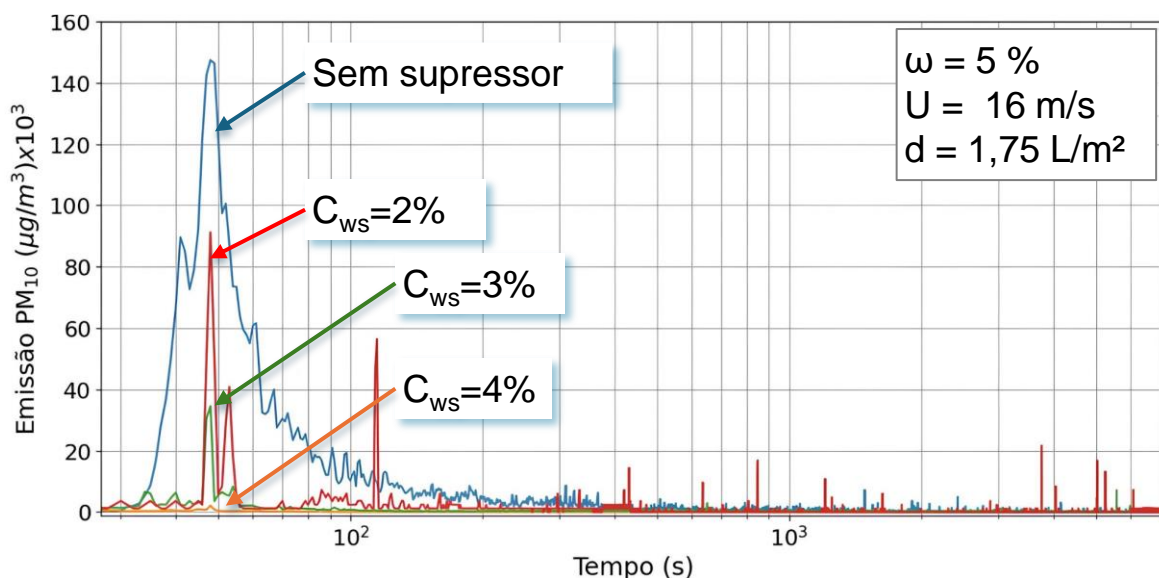


Figura 6.23 - Ensaio de emissão de poeira: $\omega = 5\%$, $d = 1,75$ L/m²; $U = 16$ m/s; variando C_{ws} .

Com o objetivo de avaliar a correlação entre a emissão de poeira e a velocidade de atrito, a Figura 6.24 apresenta resultados obtidos em ensaios sob as seguintes condições: (a) sem supressor e umidade de 3 %; (b) sem supressor e umidade de 5 %; e (c) com supressor e umidade de 5 %, concentração de 3 % e dosagem de 1,75 L/m². Os ensaios foram realizados nas velocidades de 8, 12, 16 e

20 m/s, exceto no ensaio que considerou a aplicação de supressor, no qual foram testadas as velocidades de 8, 12 e 16 m/s. Verifica-se que a concentração média das emissões é atenuada com o aumento da umidade e com a aplicação de supressor, conforme discutido na literatura (MATSUSHIMA *et al.*, 2020; SIEGER *et al.*, 2023).

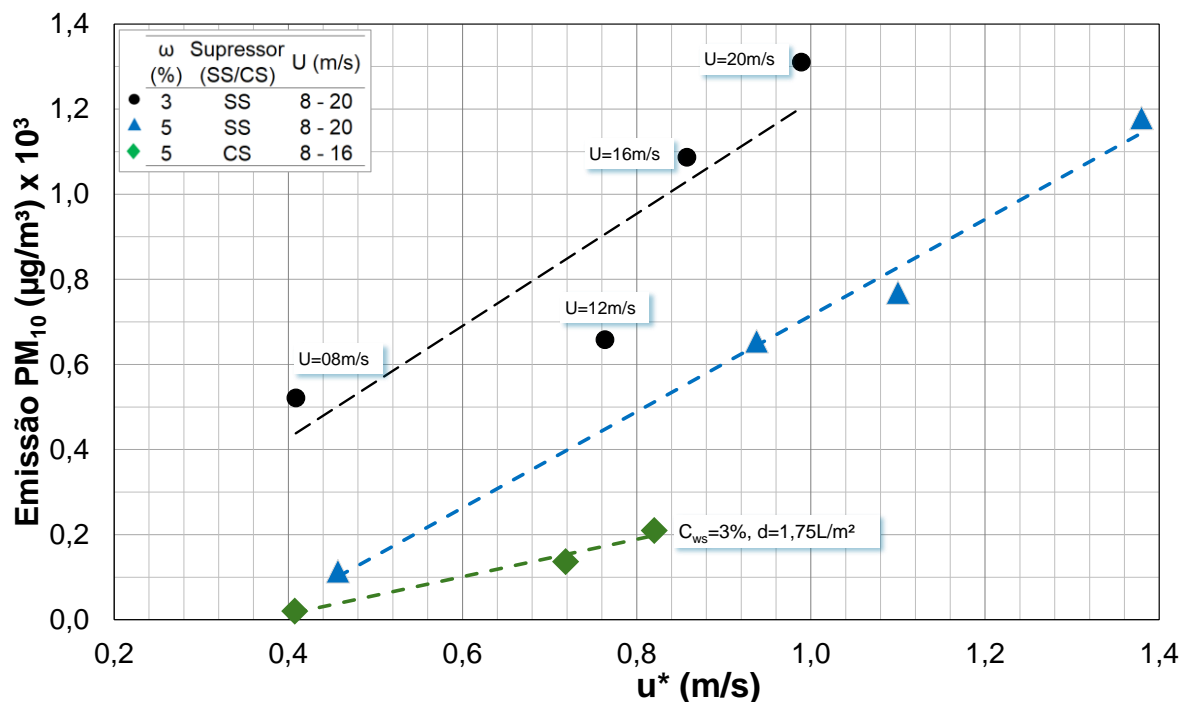


Figura 6.24 - Concentrações médias de emissões de poeira em função da u^* ($C_{ws} = 3\%$; $d = 1,75 \text{ L/m}^2$).

A aplicação do supressor reduziu substancialmente as emissões, pois aumentou a coesão entre as partículas, diminuindo a disponibilidade de partículas suscetíveis ao arraste eólico e aumentando a resistência à desagregação. Na prática, isso significa que, em vias com aplicação de supressor, são necessárias velocidades de vento mais altas para iniciar a emissão, o que reduz drasticamente a emissão, confirmando as tendências de emissão em função de u^* e U observadas ao comparar as condições de ensaios apresentadas na Figura 6.24.

Com base nos resultados da Figura 6.24, a média da redução das emissões para as três velocidades ensaiadas (8, 12 e 16 m/s), da condição com supressor em relação à condição sem supressor, para as umidades de 3 e 5 %, foi de 85 % e 78 % respectivamente. Reduções de emissão de até 90 % foram documentadas por Panebianco e Buschiazzo (2022) e por Addo *et al.* (2024) em vias com supressor, em comparação com vias sem supressor, submetidas às mesmas velocidades de vento.

A Figura 6.25 apresenta uma síntese dos efeitos de concentração e dosagem do supressor na emissão de poeira, para uma umidade de 5 % e uma velocidade do vento de 16 m/s. Para a variação de dosagem, a concentração permaneceu constante, igual a 3 %, e, para a variação de concentração, a dosagem permaneceu constante, igual a 1,75 L/m², gerando um ponto comum de emissão, identificado na Figura 6.25 pela linha vertical pontilhada.

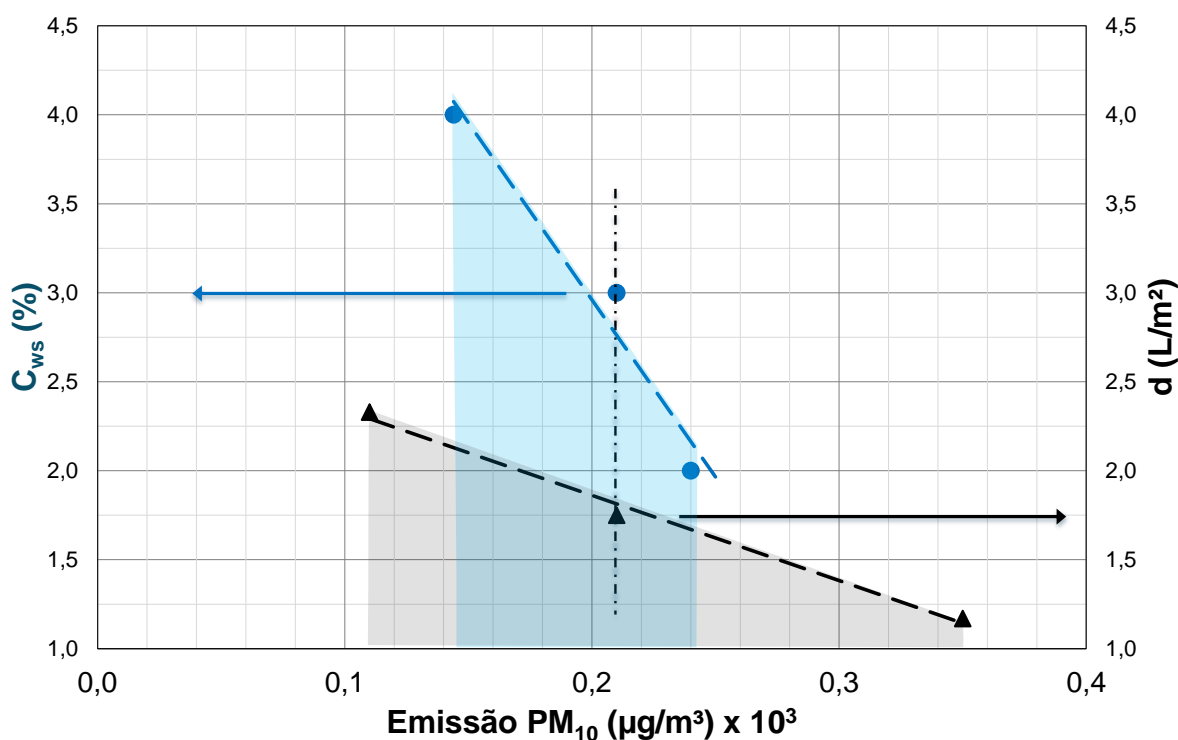


Figura 6.25 - Concentrações médias de emissões de poeira variando d e C_{ws} . $U = 16$ m/s; $\omega = 5$ %.

Os resultados indicam que o parâmetro de dosagem exerce maior influência na redução das emissões do que a concentração. Considerando a dosagem máxima de supressor testada 2,33 L/m² na concentração de 3 % e na umidade de 5 %, a redução na emissão de particulados foi de 86 % em relação ao leito sem supressor (considerando $U = 16$ m/s; $\omega = 5$ %). Enquanto para a concentração de 3 % e a dosagem de 1,75 L/m², a redução foi de 73 % em relação à condição sem supressor (considerando $U = 16$ m/s e $\omega = 5$ %). Uma síntese das reduções percentuais em termos de concentrações médias pode ser observada na Figura 6.26

Além da maior influência da dosagem, incrementos desse parâmetro resultam em reduções expressivas e consistentes da emissão de poeira, maiores do que as

observadas com incrementos na concentração, conforme demonstrado pelas áreas marcadas abaixo das curvas da Figura 6.25.

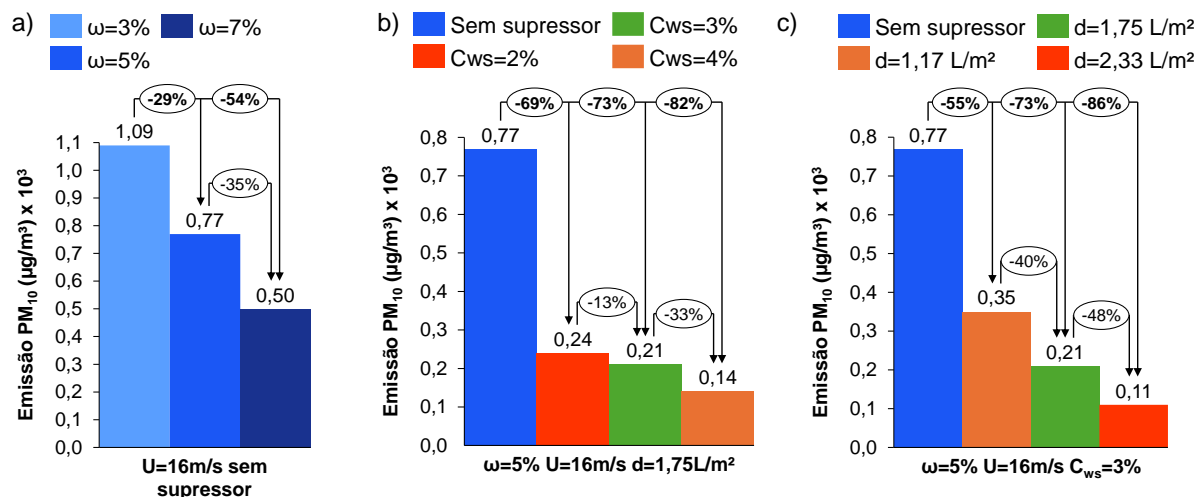


Figura 6.26 - Reduções percentuais de emissões (concentração média) em relação ao cenário sem supressor.

A menor influência da concentração do supressor na redução da emissão pode estar associada à pequena variação da tensão superficial nas concentrações estudadas, conforme demonstrado na Figura 6.3. Por outro lado, o incremento da dosagem nos ensaios realizados mostrou-se fortemente associado à redução das emissões. Wang *et al.* (2021), em suas pesquisas, chamam a atenção para a importância da tensão superficial para a eficácia dos supressores e sugerem que variações pequenas nesse parâmetro podem não resultar em diferenças significativas no desempenho.

A predominância da dosagem sobre a concentração na efetividade da supressão de poeira, é corroborada por diversos pesquisadores. Resultados similares foram obtidos por Katra (2019), em que a eficiência de supressão foi principalmente controlada pela dosagem, uma vez que a concentração da solução foi mantida constante, e reduções moderadas na dosagem ainda mantiveram eficiências $\geq 90\%$.

A síntese de todos os resultados dos ensaios realizados, dos parâmetros utilizados e das incertezas de medição é apresentada na Tabela 6.3. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica do uso de supressores de poeira como ferramenta eficaz para o controle de emissões em vias não pavimentadas de mineração, fornecendo subsídios para a otimização operacional, com redução das emissões de

poeira e, possivelmente, do consumo de água.

Tabela 6.3 - Resultados dos ensaios de emissão, u^* e incertezas de medição.

#	$^1\omega$ (%)	$^2\omega_m$ (%)	$\delta\omega_m$ (\pm %)	U (m/s)	d (L/m ²)	C_{ws} (%)	u^* (m/s)	δu^* (\pm m/s)	3 Emissão PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) $\times 10^3$
1	3	2,91%	0,02%	8	0	0	0,41	0,0116	0,52
2	3	3,05%	0,02%	12	0	0	0,76	0,0050	0,66
3	3	3,12%	0,01%	16	0	0	0,86	0,0018	1,09
4	3	3,17%	0,02%	20	0	0	0,99	0,0055	1,31
5	5	5,24%	0,02%	8	0	0	0,46	0,0217	0,11
6	5	5,04%	0,02%	12	0	0	0,94	0,0028	0,65
7	5	5,04%	0,01%	16	0	0	0,90	0,0043	0,77
8	5	5,13%	0,02%	20	0	0	1,38	0,0001	1,18
9	7	7,15%	0,02%	16	0	0	1,10	0,0012	0,50
10	5	5,15%	0,02%	16	1,75	3	0,82	0,0034	0,21
11	5	5,18%	0,02%	12	1,75	3	0,72	0,0115	0,14
12	5	5,12%	0,02%	8	1,75	3	0,41	0,0605	0,02
13	5	5,31%	0,02%	16	1,75	2	0,80	0,0058	0,24
14	5	5,18%	0,02%	16	1,75	4	1,04	0,0020	0,14
15	5	5,08%	0,01%	16	1,17	3	0,73	0,0070	0,35
16	5	5,15%	0,02%	16	2,33	3	0,86	0,0011	0,11

¹ ω Umidade de referência. ² ω_m Umidade medida. ³ Concentração média em 7.234 seg.

As incertezas máximas de medição relativas ao campo de velocidades u para cada grupo de ensaios são apresentadas na Tabela 6.4.

Tabela 6.4 - Valores máximos das incertezas dos valores do campo de velocidades u .

Ensaio	Incerteza máxima δu (\pm m/s)	Ensaio	Incerteza máxima δu (\pm m/s)
$\omega=3\%$ U=8m/s SS	0,04675	$\omega=7\%$ U=16m/s SS	0,02386
$\omega=3\%$ U=12m/s SS	0,02992	$\omega=5\%$ U=16m/s d=1,75L/m ² $C_{ws}=3\%$	0,02471
$\omega=3\%$ U=16m/s SS	0,02944	$\omega=5\%$ U=12m/s d=1,75L/m ² $C_{ws}=3\%$	0,03179
$\omega=3\%$ U=20m/s SS	0,02209	$\omega=5\%$ U=8m/s d=1,75L/m ² $C_{ws}=3\%$	0,04132
$\omega=5\%$ U=8m/s SS	0,04254	$\omega=5\%$ U=16m/s d=1,75L/m ² $C_{ws}=2\%$	0,02490
$\omega=5\%$ U=12m/s SS	0,02932	$\omega=5\%$ U=16m/s d=1,75L/m ² $C_{ws}=4\%$	0,02478
$\omega=5\%$ U=16m/s SS	0,02317	$\omega=5\%$ U=12m/s d=1,17L/m ² $C_{ws}=3\%$	0,02318
$\omega=5\%$ U=20m/s SS	0,02207	$\omega=5\%$ U=8m/s d=2,33L/m ² $C_{ws}=3\%$	0,02421

Os valores das incertezas associados a cada valor do campo de velocidades u são apresentados no APÊNDICE A - Incertezas experimentais.

Cálculo do IQAr

O cálculo do IQAr exige que seja avaliada a média aritmética das emissões em um período de 24 h corridas. Os resultados de emissão apresentados na Tabela 6.3 dizem respeito a concentração média medida no tempo de referência (Δt_R), ou seja, 7.234 segundos (2 horas).

Se uma dada concentração de emissão foi medida em laboratório, em um período de 7.234 segundos (C_m), foi considerado, hipoteticamente, que nas outras 22 h, a concentração da emissão foi desprezível (concentração de fundo - C_f), o que na prática, significa dizer que não houve tráfego de veículos. Para fins de avaliação do IQAr, as concentrações das emissões no tempo de referência foram ajustadas para um período de 24 h (C_{24}), usando a Equação 6.2:

$$C_{24} = \frac{(C_m \cdot 2) + (C_f \cdot 22)}{24} \quad 6.2$$

É importante considerar na interpretação do IQAr, que o processo de degradação da via na metodologia apresentada, não foi um processo contínuo como em uma via não pavimentada real, com tráfego regular de veículos. Ou seja, o “reabastecimento” dos reservatórios de poeira após a emissão limita-se ao material particulado que não entrou em suspensão. De outra forma, o tráfego contínuo de veículos “reabastecerá” esses reservatórios, gerando material particulado disponível para gerar poeira fugitiva de forma contínua, conforme ilustrado na Figura 2.18.

Na Tabela 6.5 são apresentados os valores de concentração média das emissões medidas em laboratório e suas respectivas classificações da qualidade do ar utilizando o IQAr (Equação 2.17), conforme orienta a Resolução CONAMA nº 491/18 (MMA, 2025).

Tabela 6.5 - IQAr para diferentes cenários de supressão ($U = 16$ m/s, $\omega = 3$ e 5 %).

Concentração média ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)x10 ³	SS $\omega=3\%$	SS $\omega=5\%$	$\omega=5\%$, $C_{ws}=2\%$, $d=1,75\text{L}/\text{m}^2$	$\omega=5\%$, $C_{ws}=3\%$, $d=1,75\text{L}/\text{m}^2$	$\omega=5\%$, $C_{ws}=4\%$, $d=1,75\text{L}/\text{m}^2$	$\omega=5\%$, $C_{ws}=3\%$, $d=1,17\text{L}/\text{m}^2$	$\omega=5\%$, $C_{ws}=3\%$, $d=2,33\text{L}/\text{m}^2$
C_m	1,087	0,769	0,240	0,210	0,144	0,350	0,110
C_f	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
C_{24}	0,113	0,087	0,043	0,040	0,035	0,052	0,032
IQAr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	92	71	38	36	31	46	29
Qualidade do ar	Ruim	Moderada	Boa	Boa	Boa	Moderada	Boa

As emissões foram corrigidas para um período de 24 h com aplicação da Equação 6.2.

Os resultados de concentração média em 24 horas (C_{24}) medidos pela metodologia desenvolvida, mostram claramente que o leito da estrada sem aplicação de supressor emite MP acima dos limites recomendados pelo CONAMA. Ademais, quatro das cinco condições testadas com aplicação de supressor mantiveram os níveis de emissão de MP que classificam a qualidade do ar como Boa, e apenas uma condição leva a qualidade do ar a uma classificação Moderada, conforme os critérios indicados na Tabela 2.3.

Os resultados da Tabela 6.5 foram utilizados para a avaliação e classificação dos impactos dos temas materiais analisados no Capítulo 6.2.

Resultados de consumo de água e consumo de supressor

Foram avaliados os consumos de água e de supressor em cada um dos ensaios realizados, considerando uma área de aplicação de 1 m². Considerou-se a massa específica do supressor (ρ_{su}) de 0,9750 g/mL. Os resultados são apresentados nas Tabelas 6.6 e 6.7, considerando dois cenários distintos: variação da concentração e variação da dosagem.

Tabela 6.6 - Variação da concentração ($d = 1,75$ L/m²).

C_{ws} (%)	d (L/m ²)	Volume total (L)	Volume supressor (L)	Volume e água (L)	Massa supressor (g)	Emissão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Eficiência hídrica ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{L}^{-1}$)
2	1,75	1,75	0,035	1,715	34,12	0,24	0,140
3	1,75	1,75	0,053	1,698	51,19	0,22	0,130
4	1,75	1,75	0,070	1,680	68,25	0,14	0,086

Tabela 6.7 - Variação da dosagem ($C_{ws} = 3$ %).

C_{ws} (%)	d (L/m ²)	Volume total (L)	Volume supressor (L)	Volume água (L)	Massa supressor (g)	Emissão ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Eficiência hídrica ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{L}^{-1}$)
3	1,17	1,17	0,035	1,135	34,22	0,35	0,308
3	1,75	1,75	0,053	1,698	51,19	0,22	0,130
3	2,33	2,33	0,070	2,260	68,15	0,11	0,049

A variação da concentração não alterou significativamente o consumo de água, resultando em um pequeno ganho na capacidade de reduzir as emissões por

litro de água utilizada (eficiência hídrica). Além disso, o aumento da concentração afeta diretamente a quantidade de supressor utilizada, o que, por sua vez, impacta os custos operacionais.

Com o aumento da dosagem, mantendo a concentração em 3 %, a capacidade de supressão por litro de água consumida aumentou em 84 %, sem impactar significativamente a quantidade de supressor. Entretanto, o consumo hídrico aumentou em 99 %.

Embora a análise de custos não tenha sido levada em consideração, com base nos resultados apresentados, para regiões com períodos de restrição hídrica, aumentar a concentração pode ser mais sustentável do que aumentar a dosagem.

Ainda, pode-se supor que o ponto ótimo operacional balanceado é $C_{ws} = 3 \%$, $d = 1,75 \text{ L/m}^2$, pois gera níveis intermediários de emissões de MP ($0,22 \mu\text{g/m}^3$) e apresenta consumo moderado de insumos (água e supressor), oferecendo margem de melhoria ao modificar qualquer parâmetro, conforme a necessidade, em relação à restrição hídrica em determinados períodos do ano.

6.2. Avaliação ESG

Foram avaliados os temas materiais listados na Tabela 5.1, propostos por diferentes normas e entidades, que pudessem ter alguma relação com emissão de poeira. Para a avaliação dos impactos, com base nos indicadores de severidade, foram considerados os resultados do IQAr com ou sem a aplicação de supressor, conforme a Tabela 6.5.

Os temas materiais listados na Tabela 5.1 foram combinados e agrupados com base na similaridade e na relevância para o seguinte contexto de uma mineradora: operações de exploração a céu aberto e intenso tráfego de veículos em vias não pavimentadas para o transporte de minério. Foram considerados as comunidades locais próximas às áreas de mineração e os funcionários como os principais *stakeholders*.

Após a avaliação dos temas materiais propostos para análise em um contexto de uma empresa de mineração e de seus impactos socioambientais e financeiros, os quatro temas que tiveram suas materialidades e impactos relacionados à emissão de poeira foram: (1) Comunidades locais e relações comunitárias; (2) Emissões de MP e gestão do ar; (3) Gestão e disponibilidade de água para a supressão de poeira; e (4)

Mudanças climáticas e resiliência climática. Cada tema material e seus respectivos impactos identificados estão listados nas Tabelas 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 a seguir:

Os impactos materiais, socioambientais e financeiros relacionados às comunidades são apresentados na Tabela 6.8. Esse tema material é relevante, pois a emissão de poeira é um dos impactos ambientais mais percebidos pela população e, por isso, um gatilho comum de incômodo, queixas e perda de confiança em relação à instituição privada.

Tabela 6.8 - Tema material: comunidades locais e relações comunitárias.

#	Impacto material socioambiental	Tipo	Impacto material financeiro	Tipo
1	- Engajamento das comunidades no monitoramento dos níveis de poeira. Uso de supressores. IQAr Bom.	Positivo	- Melhora do relacionamento com a comunidade, diminuindo paralisações das operações.	Oportunidade
2	- Poeira causa impacto nas plantações por inibir a fotossíntese, prejudicando a plantação de subsistência. IQAr Ruim.	Negativo	- Indenizações, multas, perda de LSO e de LO.	Ameaça
3	- Poeira visível causando incômodo aos moradores, reduzindo a visibilidade das vias e podendo causar incidentes entre veículos da mineradora e comunitários. IQAr Ruim.	Negativo	- Indenizações, multas, perda de LSO, e perda de LO. - Responsabilização criminal	Ameaça
4	- Doenças respiratórias na popula�o das comunidades, causadas pela poeira. IQAr Ruim.	Negativo	- Indenizações, multas, perda de LSO, perda de LO.	Ameaça
5	- Uso compartilhado do recurso hídrico para supressão de poeira e para sobrevivência das comunidades, gerando conflitos devido à escassez de água, afastamento dos animais aquáticos e terrestres próximos às fontes de capta�o de �gua.	Negativo	- Paradas de produ�o, não atendimento de requisitos legais por falta de água e emissão de MP acima do permitido.	Ameaça

Para uma mineradora, tratar a poeira como pauta de relacionamento (e não apenas de controle ambiental) permite reduzir riscos sociais e regulatórios, além de capturar benefícios financeiros por meio da continuidade operacional, de licenciamento mais previsível e de menor custo de conflito.

A rela o de uma mineradora com as comunidades locais está fortemente vinculada   licença social para operar (LSO). Engajar as comunidades no tema da gestão de poeira aumenta a confiança da comunidade e dos demais *stakeholders*, na medida em que demonstra transparência e o interesse da empresa em cooperar.

A perda da LSO afeta diretamente as opera o da empresa, podendo comprometer o caixa e, por isso, os impactos associados a esse tema têm, em sua

maioria, dupla materialidade. Os itens 1, 3 e 5 da Tabela 6.8, após terem suas pontuações de impacto socioambiental (P_{im}) e de impacto financeiro (P_{fi}) avaliadas, apresentaram dupla materialidade (P_{im} ou $P_{fi} \geq 2$), conforme os critérios estabelecidos na Tabela 5.4.

Uma das formas de engajar os *stakeholders* referenciados nessa pesquisa é a participação ativa no monitoramento dos níveis de emissão de poeira e no uso de canais de comunicação diretos com as lideranças da empresa.

Algumas ações possíveis para estimular o engajamento das comunidades com potencial impacto pelas emissões de poeira: (a) Aplicativos de celular disponibilizados aos *stakeholders* com informações de emissões em tempo real, de forma clara, objetiva e transparente; (b) possibilidade de alertar as lideranças da empresa, mesmo quando os níveis de emissão estiverem dentro dos parâmetros legais, mas estejam causando desconforto para os *stakeholders*; e (c) treinar as lideranças das comunidades para dar suporte na vigilância e nos cuidados com os equipamentos de monitoramento.

Os impactos positivos surgem quando o controle de poeira é prestado como serviço ambiental percebido: redução consistente de eventos de poeira, menor sujeira e melhor conforto ambiental, associados à comunicação de resultados e à pronta resposta à comunidade.

Os ganhos com esse tipo de abordagem, em relação aos principais *stakeholders*, foram relatados por Froes e Araujo (2025). A norma setorial GRI 413-1 reforça a importância do engajamento dos *stakeholders* por meio de uma lista de boas práticas: avaliações de impacto com processos participativos, monitoramento ambiental contínuo, divulgação pública dos resultados e mecanismos formais de queixa. A norma GRI 413-2 reforça o exposto acima, na medida em que recomenda às empresas reportarem operações com impactos negativos significativos e considerarem vulnerabilidade, proximidade e exposição (incluindo o volume e o tipo de poluição liberada), e, nesse caso, a poeira se enquadra diretamente.

Na Tabela 6.9 são apresentados os impactos relacionados ao tema material emissões de MP e gestão do ar. Todos os itens analisados apresentaram dupla materialidade. Ao todo, foram identificados três impactos negativos e um positivo. Como já mencionado anteriormente, a poeira é facilmente identificada e associada à poluição atmosférica, ainda que os níveis de emissão estejam dentro dos limites

recomendados; daí a importância de avaliar a possibilidade de impacto financeiro na empresa, o que caracteriza a dupla materialidade.

Tabela 6.9 - Tema material: emissões de MP e gestão do ar.

#	Impacto material socioambiental	Tipo	Impacto material financeiro	Tipo
6	- Doenças respiratórias em trabalhadores. IQAr Ruim.	Negativo	- Indenizações, tratamentos de saúde. - Pagamento de multas por exceder os níveis de emissão regulamentados.	Ameaça
7	- Programas de gestão da qualidade do ar, com indicadores claros, atendendo os limites da legislação, e em linha com as ODS 3, ODS 11 E ODS 12. IQAr Bom.	Positivo	- Reduz riscos materiais (multas, paralisações, passivos e custo de capital) e também criam oportunidades materiais (eficiência operacional, licenciamento mais previsível, acesso a financiamento e preferência de clientes/investidores)	Oportunidade
8	- Diminuição da visibilidade das vias não pavimentadas devido a poeira, e acidentes e paradas de produção. IQAr Ruim.	Negativo	- Indenizações, processos civil e criminal	Ameaça
9	- Percepção da comunidade de falta de cuidado da empresa com saúde e meio ambiente. IQAr Ruim.	Negativo	- Perda da licença social para operar, paralisações, causando perdas produção.	Ameaça

Nesse tema material, os impactos financeiros e socioambientais negativos podem ser igualmente, ou até mais severos do que no tema anterior, especialmente em relação ao indicador de severidade “escopo” (Tabela 5.3). Esse indicador é fortemente afetado, pois a poeira de fração fina formada em vias não pavimentadas, como discutido em capítulos anteriores, pode ser transportada por longas distâncias, afetando áreas ao redor da mineradora. Nesse sentido, surge a importância do uso de uma metodologia cientificamente testada para a quantificação das emissões e da supressão de poeira, gerando a informação clara sobre a qualidade do ar (IQAr) em termos de material particulado. Para a avaliação dos impactos relacionados a esse tema material, foram utilizados os dados do IQAr (Tabela 6.5), obtidos conforme a metodologia desenvolvida no Capítulo 4.

Os impactos relacionados ao uso e à disponibilidade de água são apresentados na Tabela 6.10. Ambos os impactos foram considerados temas de dupla materialidade. O impacto positivo reside na possibilidade de implementar um sistema de monitoramento em tempo real, de fácil compreensão e ampla divulgação, reforçando o comprometimento da mineradora com aspectos de qualidade de vida e sustentabilidade.

Tabela 6.10 - Tema material: gestão e disponibilidade de água para a supressão de poeira.

#	Impacto material socioambiental	Tipo	Impacto material financeiro	Tipo
10	<ul style="list-style-type: none"> - Implementação de sistemas de monitoramento em tempo real dos níveis de poeira, permitindo aplicação de supressores apenas quando necessário, economizando água, reforçando a LSO. - Foco em IQAr Bom. 	Positivo	<ul style="list-style-type: none"> - Redução do consumo de água, e da energia utilizada para captação. - Redução da probabilidade de multas regulatórias por consumo acima da outorga. - Redução de paradas operacionais devido à baixa visibilidade nas estradas. - Redução com manutenção de estradas. 	Oportunidade
11	<ul style="list-style-type: none"> - Captação de água intensa em bacias críticas, competição com comunidades e ecossistemas. - Captação de água acima da outorga. 	Negativo	<ul style="list-style-type: none"> - Obras de CAPEX para buscar alternativas. - Multas do governo, ANA. - Paradas de produção por falta de água para supressão. - Aumentos dos custos com taxas regulatórias. 	Ameaça

A gestão e a disponibilidade de água constituem um tema material crítico para mineradoras, especialmente quando as operações ocorrem em um clima de precipitação sazonal, como na região Norte do Brasil. Pelo menos seis meses do ano, o clima seco e a pluviometria próxima de zero são responsáveis por reduzir os reservatórios de água a níveis críticos, podendo tornar o recurso hídrico causa de conflitos sociais, de paradas operacionais e de aumento dos riscos durante o tráfego de veículos.

As mudanças climáticas, bem como a resiliência das empresas em lidar com esse tema material, integram a maioria das normas e manuais de relatórios de sustentabilidade empresarial (IFRS, 2023b; GRI, 2024), e os dois principais impactos analisados nesse estudo estão listados na Tabela 6.11.

Uma vez que as mudanças climáticas tornam os eventos climáticos naturais mais extremos e mais frequentes, é muito provável que as duas estações bem definidas na região norte do país sejam intensificadas (CINTRA *et al.*, 2025), o que faz com que, no período de estiagem, os recursos hídricos superficiais e subterrâneos tendam a se tornar ainda mais escassos.

Racionalizar o consumo de água na gestão de MP, especialmente em períodos de escassez hídrica prolongada, devido às mudanças climáticas, demonstra o quanto uma empresa é resiliente em lidar com o tema. Essa questão, abordada no item 12 da Tabela 6.11, aplica-se diretamente à metodologia proposta nessa pesquisa. Para otimizar a eficiência da água utilizada na supressão, é fundamental





caracterizar completamente todo o sistema, incluindo a via não pavimentada, a água, o supressor, o mecanismo de degradação do leito da via e o regime de ventos.

Tabela 6.11 - Tema material: mudanças climáticas e resiliência climática.

#	Impacto material socioambiental	Tipo	Impacto material financeiro	Tipo
12	- Uso de novas tecnologias para reduzir o consumo de água, como por exemplo, uso de supressores. - Utilização de circuito fechado de captação de água para melhorar aspectos relacionados à LSO, ao demonstrar a gestão do risco climático e hídrico.	Positivo	- A maior oportunidade financeira é reduzir a dependência de água “nova” (limitada por outorgas e conflitos sociais) enquanto aumenta-se a resiliência a secas prolongadas, evitando paradas operacionais e custos de conformidade.	Oportunidade
13	- Contribuição para o aquecimento global pelo consumo de diesel, energia e pelos processos envolvidos na supressão de poeira.	Negativo	- Secas prolongadas exaurindo as fontes de água. - Cheias prolongadas e intensas, prejudicando a infraestrutura de captação de água.	Ameaça

As pontuações dos impactos socioambientais (eixo x) e dos impactos financeiros (eixo y) que compuseram a matriz de dupla materialidade (Figura 6.27) estão listadas na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 - Pontuações dos impactos socioambientais e financeiros que compuseram a matriz de materialidade da Figura 6.27.

Tema	#	Impacto negativo		Impacto positivo	
		Impacto socioambiental (eixo x)	Impacto financeiro (eixo y)	Impacto socioambiental (eixo x)	Impacto financeiro (eixo y)
	1	0,0	0,0	2,4	3,2
	2	1,8	2,4	0,0	0,0
	3	2,6	3,2	0,0	0,0
	4	2,2	1,6	0,0	0,0
	5	2,4	2,4	0,0	0,0
	6	2,0	2,4	0,0	0,0
	7	0,0	0,0	3,6	3,2
	8	2,1	3,2	0,0	0,0
	9	2,7	2,4	0,0	0,0
	10	0,0	0,0	2,4	4,0
	11	3,5	3,2	0,0	0,0
	12	0,0	0,0	3,2	3,2
	13	3,5	4,0	0,0	0,0

No gráfico da Figura 6.27, é apresentada a análise da matriz de dupla

materialidade e as pontuações dos 13 impactos relacionados aos quatro temas materiais relativos à emissão de poeira.

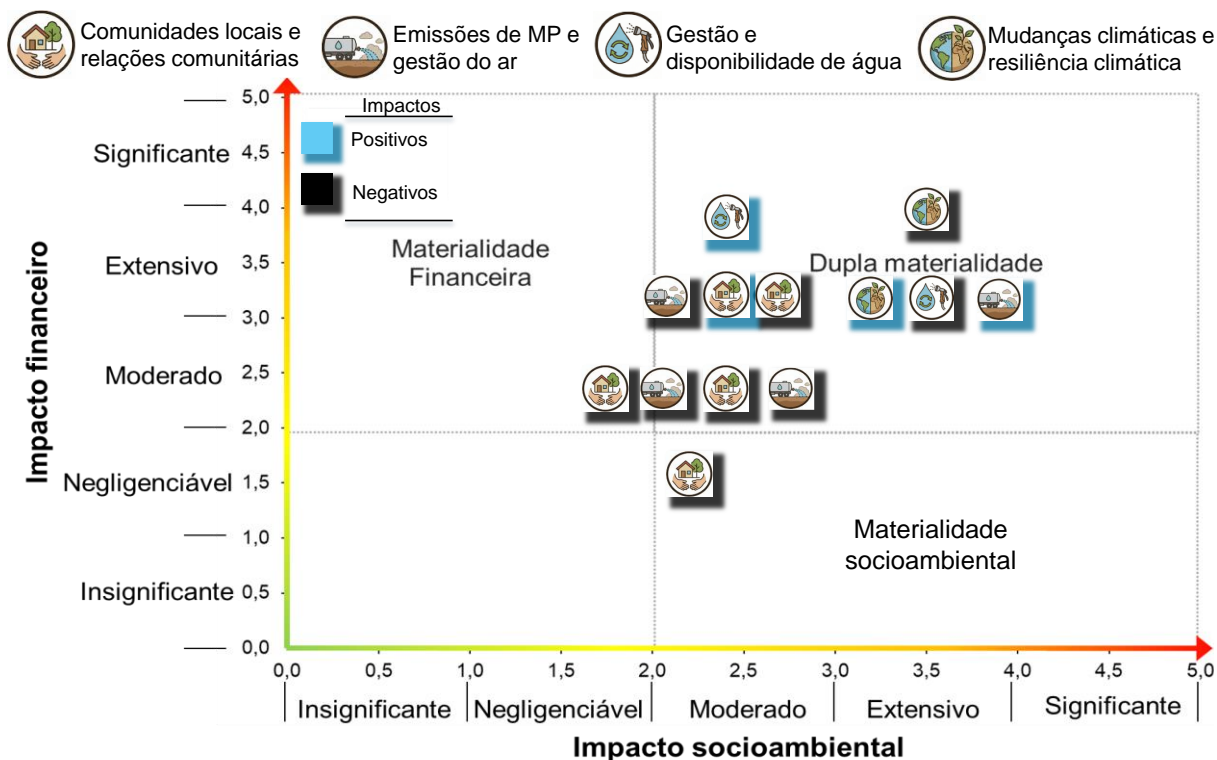


Figura 6.27 - Matriz de dupla materialidade e seus impactos materiais analisados.

As planilhas de cálculo que deram origem aos valores das pontuações para os impactos socioambientais e financeiros (coordenadas x e y da Tabela 6.12 e Figura 6.27) são apresentadas no APÊNDICE B e APÊNDICE C respectivamente.

A maioria dos temas materiais propiciam impactos positivos e negativos. Um tema que inicialmente apresenta apenas impacto socioambiental no médio e no longo prazo, provavelmente, progredirá para impacto financeiro, como no item 4 do tema material Comunidades locais e relações comunitárias (Tabela 6.8). Já no item 2, o impacto socioambiental está controlado, mas há potencial para afetar o caixa da empresa no curto prazo, então é considerado um tema duplo material.

É importante mencionar que essa análise foi realizada em um cenário hipotético de mineração. Desta forma, os critérios de elegibilidade para que os impactos dos temas fossem classificados como tendo materialidade socioambiental e/ou financeira foram definidos com base no bom senso, literatura consultada, na experiência profissional do autor, e principalmente, nos valores do IQAr obtidos pela metodologia desenvolvida no Capítulo 4.

Na Tabela 6.13, apresentam-se os indicadores propostos para suportar a gestão dos impactos associados aos temas materiais identificados:

Tabela 6.13 - Indicadores e métricas.

Indicador	Métrica	Frequência de análise
Gestão de poeira	- Concentração média em comunidades ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Diária
	- Concentração média dentro da empresa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Diária
	- Concentração média SS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Diária
	- Concentração média CS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Diária
	- N° pontos monitoramento / km	Anual
	- N° dias que excedeu o IQAr nível Bom	Mensal
	- Baixa visibilidade (N° paradas/ton produzida)	Mensal
	- Eficiência de supressão (%)	Diária
	- IQAr PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ 24h)	Classificação CONAMA
	- \$ / km umectado	Mensal
	- Intensidade de tráfego (passagens por trecho monitorado)	Diária
	- km vias reparadas / mês	Mensal
- % da receita destinado à gestão de poeira	Anual	
Gestão de recursos hídricos	- Umectação de vias (km/dia)	Diária
	- Intensidade umectação (m^3/km)	Mensal
	- Captação água nova (m^3/ano)	Mensal
	- Intensidade de água nova (m^3/km)	Mensal
	- % água umectação / total captado	Mensal
	- Água de recirculação (m^3)	Mensal
	- Intensidade de água de recirculação (m^3/km)	Mensal
Gestão supressor	- Supressor usado por km umectado (kg/km)	Diária
	- Total consumo anual de supressor (kg/ano)	Mensal
Relação com <i>stakeholders</i>	- N° de reclamações por semana	Semanal
	- % de registros respondidos em até 48h	Semanal
	- N° de resoluções / N° reclamações	Semanal
	- N° de melhorias decorrentes de feedback	Semestral
	- N° relatórios e reuniões para <i>stakeholders</i> / mês	Mensal

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados desta pesquisa demonstram que a metodologia proposta foi eficiente para avaliar, de forma controlada em laboratório, a emissão de poeira em vias não pavimentadas e a eficiência do supressor, simulando condições operacionais reais, com base em parâmetros como a umidade, o uso do supressor, a velocidade do vento e a degradação da via.

As correlações observadas entre a emissão de poeira, a umidade, a aplicação de supressor e a velocidade do vento indicaram influência direta sobre o campo de velocidades próximo ao leito. Nesse contexto, a velocidade de atrito mostrou-se um potencial parâmetro de referência para a avaliação de emissões em vias não pavimentadas, por capturar a interação entre o escoamento e as diferentes características da superfície do solo.

O dispositivo desenvolvido para simular a degradação do leito da via permitiu realizar ensaios de erosão eólica em condições mais próximas às que ocorrem no dia a dia das operações de uma mina, na medida em que gerou material particulado solto (poeira disponível) para sofrer os efeitos da erosão eólica.

A redução da tensão superficial com o uso do supressor e o ajuste do pH da solução próximo ao ponto de carga zero favoreceram a formação de aglomerados e o aumento da coesão entre as partículas, reduzindo as emissões. A eficiência de supressão aumentou quando estes fatores foram combinados à concentração de 3 % sugerida pelo fabricante e confirmada pelos ensaios. A redução nas emissões do ensaio da etapa 3 ($\text{pH}^{**} = 6$, $C_{ws}^* = 3\%$) em relação ao ensaio da etapa 1 ($\text{pH}^* = 6$, sem supressor), considerando os picos de emissão, foi de 46 %, servindo como referência para os ensaios realizados posteriormente no túnel de vento.

Os resultados experimentais do túnel de vento indicam claramente que a dosagem do supressor exerce maior influência no controle da emissão de poeira do que a concentração, além de maximizar a capacidade de supressão por litro de água utilizada. A redução na emissão (em valores de concentração média), considerando os parâmetros de umidade 5 %, a dosagem de 2,33 L/m² e concentração de 3 %, em relação a emissão do ensaio com os parâmetros 5 % de umidade, sem supressor, foi de 86 %. Enquanto que, considerando a concentração recomendada pelo fabricante de 3 % e a dosagem de 1,75 L/m², em relação ao ensaio com 5 % de umidade sem supressor, a redução foi de 73 %. Os resultados de emissão, considerando apenas a

variação da umidade do leito (de 3 % para 5 % e de 5 % para 7 %), sem aplicação do supressor, indicam reduções de 29 % e 35 %, respectivamente.

Em termos práticos, os resultados indicam que o aumento da eficiência hídrica por meio do uso de supressores pode contribuir para racionalizar o consumo hídrico, particularmente em períodos de menor pluviometria, quando a emissão tende a se intensificar. A metodologia proposta também permite substituir a aplicação empírica de água por ciclos de umectação ajustados com base em parâmetros de laboratório. Soma-se aos ganhos já citados o potencial para reduzir custos operacionais, melhorar as condições de visibilidade nas vias não pavimentadas e diminuir a probabilidade de conflitos com as comunidades sob influência do MP.

A pesquisa evidencia que a gestão da poluição atmosférica por MP não deve se limitar aos limites internos de uma mineradora. A poeira de vias não pavimentadas é considerada uma fonte difusa relevante, constituindo um tema de dupla materialidade no contexto de ESG. Por esse motivo, deve integrar o programa de sustentabilidade do negócio. Os impactos negativos e as ameaças associados aos temas materiais demonstraram forte relação com o IQAr, especialmente nas condições em que não foi utilizado o supressor. A prática do de supressores eleva a qualidade do ar, como demonstrado pelo IQAr, gerando impactos socioambientais positivos e, eventualmente, oportunidades financeiras.

No que se refere ao alinhamento da pesquisa aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o tema da dissertação relaciona-se diretamente ao ODS 3 (saúde e bem-estar), ao tratar de material particulado e de seus impactos potenciais à saúde em contextos ocupacionais e comunitários. Com o ODS 6 (água potável e saneamento), ao discutir a relação entre a necessidade de uso de água para supressão e a importância de racionalizar o consumo.

Também possui forte interface com o ODS 11, principalmente por contribuir para reduzir os impactos ambientais nas comunidades (com foco na qualidade do ar) e por apoiar o desenvolvimento sustentável no entorno das operações de mineração.

Conecta-se ainda ao ODS 9 (indústria, inovação e infraestrutura) e ao ODS 12 (consumo e produção responsáveis), na medida em que desenvolve e aplica uma metodologia técnica para avaliar emissões e a eficiência do controle, apoiando decisões operacionais baseadas em evidências científicas e aprimorando as práticas de gestão ambiental na atividade mineral.

Como agenda de pesquisa futura, o aprimoramento do dispositivo de

degradação pode ser considerado, de modo que a formação de material particulado ocorra de forma contínua, como em uma via real. Da mesma forma, poderia-se adaptar o mecanismo de degradação para exercer uma pressão controlada sobre o leito do corpo de prova, simulando a pressão exercida pelos pneus dos veículos e reproduzindo, com ainda maior fidelidade, as condições reais da via.

Da perspectiva do túnel de vento, uma melhoria importante para trabalhos futuros é a instalação de geradores de vórtices na entrada da seção de testes, o que aproximaria o comportamento do escoamento de uma camada limite atmosférica. Outra oportunidade para pesquisas futuras é a realização de ensaios que ampliem as variações e combinações de umidade, dosagem e concentração do supressor. O ensaio de supressores de outros fabricantes também enriqueceria a discussão sobre o consumo de insumos para a supressão de poeira.

Um ensaio de emissão adicional que pode ser realizado para complementar essa pesquisa é considerar a aplicação de água (variando a dosagem), sem supressor, para calcular a economia obtida em relação ao uso de agentes supressores.

REFERÊNCIAS

ABNT 6457. **NBR 6457: Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade**. Rio de Janeiro: ABNT. 2024. 1 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/1963/abnt-nbr6457-solos-preparacao-de-amostras-para-ensaios-de-compactacao-caracterizacao-e-determinacao-do-teor-de-umidade>. Acesso em: 24 nov. 2024.

ABNT 7181. **NBR 7181: Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT. 2025. 18 p. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/27932/nbr7181-solo-analise-granulometrica>. Acesso em: 01 nov. 2024.

ABNT ISO. **Gestão de riscos - ISO 31.000**. Rio de Janeiro. 2018. 23 p. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/28977/abnt-nbriso31000-gestao-de-riscos-diretrizes>. Acesso em: 11 jan. 2024.

AC Tool. **MP 200 Manometer KIMO User guide**. AC Tool, 2025. 16 p., User manual. Disponível em: www.Manualslib.com. Acesso em: 23 out. 2025.

ADDO, Jonathan Q.; SANDERS, Thomas G.; CHENARD, Melanie. **Road Dust Suppression: Effect on Maintenance Stability, Safety and the Environment Phases 1-3**. Colorado State University. USA: 2024, p. 73. 2024. (MPC-04-156). Disponível em: <https://www.ugpti.org/resources/reports/details.php?id=492&program=mpc>. Acesso em: 12 ago. 2025.

AIMAR, Silvia B.; MENDEZ, Mariano J.; FUNK, Roger *et al.* Soil properties related to potential particulate matter emissions (PM10) of sandy soils. **Aeolian Research**, v. 3, n. 4, p. 437-443, 2012. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875963710000406>. DOI: 10.1016/j.aeolia.2010.12.001. Acesso em: 04 dez. 2024.

ALI, Saleem H.; GIURCO, Damien; ARNDT, Nicholas *et al.* Mineral supply for sustainable development requires resource governance. **Nature**, v. 543, n. 7645, p. 367-372, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature21359>. DOI: 10.1038/nature21359. Acesso em: 01 dez. 2024.

ARBEX, Marcos Abdo; SANTOS, Ubiratan de Paula; MARTINS, Lourdes Conceição *et al.* Air pollution and the respiratory system. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, v. 38, p. 643-655, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbpneu/a/sD3cLkXqQwmDFpgzsyj7gBm/?lang=en>. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-37132012000500015>. Acesso em: 11 set. 2024.

BAGNOLD, R. A. **The Physics of Blown Sand and Desert Dunes**. Dordrecht: Springer Netherlands, 1941. 978-94-009-5684-1 978-94-009-5682-7. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-009-5682-7>. Acesso em: 07 jan. 2025.

BAO, Qiu; NIE, Wen; LIU, Changqi *et al.* The preparation of a novel hydrogel based on crosslinked polymers for suppressing coal dusts. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119343, 2020. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619342131>. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119343. Acesso em: 07 jan. 2025.

BARBOSA, Anrafel de Souza; SILVA, Maria Cristina Basilio da ; SILVA, Luiz Bueno da *et al.* Integration of Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria: their impacts on corporate sustainability performance. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 10, n. 1, 2023. Disponível em:

<https://www.nature.com/articles/s41599-023-01919-0>. DOI: 10.1057/s41599-023-01919-0. Acesso em: 02 set. 2025.

BARNES, David; CONNOR, Billy. **Managing Dust on Unpaved Roads and Airports**. Alaska University Transportation Center. Alaska: 31 out. 2014. 2014. (NE/AUTC 14.14 and ADOT&PF 4000096). Disponível em:

<https://scholarworks.alaska.edu/handle/11122/8813>. Acesso em: 12 ago. 2025.

BCB, Banco Central do Brasil. Relatório de Riscos e Oportunidades Sociais, ambientais e Climáticos. **Publicação anual do Banco Central do Brasil (BC)**, v. 5, p. 83, 2025. Disponível em: https://www.bcb.gov.br/content/publicacoes/relatorio-risco-oportunidade/Relatorio-Riscos-Oportunidades-Sociais_RIS_2025.pdf. Acesso em: 14 out. 2025.

BELLY, P. Y. **Sand movement by wind**. U. S. Army Corps of Eng. Washington, D. C. 1964. (Tech. Memo. 1). Disponível em:

<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/AD0429055.pdf>. Acesso em: 21 set. 2024.

BERRYMAN, E. J.; CLEAVER, A.; MARTINEAU, C. *et al.* Capture and characterization of fugitive mine dust around an open pit gold mine in Québec, Canada. **Applied Geochemistry**, v. 171, 2024. Disponível em: <https://www-sciencedirect-com.ez3.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S088329272400204X?via%3Dihub>.

DOI: 10.1016/j.apgeochem.2024.106099. Acesso em: 11 nov. 2025.

BICHUETI, Roberto Schoproni; MADRUGA, Lucia Rejane da Rosa Gama; GOMES, Clandia Maffini *et al.* O uso da água na mineração: Uma análise da produção científica internacional. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 3, n. 2, p. 58-73, 2014. Disponível em:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=471647054004>. Acesso em: 01 fev. 2024.

BRANTLEY, H. L.; HAGLER, G. S.; DESHMUKH, P. J. *et al.* Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter. **Sci Total Environ**, v. 468-469, p. 120-129, 15 jan. 2014. Disponível em:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24008075>. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.001. Acesso em: 09 ago. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, 136. Brasília, DF, 13 fev. 1998, 136. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm. Acesso em: 28 set. 2025.

BRITO, Paulo Henrique Ferreira de; ARAÚJO, Rinaldo dos Santos; MARINHO, Glória. Composição Química Do Material Particulado Atmosférico: Uma Revisão da Literatura. **HOLOS**, v. 4, p. 62-74, 01 nov 2018 2018. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/4648>. DOI: 10.15628/holos.2018.4648. Acesso em: 12 dez. 2024.

BURGER, Lucian. Complexities in the estimation of emissions and impacts of wind generated fugitive dust. **AIRSHED PLANNING PROFESSIONALS (PTY) LTD**, 01 jan. 2010 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228960805_Complexities_in_the_estimation_of_emissions_and_impacts_of_wind_generated_fugitive_dust. Acesso em: 04 dez. 2024.

CHEPIL, W. S. Influence of Moisture on Erodibility of Soil by Wind. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 2, p. 288-292, 1956 1956. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/sssaj1956.03615995002000020033x>. DOI: 10.2136/sssaj1956.03615995002000020033x. Acesso em: 28 set. 2024.

CINTRA, B. B. L.; GLOOR, E.; BAKER, J. C. A. *et al.* Tree ring isotopes reveal an intensification of the hydrological cycle in the Amazon. **Commun Earth Environ**, v. 6, n. 1, p. 453, 2025. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/40538634>. DOI: 10.1038/s43247-025-02408-9. Acesso em: 02 dez. 2025.

COHEN, G. ESG risks and corporate survival. **Environ Syst Decis**, v. 43, n. 1, p. 16-21, 06 dez. 2022 2023. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36466558>. DOI: 10.1007/s10669-022-09886-8. Acesso em: 14 out. 2024.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**. Brasil: Diário Oficial da União. 2018. 156 p. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 30 set. 2025.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024**. Diário Oficial da União. 2024. 133 p. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/atos-normativos-sistema>. Acesso em: 10 nov. 2024.

DE ORO, Laura A.; COLAZO, Juan C.; AVECILLA, Fernando *et al.* Relative soil water content as a factor for wind erodibility in soils with different texture and aggregation. **Aeolian Research**, v. 37, p. 25-31, 01 abr. 2019 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1875963718302040>. DOI: 10.1016/j.aeolia.2019.02.001. Acesso em: 11 dez. 2024.

DENBY, Bruce R.; KUPIAINEN, Kaarle J.; GUSTAFSSON, Mats. Chapter 9 - Review of Road Dust Emissions. *In*: AMATO, F. (Ed.). **Non-Exhaust Emissions**: Academic Press, 2018. p. 183-203. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128117705000091>. Acesso em: 23 ago. 2025.

DINGER, Dennis R. Medidas de Pontos Isoelétricos sem o Uso de Analisador de Potencial Zeta. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 3, 2006. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876572a7f8c9d6e028b46f8/pdf/ci-11-3-5876572a7f8c9d6e028b46f8.pdf>. Acesso em: 09 jul. 2025.

DNIT. **Norma DNIT 098/2007 - ES**. Rio de Janeiro: Instituto de pesquisas rodoviárias. 2007a. 7 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me>. Acesso em: 03 ago. 2025.

DNIT. **Norma DNIT 164/2013 - ME**. Rio de Janeiro: Instituto de pesquisas rodoviárias. 2007b. 7 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me>. Acesso em: 03 ago. 2025.

DONG, Hui; YU, Haiming; XU, Rongxiao *et al.* Review and prospects of mining chemical dust suppressant: classification and mechanisms. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 1, p. 18-35, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s11356-022-23840-w>. DOI: 10.1007/s11356-022-23840-w. Acesso em: 28 jun. 2025.

DONG, Zhibao; MU, Qingsong; LIU, Xiaopiu. Defining the threshold wind velocity for moistened sediments. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 112, n. B8, 2007. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006JB004476>. DOI: 10.1029/2006jb004476. Acesso em: 26 ago. 2025.

DUPONT, S. Scaling of Dust Flux With Friction Velocity: Time Resolution Effects. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 1, 2020. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2019JD031192>. DOI: 10.1029/2019jd031192. Acesso em: 12 set. 2025.

DustTrack. **DustTrack™ DRX Aerosol Monitors**. TSI Incorporated, 2014. 4 p. Disponível em: www.tsi.com. Acesso em: 19 ago. 2024.

ENGELBRECHT, J. P.; DERBYSHIRE, E. Airborne Mineral Dust. **Elements**, v. 6, n. 4, p. 241-246, 2010. Disponível em: <https://pubs-geoscienceworld.org.ez3.periodicos.capes.gov.br/msa/elements/article/6/4/241/137869/Airborne-Mineral-Dust>. DOI: 10.2113/gselements.6.4.241. Acesso em: 21 nov. 2024.

EPPS, Amy; EHSAN, Mehbuba. Laboratory Study of Dust Palliative Effectiveness. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 14, n. 5, p. 427-435, 2002. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282002%2914%3A5%28427%29>. DOI: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:5(427). Acesso em: 25 fev. 2025.

ERNEST YOUNG, Global Mining & Metals. Top 10 risks and opportunities for mining and metals companies in 2024. **EY Insights**, 009424-23Gbl, 2023. Disponível em: https://www.ey.com/en_gl/insights/energy-resources/risks-opportunities. Acesso em: 14 out. 2025.

EUROPEAN PARLIAMENT, Council of The Eu. Ambient air quality and cleaner air for Europe. DIRECTIVE (EU) 2024/2881 seção 23 out. 2024, Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/2881/oj/eng>. Acesso em: 12 fev. 2024.

FARIA, Fernanda Ferreira; GRANHA, Amanda. **Frameworks de ESG: o que são, como funcionam e como usá-los**. Descubra insights sobre inovação, gestão e sustentabilidade em grandes projetos de engenharia e construção, 30 jul. 2024 2024. Disponível em: <https://verumpartners.com.br/frameworks-de-esg-o-que-sao/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

FARMER, Andrew M. The effects of dust on vegetation - a review. **Environmental Pollution**, v. 79, n. 1, p. 63-75, 1993 1993. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/026974919390179R>. DOI: 10.1016/0269-7491(93)90179-R. Acesso em: 14 set. 2024.

FÉCAN, F.; MARTICORENA, B.; BERGAMETTI, G. Parametrization of the increase of the aeolian erosion threshold wind friction velocity due to soil moisture for arid and semi-arid areas. **Annales Geophysicae**, v. 17, n. 1, p. 149-157, 14 jan. 1999 1999. Disponível em: <https://angeo.copernicus.org/articles/17/149/1999/>. DOI: 10.1007/s00585-999-0149-7. Acesso em: 08 out. 2025.

FIKRU, Mahelet G.; BRODMANN, Jennifer; ENG, Li Li *et al.* ESG ratings in the mining industry: Factors and implications. **The Extractive Industries and Society**, v. 20, 2024. Disponível em: https://scholarsmine.mst.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1200&context=econ_facwork. DOI: 10.1016/j.exis.2024.101521. Acesso em: 16 set. 2025.

FLOCCHINI, R. G.; CAHILL, T. A.; MATSUMURA, R. T. *et al.* **Study of fugitive PM10 emissions from selected agricultural practices on selected agricultural soils**. University of California, Davis. Davis, CA. 1994.

FROES, Marco Aurelio Padilha; ARAUJO, Claudio. **Integração Operacional, Ambiental e Social no Controle da poeira, ruído e vibração: Lições de Moatize (Moçambique)**. LinkedIn, 2025. Disponível em: <https://lnkd.in/p/dsQRvBz7>. Acesso em: 19 set. 2025.

FU, Changlun; YU, Chenyang; GUO, Mengting *et al.* ESG rating and financial risk of mining industry companies. **Resources Policy**, v. 88, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030142072301019X>. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.104308. Acesso em: 13 set. 2024.

FUNK, Roger; REUTER, Hannes I.; HOFFMANN, Carsten *et al.* Effect of moisture on fine dust emission from tillage operations on agricultural soils. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, n. 12, p. 1851-1863, 31 out. 2008 2008. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.1737>. DOI: 10.1002/esp.1737. Acesso em: 15 set. 2024.

GAO, Zhengjie; HE, Dayi; NIU, Shuaifang. On What Could Chinese Mining Enterprises Achieve High-Level Environmental Performance?-Based on the fsQCA Method. **Int J Environ Res Public Health**, v. 18, n. 14, 07 jul. 2021 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34299741>. DOI: 10.3390/ijerph18147290. Acesso em: 28 jul. 2025.

GHOLAMI, A.; TAJIK, R.; ATIF, K. *et al.* Respiratory Symptoms and Diminished Lung Functions Associated with Occupational Dust Exposure Among Iron Ore Mine Workers in Iran. **Open Respir Med J**, v. 14, p. 1-7, 2020. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32509034>. DOI: 10.2174/1874306402014010001. Acesso em: 07 out. 2025.

GILLETTE, Dale. Tests with a portable wind tunnel for determining wind erosion threshold velocities. **Atmospheric Environment (1967)**, v. 12, n. 12, p. 2309-2313, 01 jan. 1978 1978. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0004698178902718>. DOI: 10.1016/0004-6981(78)90271-8. Acesso em: 16 ago. 2025.

GLOBAL COMPACT. **Who Cares Wins: Connecting Financial Markets to a Changing World**. United Nations Global Compact. New York. 2004. Disponível em: <https://www.unglobalcompact.org/library/151>. Acesso em: 11 mai. 2025.

GONZAGA, Ligia Mara; FARIAS NETO, Severino Rodrigues; MEDEIROS, Ailma Robéria Souto de *et al.* Medidas de distribuição do tamanho de partícula combinado com os dados do peneiramento convencional. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 5, p. 52259-52271, 01 mai. 2021 2021. Disponível em: <https://brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/563>. DOI: 10.34117/bjdv7n5-563. Acesso em: 17 set. 2025.

GONZALEZ, Alvaro; AITKEN, Douglas; HEITZER, Christian *et al.* Reducing mine water use in arid areas through the use of a byproduct road dust suppressant. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 46-54, 09 abr. 2025 2019. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619316087>. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.05.088. Acesso em: 01 abr. 2024.

GRI, Global Reporting Initiative. **Normas GRI consolidadas: conjunto completo das Normas GRI para relato de sustentabilidade (edição em português)**.

Amsterdã: Global Reporting Initiative. 2024. 1008 p. Disponível em:

<https://www.globalreporting.org/how-to-use-the-gri-standards/gri-standards-portuguese-translations/>. Acesso em: 21 set. 2025.

GULIA, S.; GOYAL, P.; GOYAL, S. K. *et al.* Re-suspension of road dust: contribution, assessment and control through dust suppressants—a review. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 16, n. 3, p. 1717-1728, 2018.

Disponível em: [https://www-scopus-](https://www-scopus-com.ez3.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/85053836984?origin=resultslist)

[com.ez3.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/85053836984?origin=resultslist](https://www-scopus-com.ez3.periodicos.capes.gov.br/pages/publications/85053836984?origin=resultslist).

DOI: 10.1007/s13762-018-2001-7. Acesso em: 28 fev. 2025.

GUPTA, Himanshu; GOKHALE, Sharad. Road dust emissions, sources, and associated ecological and health risks in different land use areas of assam. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 18, n. 11, p. 3733-3749, 2025. DOI:

10.1007/s11869-025-01860-y.

HALT, Joseph A.; KAWATRA, S. Komar. Does the Zeta Potential of an Iron Ore Concentrate Affect the Strength and Dustiness of Unfired and Fired Pellets? **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 38, n. 2, p. 132-141, 2017.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/313814845_Does_the_Zeta_Potential_of_a_n_Iron_Ore_Concentrate_Affect_the_Strength_and_Dustiness_of_Unfired_and_Fire_d_Pellets. DOI: 10.1080/08827508.2017.1288114. Acesso em: 19 jun. 2025.

HERDIES, Bruno; VENDRASCO, Eder; HERDIES, Dirceu *et al.* The Use of Atmospheric Reanalysis Data for the Estimation of Solar Irradiation Considering the Effect of Atmospheric Aerosols over Brazil. **Atmosphere**, v. 16, p. 124, 2025. DOI: 10.3390/atmos16020124.

HIGGINBOTHAM, N.; FREEMAN, S.; CONNOR, L. *et al.* Environmental injustice and air pollution in coal affected communities, Hunter Valley, Australia. **Health Place**, v. 16, n. 2, p. 259-266, Mar 2010. Disponível em:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19884036>. DOI:

10.1016/j.healthplace.2009.10.007. Acesso em: 09 jun. 2025.

HINDS, W.C. **Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles**. Wiley, 2012. 9781118591970. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=qlkyjPXfWK4C>.

HLEVCA, Dan; DEGERATU, Mircea. Atmospheric boundary layer modeling in a short wind tunnel. **European Journal of Mechanics - B/Fluids**, v. 79, p. 367-375, 01 jan. 2020. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0997754619301803>. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2019.10.003>. Acesso em: 21 out. 2025.

HOTTA, Shintaro; HORIKAWA, Kiyoshi; KRAUS, Nicholas C. Literature review of sand transport by wind on a dry sand surface. **Coastal Engineering**, v. 9, n. 6, p. 503-526, 01 mar. 1986. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378383986900013>. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(86\)90001-3](https://doi.org/10.1016/0378-3839(86)90001-3). Acesso em: 12 set. 2025.

HU, Shelia. The Clean Air Act 101. 2022. Disponível em: <https://www.nrdc.org/stories/clean-air-act-101>. Acesso em: 03 fev. 2025.

IBGC, Instituto brasileiro de Governança Corporativa. Guia para conselheiros: normas de sustentabilidade IFRS S1 e S2. CDU 634.41, n. CDD 333, p. 56, 2024. Disponível em: <https://conhecimento.ibgc.org.br/Paginas/Publicacao.aspx?PubId=24691&assessment=1>. Acesso em: 13 ago. 2025.

ICMM, International Council on Mining and Metals. **Critical Control Management**. ICMM. United Kingdom: 14 abr. 2015, p. 36. 2015. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-work/health-and-safety/critical-control-management>. Acesso em: 14 out. 2025.

ICMM, International Council on Mining and Metals. **Princípios da Exploração Mineira**. ICMM. United Kingdom, p. 16. 2023. Disponível em: <https://www.icmm.com/en-gb/our-principles>. Acesso em: 14 out. 2025.

IFC, International Finance Corporation. **Performance Standard 1 Assessment and Management of Environmental and Social Risks and Impacts**. World Bank Group. Washington. 2012. Disponível em: <https://www.ifc.org/en/insights-reports/2012/ifc-performance-standard-1>. Acesso em: 27 ago. 2025.

IFC, International Finance Corporation; WORLD BANK. **Who Cares Wins**. 2004. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/444801491483640669/pdf/113850-BRI-IFC-Breif-whocares-PUBLIC.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

IFRS, International Financial Reporting Standards. **IFRS S1 General Requirements for Disclosure of Sustainability-related Financial Information**. London: IFRS Foundation. 2023a. 39 p. Disponível em: <https://www.ifrs.org/issued-standards/ifrs-sustainability-standards-navigator/ifrs-s1-general-requirements/>. Acesso em: 01 out. 2025.

IFRS, International Financial Reporting Standards. **IFRS S2 - Divulgações Relacionadas ao Clima**. London: IFRS Foundation. 2023b. 36 p. Disponível em: <https://www.ifrs.org/content/dam/ifrs/publications/pdf-standards-issb/brazilian-portuguese/2023/issued/part-a/pt-issb-2023-a-ifrs-s2-climate-related-disclosures.pdf?bypass=on>. Acesso em: 01 out. 2025.

INMET, Instituto Nacional de Meteorologia. Normas Climatológicas do Brasil. 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 06 fev. 2024.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). 2025. Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 11 fev. 2024.

ISO, International Organization for Standardization ISO. Framework for implementing environmental, social and governance (ESG) principles. n. IWA 48:2024(en), 2024. Disponível em: [https://www-iso-org.translate.goog/standard/89240.html? x tr sl=en& x tr tl=pt& x tr hl=pt& x tr pt=sqe#:~:text=IWA%2048:2024%20Estrutura%20para,sociais%20e%20de%20governan%C3%A7a%20\(ESG\)](https://www-iso-org.translate.goog/standard/89240.html? x tr sl=en& x tr tl=pt& x tr hl=pt& x tr pt=sqe#:~:text=IWA%2048:2024%20Estrutura%20para,sociais%20e%20de%20governan%C3%A7a%20(ESG).). Acesso em: 21 dez. 2024.

IVERSEN, James D.; GREELEY, Ronald; MARSHALL, John R. *et al.* Aeolian saltation threshold: the effect of density ratio. **Sedimentology**, v. 34, n. 4, p. 699-706, 1987. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00795.x>. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1987.tb00795.x>. Acesso em: 11 set. 2024.

JARRAH, Mahboube; MAYEL, Sonia; TATARKO, John *et al.* A review of wind erosion models: Data requirements, processes, and validity. **CATENA**, v. 187, p. 16, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0341816219305302>. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104388. Acesso em: 14 nov. 2024.

KACER, J.; ALTMAIER, R.; CWIERTNY, D. M. *et al.* Unpaved road particulate matter emission rates and vehicle-induced transient plume characteristics. **Environ Sci Atmos**, v. 4, n. 9, p. 1042-1050, 12 set. 2024. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/39184235>. DOI: 10.1039/d4ea00055b. Acesso em: 19 set. 2025.

KAMENOPOULOS, S.; AGIOUTANTIS, Z. The Importance of the Social License to Operate at the Investment and Operations Stage of Coal Mining Projects: Application using a Decision Support System. **Extr Ind Soc**, v. 8, n. 2, p. 100740, 2021. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/32837928>. DOI: 10.1016/j.exis.2020.05.019. Acesso em: 26 ago. 2025.

KATRA, Itzhak. Comparison of Diverse Dust Control Products in Wind-Induced Dust Emission from Unpaved Roads. **Applied Sciences**, v. 9, n. 23, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/23/5204>. DOI: 10.3390/app9235204. Acesso em: 12 ago. 2025.

KAVOURAS, I. G.; DUBOIS, D. W.; NIKOLICH, G. *et al.* Particulate dust emission factors from unpaved roads in the U.S. - Mexico border semi-arid region. **Journal of Arid Environments**, v. 124, p. 189-192, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0140196315300239>. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2015.07.015. Acesso em: 27 ago. 2025.

KIM, Ki-Hyun; KABIR, Ehsanul; KABIR, Shamin. A review on the human health impact of airborne particulate matter. **Environment International**, v. 74, p. 136-143, 2015. Disponível em:

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412014002992>. DOI: 10.1016/j.envint.2014.10.005. Acesso em: 16 set. 2024.

KIREŠOVÁ, Simona; GUZAN, Milan. Measurement of Particulate Matter: Principles and Options of Measurement at Present. **Acta Electrotechnica et Informatica**, v. 22, n. 2, p. 8-18, 01 jun. 2022 2022. Disponível em:

<https://www.sciendo.com/article/10.2478/aei-2022-0007>. DOI: 10.2478/aei-2022-0007. Acesso em: 16 nov. 2024.

KLOSE, Martina; SHAO, Yaping. Large-eddy simulation of turbulent dust emission. **Aeolian Research**, v. 8, p. 49-58, 2013. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/257708679_Large-eddy_simulation_of_turbulent_dust_emission. DOI: 10.1016/j.aeolia.2012.10.010. Acesso em: 22 ago. 2025.

KNIPPERTZ, Peter; STUUT, Jan-Berend W. (ed.). **Mineral Dust: A Key Player in the Earth System**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. Disponível em:

<https://link.springer.com/10.1007/978-94-017-8978-3>. Acesso em: 10 nov. 2024.

KOK, Jasper F.; PARTELI, Eric J. R.; MICHAELS, Timothy I. *et al.* The physics of wind-blown sand and dust. **Reports on Progress in Physics**, v. 75, n. 10, p. 106901, 01 out. 2012 2012. Disponível em:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/75/10/106901>. DOI: 10.1088/0034-4885/75/10/106901. Acesso em: 28 nov. 2024.

KOMNITSAS, Konstantinos. Social License to Operate in Mining: Present Views and Future Trends. **Resources**, v. 9, n. 6, 2020. Disponível em:

<https://www.mdpi.com/2079-9276/9/6/79>. DOI: 10.3390/resources9060079. Acesso em: 14 out. 2025.

KOOS, E. Capillary suspensions: Particle networks formed through the capillary force. **Curr Opin Colloid Interface Sci**, v. 19, n. 6, p. 575-584, 2014. Disponível em:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25729316>. DOI: 10.1016/j.cocis.2014.10.004. Acesso em: 01 dez. 2025.

KOUIMTZIS, T.; SAMARA, C. (ed.). **Airborne Particulate Matter**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1995. (The Handbook of Environmental Chemistry.

Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-49145-3>. Acesso em: 16 dez. 2024.

KOZAKIEWICZ, Ryszard. Indirect environmental aspects in ESG reporting for mining operations. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 1457, n. 1, p. 012021, 01 mar. 2025 2025. Disponível em:

<https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1457/1/012021>. DOI: 10.1088/1755-1315/1457/1/012021. Acesso em: 16 nov. 2024.

KPMG, Auditores Independentes Ltda. **Survey of Sustainability Reporting 2022**. KPMG. 2023. Disponível em: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/se/pdf/komm/2022/Global-Survey-of-Sustainability-Reporting-2022.pdf>. Acesso em: 14 out. 2025.

KULKARNI, Pramod. **Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications**. 3rd. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated, 2011 2011. 1 p. 978-0-470-38741-2 978-1-118-00166-0. Disponível em: <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-587858-f097d0697a.pdf>. Acesso em: 12 out. 2024.

LE VERN, Mickael; RAZAKAMANANTSOA, Andry; MURZYN, Frédéric *et al.* Effects of soil surface degradation and vehicle momentum on dust emissions and visibility reduction from unpaved roads. **Transportation Geotechnics**, v. 37, p. 20, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221439122200126X>. DOI: 10.1016/j.trgeo.2022.100842. Acesso em: 29 out. 2024.

LE VERN, Mickael; SEDIKI, Ouardia; RAZAKAMANANTSOA, Andry *et al.* Experimental Assessment of Dust Emissions on Compacted Soils Degraded by Traffic. **Atmosphere**, v. 11, n. 4, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340605940_Experimental_Assessment_of_Dust_Emissions_on_Compacted_Soils_Degraded_by_Traffic. DOI: 10.3390/atmos11040369. Acesso em: 23 jun. 2025.

LI, Shugang; ZHAO, Bo; LIN, Haifei *et al.* Review and prospects of surfactant-enhanced spray dust suppression: Mechanisms and effectiveness. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 154, p. 410-424, 2021 2021. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582021004638>. DOI: 10.1016/j.psep.2021.08.037. Acesso em: 23 jun. 2025.

LIAO, Rongfu; WYPYCH, Peter; PAN, Renhu *et al.* **Dust Suppression Efficiency of Spraying Systems - A Review**. 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/353559598>. Acesso em: 29 nov. 2024.

LIU, Shengyu; LIU, Xiaoyang; GUO, Zhongya *et al.* Wettability modification and restraint of moisture re-adsorption of lignite using cationic gemini surfactant. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 508, p. 286-293, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092777571630718X>. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2016.08.073. Acesso em: 29 abr. 2024.

LIU, Zheyuan; FU, Jin; YANG, Mingjun *et al.* New model for particle removal from surface in presence of deformed liquid bridge. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 562, p. 268-272, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021979719314511>. DOI: 10.1016/j.jcis.2019.11.117. Acesso em: 11 set. 2025.

MACARINGUE, Armando; FONTANA, Arthur; CASTRO, Maycon *et al.* O conceito de umidade crítica para a avaliação de emissão de poeira. 2022. DOI: 10.17648/enemp-2022-159134. Acesso em: 20 ago. 2024.

MALUF, Adalberto. Padrões Nacionais de Qualidade do Ar Texto Aprovado CTQA e validado pela CTAJe e Mudança do Clima. **Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima**, 14 jun. 2024. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/conama-aprova-prazos-para-novos-padroes-de-qualidade-do-ar/copy_of_ApresentaconamaAdalbertoMaluf.pdf/view. Acesso em: 01 nov. 2024.

MATSUSHIMA, Dai; KIMURA, Reiji; KUROSAKI, Yasunori *et al.* A Method for Estimating the Threshold Wind Speed for Dust Emissions as a Function of Soil Moisture. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 175, n. 2, p. 237-257, 01 mai. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00500-5>. DOI: 10.1007/s10546-020-00500-5. Acesso em: 14 fev. 2025.

MCKENNA-NEUMAN, C.; NICKLING, W. G. A theoretical and wind tunnel investigation of the effect of capillary water on the entrainment of sediment by wind. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 79-96, 1989. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.4141/cjss89-008>. DOI: 10.4141/cjss89-008. Acesso em: 17 nov. 2024.

MENEZES, Ronaldo dos Santos Junior; MESQUITA, André Luiz Amarante; GEMAQUE, Miriam Lys. Development of an Open-Circuit Low-Speed Wind Tunnel. *In: Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering*, 2015, Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/315550032_DEVELOPMENT_OF_AN_OPEN-CIRCUIT_LOW-SPEED_WIND_TUNNEL. DOI: 10.20906/cps/cob-2015-1949. Acesso em: 12 set. 2025.

MITARAI, Namiko; NORI, Franco. Wet Granular Materials. **Adv Phys**, v. 55, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/1849947_Wet_Granular_Materials. DOI: 10.1080/00018730600626065. Acesso em: 11 set. 2024.

MMA. **Orientação Técnica: Índice de qualidade do ar (IQAr)**. MMA - Ministério do Meio Ambiente. Brasília, p. 9. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/indice-de-qualidade-do-ar-igar/orientacao-tecnica-indice-de-qualidade-do-ar-jan-25.pdf>. Acesso em: 07 nov. 2024.

MOFFAT, R. J. Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis. **Journal of Fluids Engineering**, v. 104, n. 2, p. 250-258, 1982. Disponível em: http://fluidos-lfa.usuarios.rdc.puc-rio.br/metexp-pos/Paper_Moffat.pdf. Acesso em: 02 fev. 2025.

MUHS, Daniel R.; PROSPERO, Joseph M.; BADDOCK, Matthew C. *et al.* Identifying Sources of Aeolian Mineral Dust: Present and Past. *In: KNIPPERTZ, P. e STUUT, J.-B. W. (Ed.). Mineral Dust: A Key Player in the Earth System*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-94-017-8978-3>. Acesso em: 19 fev. 2024.

MUNKHTSETSEG, Erdenebayar; SHINODA, Masato; GILLIES, John A. *et al.* Relationships between soil moisture and dust emissions in a bare sandy soil of Mongolia. **Particuology**, v. 28, p. 131-137, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S167420011630027X>. DOI: 10.1016/j.partic.2016.03.001. Acesso em: 06 out. 2025.

NASA, Earth Observatory. **Dust Storm Sweeps from Africa into Atlantic**. 2000. Disponível em: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/519/dust-storm-sweeps-from-africa-into-atlantic>. Acesso em: 18/02/2025.

NEUMAN, Cheryl McKenna; SANDERSON, Steven. Humidity control of particle emissions in aeolian systems. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 113, n. F2, 2008. DOI: 10.1029/2007jf000780. Acesso em: 23 jun. 2025.

NYLEN, Julian; SHEEHAN, Madoc. The impact of moisture on lead concentrate powder dust emissions in ship-loading operations. **Powder Technology**, v. 394, p. 353-362, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez3.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0032591021007567?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.08.069.

OLIVEIRA, Felipe Lorena de; DIAS, Sandra de Cássia. Surfactantes sintéticos e biossurfactantes: vantagens e desvantagens. **Química Nova na Escola**, v. 39, n. 3, 2017. Disponível em: http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc39_3/03-QS-34-16.pdf. DOI: 10.21577/0104-8899.20160079. Acesso em: 18 fev. 2024.

OMANE, D.; LIU, W. V.; POURRAHIMIAN, Y. Comparison of chemical suppressants under different atmospheric temperatures for the control of fugitive dust emission on mine hauls roads. **Atmospheric Pollution Research**, v. 9, n. 3, p. 561-568, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104217304828?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.apr.2017.12.005. Acesso em: 13 out. 2025.

ONU, United Nations. **The Sustainable Development Goals Report 2025**. UN. New York, p. 51. 2025. Disponível em: https://unstats.un.org/sdgs/report/2025?_gl=1*1dsw5aq*_ga*NzczMDMwMTA2LjE3NjI3NzYxODU.*_ga_TK9BQL5X7Z*_czE3NjI3NzYxODUkbzEkZzAkdDE3NjI3NzYxODUkajYwJGwwJGgw. Acesso em: 14 out. 2025.

PACTO GLOBAL REDE BRASIL. **ESG - Entenda o significado da sigla ESG (Ambiental, Social e Governança) e saiba como inserir esses princípios no dia a dia de sua empresa**. 2025. Disponível em: <https://www.pactoglobal.org.br/esg/>. Acesso em: 01 set. 2025.

PANEBIANCO, Juan Esteban; BUSCHIAZZO, Fernando Avecilla Roger Funk Daniel E. Influence of friction velocity and saltation intensity on the particle-size distribution of dust (PM₃₂) emitted from an agricultural soil. p. 1176-1187, 2022. Disponível em: <https://onlinelibrary-wiley-com.ez3.periodicos.capes.gov.br/doi/epdf/10.1002/esp.5541>. DOI: 10.1002/esp.5541. Acesso em: 26 ago. 2025.

PARVEJ, Subbir; NAIK, Dayakar L.; SAJID, Hizb Ullah *et al.* Fugitive Dust Suppression in Unpaved Roads: State of the Art Research Review. **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 22, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/4/2399>. DOI: 10.3390/SU13042399. Acesso em: 12 fev. 2024.

PIERRAT, Patrice; CARAM, Hugo S. Tensile strength of wet granula materials. **Powder Technology**, v. 91, n. 2, p. 83-93, 15 mai. 1997 1997. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032591096031798>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(96\)03179-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(96)03179-8). Acesso em: 13 fev. 2024.

POSTAL, Andreia Marques; RAPOSO, Rebecca. **O que cabe no S do ESG?** São Paulo, 24 out. 2023 2025. Disponível em: <https://ibgc.org.br/blog/o-que-cabe-no-s-de-esg>. Acesso em: 01 nov. 2024.

QUEENSLAND GOVERNMENT. **Controlling the risk of dust exposure to workers in mines**. 21 set. 2018 2017. Disponível em: <https://www.business.qld.gov.au/industries/mining-energy-water/resources/safety-health/mining/hazards/dust/control>. Acesso em: 14 out. 2025.

RABELO, João Paulo Moraes; BOTEZELLI, Luciana. Práticas sociais, ambientais e de governança: perspectivas para o ESG no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 12, n. 30, p. 137-147, 2025. Disponível em: <https://revista.ecogestaobrasil.net/index.php/rbgas/article/view/2025-0046>. Acesso em: 11 set. 2025.

RABINOVICH, Evgeny; KALMAN, Haim. Incipient motion of individual particles in horizontal particle–fluid systems: B. Theoretical analysis. **Powder Technology**, v. 192, n. 3, p. 326-338, 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003259100900062X>. DOI: 10.1016/j.powtec.2009.01.014. Acesso em: 23 nov. 2024.

RAVI, Sujith; D'ODORICO, Paolo. A field-scale analysis of the dependence of wind erosion threshold velocity on air humidity. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 21, 2005. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005GL023675>. DOI: 10.1029/2005gl023675. Acesso em: 01 mar. 2025.

ŘEHÁČEK, David; KHEL, Tomáš; KUČERA, Josef *et al.* Effect of windbreaks on wind speed reduction and soil protection against wind erosion. **Soil and Water Research**, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/319397663_Design_of_a_windbreak_fence_to_reduce_fugitive_dust_in_open_areas. DOI: 10.17221/45/2016-swr. Acesso em: 12 out. 2025.

REHMAN, G.; KHATTAK, I.; HAMAYUN, M. *et al.* Impacts of mining on local fauna of wildlife in District Mardan & District Mohmand Khyber Pakhtunkhwa Pakistan. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e251733, 2021 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/bjb/a/BJvrtrvyN3qjz3cvScBJMv/?lang=en>. DOI: 10.1590/1519-6984.251733. Acesso em: 01 out. 2025.

REIS, T. O.; ZIEMATH, E. C.; OLIVEIRA, G. S. *et al.* Construção de uma balança simples para determinação da tensão superficial de líquidos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 1, 2015. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/hjsSK3QndyZrL3JWQYnk9Sx/?lang=pt>. DOI: 10.1590/s1806-11173711658. Acesso em: 26 ago. 2025.

RICHTER, Marc François; NASCIMENTO, Paloma Campos do; PLETSCHE, Patrícia Noschang *et al.* Indicadores ESG em Perspectiva: uma Análise Crítica de Frameworks e Diretrizes de Sustentabilidade Corporativas. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 6, 2025. Disponível em:

<https://ojs.revistagesec.org.br/secretariado/article/view/5007>. DOI: 10.7769/gesec.v16i6.5007. Acesso em: 11 nov. 2025.

SALNIKOV, V.; KOZHAGULOV, S.; RYSMAGAMBETOVA, A. Management of atmospheric air quality at mining fields based on ESG principles.

Technoeconomics, v. 3, n. 1 (8), p. 71-80, 2024. Disponível em:

<https://technoeconomics.spbstu.ru/en/article/2024.8.7/>. DOI: 10.57809/2024.3.1.8.7. Acesso em: 17 out. 2024.

SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Tratamentos de Minérios: Práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. 978-85-61121-02-0. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/544>. Acesso em: 21 dez. 2023.

SASB, Foundation International Sustainability Standards Board. **Sustainability Accounting standard: Metals & Mining**. IFRS Foundation. 2023. p. Disponível em: <https://sasb.org>. Acesso em: 04 out. 2025.

SEMAS, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade. Portal da SEMAS. 2025. Disponível em: <https://www.semas.pa.gov.br/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

SHAO, Yaping. **Physics and Modelling of Wind Erosion**. 2. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2009. (Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. 978-1-4020-8894-0. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-8895-7>. Acesso em: 11 abr. 2025.

SHAO, Yaping; LU, Hua. A simple expression for wind erosion threshold friction velocity. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D17, p. 22437-22443, 16 set. 2000. Disponível em:

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2000JD900304>. DOI: 10.1029/2000JD900304. Acesso em: 01 abr. 2025.

SHAO, Yaping; RAUPACH, Michael R.; LEYS, John F. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. **Soil Research**, v. 34, p. 309-342, 1996. Disponível em:

<https://www.semanticscholar.org/paper/A-model-for-predicting-aeolian-sand-drift-and-dust-Shao-Raupach/e79747ebdb1e435d8f1ddbfbf3fc6f856beca93>. DOI: doi.org/10.1071/SR9960309. Acesso em: 02 out. 2025.

SIEGER, Johannes L.; LOTTERMOSER, Bernd G.; FREER, Justus. Evaluation of Protein and Polysaccharide Biopolymers as Dust Suppressants on Mine Soils: Laboratory Experiments. **Applied Sciences**, v. 13, n. 2, p. 1010, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/1010>. DOI: 10.3390/app13021010. Acesso em: 08 jan. 2024.

SMARIK, S.; ANEY, S.; BOES, A. *et al.* **Dust Mitigation Handbook**. Las Cruces, NM: U.S. Department of Agriculture, 2019. Disponível em: <https://dust.swclimatehub.info/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

SOBRINHO, Otavio Medeiros; VIZUETE, William; HOINASKI, Leonardo *et al.* Unreported mining emissions as a major source of PM10 bias in global inventories: evidence from Brazil. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 19, n. 3, 2026. DOI: 10.1007/s11869-026-01927-4.

STALLWORTH, Audrey M.; CHASE, Eric H.; BURGOS, William D. *et al.* Laboratory Method to Assess Efficacy of Dust Suppressants for Dirt and Gravel Roads. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2674, n. 6, p. 188-199, 01 jun. 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0361198120918246>. DOI: 10.1177/0361198120918246. Acesso em: 08 ago. 2025.

TSAI, Chuen-Jinn; CHIOU, Shin-Fu. Measurement of emission factor of road dust in a wind tunnel. **Journal of Aerosol Science**, v. 30, p. S227-S228, 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850299801256>. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)80125-6](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(99)80125-6). Acesso em: 29 abr. 2024.

U.S. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. **13.2 Fugitive Dust Sources**. Washington, DC: Office of Air and Radiation. 1995a. 1-15 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0>. Acesso em: 28 ago. 2025.

U.S. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. **AP-42 Introduction**. Washington, DC: Office of Air and Radiation. 1995b. 1-15 p. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2024-01/introduction_2024.pdf. Acesso em: 28 ago. 2025.

U.S. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. **Selection, preparation and extraction of filter material**. Cincinnati, OH: U.S. EPA, 1999. 30 p. (Compendium Method IO-3.1, v. EPA/625/R-96/010a). Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-07/documents/epa-io-3.1.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025.

U.S. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. **13.2.2 Unpaved Roads**. Washington, DC: Office of Air and Radiation. 2006. 15 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0>. Acesso em: 24 ago. 2025.

U.S. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. **13.2.5 Industrial Wind Erosion**. Washington, DC: Office of Air and Radiation. 2020. 1-15 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-fifth-edition-volume-i-chapter-13-miscellaneous-0>. Acesso em: 30 ago. 2025.

U.S. EPA, U.S. Environmental Protection Agency. **Overview of Particulate Matter (PM) Air Quality in the United States**. United States Environmental Protection Agency. United States, p. 30. 2023. Disponível em: https://www.epa.gov/system/files/documents/2023-06/PM_2022.pdf. Acesso em: 25 ago. 2025.

U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency. **Reconsideration of the National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter**. Office of the Federal Register, National Archives and Records Administration. 2024. 103994 p. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2024/12/18/2024-27235/reconsideration-of-the-national-ambient-air-quality-standards-for-particulate-matter>. Acesso em: 01 out. 2025.

URSO, Maria Elena D.; LAWRENCE, Chris J.; ADAMS, Michael J. Pendular, Funicular, and Capillary Bridges: Results for Two Dimensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 220, n. 1, p. 42-56, 01 dez. 1999. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021979799965128>. DOI: <https://doi.org/10.1006/jcis.1999.6512>. Acesso em: 13 dez. 2023.

VALLERO, Daniel A. (ed.). **Fundamentals of Air Pollution**. 4 ed. Academic Press, 2014. 967 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/book/monograph/9780124017337/fundamentals-of-air-pollution>. Acesso em: 14 dez. 2023.

VDI, Associação dos Engenheiros Alemães. **VDI 3790 - Part 1: Environmental meteorology Emissions of gases, odours and dusts from diffuse sources Fundamentals**. Alemanha, Düsseldorf: VDI. 2015. p. Acesso em: 17 out. 2025.

VINCENT, Daniel. **Airborne particulate matter and their health effects**. França, 2025. Disponível em: <https://www.encyclopédie-environnement.org/en/health/airborne-particulate-health-effects-2/>. Acesso em: 22/06/2025.

WANG, X.; WANG, Q.; PRASS, M. *et al.* The export of African mineral dust across the Atlantic and its impact over the Amazon Basin. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 23, n. 17, p. 9993-10014, 2023. Disponível em: <https://acp.copernicus.org/articles/23/9993/2023/>. DOI: 10.5194/acp-23-9993-2023. Acesso em: 21 jan. 2026.

WANG, Xiaoliang; CHANCELLOR, George; EVENSTAD, James *et al.* A Novel Optical Instrument for Estimating Size Segregated Aerosol Mass Concentration in Real Time. **Aerosol Science and Technology**, v. 43, n. 9, p. 939-950, 2009. DOI: 10.1080/02786820903045141. Acesso em: 11 dez. 2024.

WANG, Yuan; DU, Cuifeng; CUI, Mengmeng. Formulation Development and Performance Characterization of Ecological Dust Suppressant for Road Surfaces in Cities. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356015742_Formulation_Development_and_Performance_Characterization_of_Ecological_Dust_Suppressant_for_Road_Surfaces_in_Cities. DOI: 10.3390/app112110466. Acesso em: 01 mar. 2025.

WANG, Zhen; CHEN, Siyu; LIU, Chenxi *et al.* Dynamic Dust Source Regions and the Associated Natural and Anthropogenic Dust Emissions at the Global Scale. **Frontiers in Earth Science**, v. 10, 2022. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2022.802658/full>. DOI: 10.3389/feart.2022.802658. Acesso em: 12 mai. 2026.

WATSON, John; CHOW, Judith; PACE, T. G. Fugitive dust emissions. *In: Air Pollution Engineering Manual*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2000. p. 117-135. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/235341819_Fugitive_dust_emissions. Acesso em: 21 dez. 2024.

WEINAN, Chen; ZHIBAO, Dong; ZHENSHAN, Li *et al.* Wind tunnel test of the influence of moisture on the erodibility of loessial sandy loam soils by wind. **Journal of Arid Environments**, v. 34, n. 4, p. 391-402, 1996. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140196396901196>. DOI: 10.1006/jare.1996.0119. Acesso em: 02 dez. 2024.

WHO, World Health Organization. **Hazard prevention and control in the work environment: Airborne dust**. WHO. USA: 31 mai. 1999, p. 224. 1999. (WHO/SDE/OEH/99.14). Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-SDE-OEH-99-14>. Acesso em: 22 mai. 2024.

WHO, World Health Organization. **Air quality guidelines, global update 2005**. Europe, UK: WHO Regional Office for Europe, 2006. 493 p. 9789289021920. Disponível em: <http://who.int/publications/i/item/WHO-SDE-PHE-OEH-06.02>. Acesso em: 17 mai. 2024.

WHO, World Health Organization. **Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide**. 1st. ed. Geneva: World Health Organization, 2021. 1 p. 978-92-4-003422-8. Disponível em: <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. Acesso em: 22 mai. 2024.

WHO, World Health Organization. What are the WHO Air quality guidelines? 2024. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines#:~:text=Air%20pollution%20is%20a%20complex,dust%20and%20many%20other%20sources>. Acesso em: 27 mai. 2024.

WHO, World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution. **Ambient (outdoor) air pollution**, 2025. Disponível em: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). Acesso em: 22 mai. 2024.

WRIGHT, C. Y.; MATOOANE, M.; OOSTHUIZEN, M. A. *et al.* Risk perceptions of dust and its impacts among communities living in a mining area of the Witwatersrand, South Africa. **Clean Air Journal**, v. 24, n. 1, p. 22-27, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/346742604_Risk_perceptions_of_dust_and_its_impacts_among_communities_living_in_a_mining_area_of_the_Witwatersrand_South_Africa. DOI: 10.17159/caj/2014/24/1.7052. Acesso em: 01 set. 2025.

XLV, Serviços Empresariais. **ESG: Entendendo os Principais Frameworks**. Principais Frameworks ESG, 2025. Disponível em: <https://xlvnegocios.com.br/esg-frameworks/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

YAN, Jie; YANG, Fanghui; ZHANG, Weiqing *et al.* Characterization of road dust and formulation of a molasses-based dust suppressant for heavy-duty haul roads in open-pit coal mine. **Atmospheric Pollution Research**, v. 16, n. 9, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez3.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1309104225001916?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.apr.2025.102589. Acesso em: 21 set. 2025.

YATES, Peter D.; FRANKS, George V.; BIGGS, Simon *et al.* Heteroaggregation with nanoparticles: effect of particle size ratio on optimum particle dose. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 255, n. 1-3, p. 85-90, 2005. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2004.12.035. Acesso em: 19 jun. 2025.

YOO, Hojun; CHO, Jeongyeon; HONG, Sungjin *et al.* Characteristics of Suspended Road Dust According to Vehicle Driving Patterns in an Urban Area and PM10 Content in Silt. **Atmosphere**, v. 15, n. 1, p. 5, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/1/5>. DOI: 10.3390/atmos15010005. Acesso em: 01 ago. 2025.

YULEVITCH, Gev; DANON, Michael; KRASOVITOV, Boris *et al.* Evaluation of wind-induced dust-PM emission from unpaved roads varying in silt content by experimental results. **Atmospheric Pollution Research**, v. 11, n. 2, p. 261-268, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com.ez3.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S1309104219304842?via%3Dihub>. DOI: 10.1016/j.apr.2019.10.010. Acesso em: 12 fev. 2024.

ZHANG, Qi; FAN, Lan; WANG, Hetang *et al.* A review of physical and chemical methods to improve the performance of water for dust reduction. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 166, p. 86-98, 2022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957582022006772>. DOI: 10.1016/j.psep.2022.07.065. Acesso em: 18 set. 2024.

ZHANG, Xiaoyu; ZHANG, Chunlai; LI, Wenping *et al.* Dust emission efficiency of compacted soils as a function of amount of abrader and soil texture. **Geoderma**, v. 435, 2023. DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116503. Acesso em: 01 nov. 2024.

ZHAO, Guan; CHEN, Yenyu; HOPKE, Philip K. *et al.* Characteristics of traffic-induced fugitive dust from unpaved roads. **Aerosol Science and Technology**, v. 51, n. 11, p. 1324-1331, 2017. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/321918195_Characteristics_of_traffic-induced_fugitive_dust_from_unpaved_roads. DOI:

10.1080/02786826.2017.1347251. Acesso em: 27 set. 2024.

ZHENG, C.; QIAN, S.; JIANG, B. *et al.* Experimental Investigation on Bituminite Dust Suppression Characteristics of a Bonding-Wetting Composite Dust Suppressant.

ACS Omega, v. 9, n. 33, p. 35990-35998, 01 ago. 2020 2024. Disponível em:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/39184495>. DOI: 10.1021/acsomega.4c06012.

Acesso em: 21 mar. 2024.

ZHOU, Gang; NIE, W.; CHENG, W. M. *et al.* Influence regulations analysis of high-pressure atomization dust-settling to dust particle's microscopic parameters in fully mechanized caving coal face. **Meitan Xuebao/Journal of the China Coal Society**, v. 39, p. 2053-2059, 2014 2014. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/287911593_Influence_regulations_analysis_of_high-pressure_atomization_dust-settling_to_dust_particle's_microscopic_parameters_in_fully_mechanized_caving_coal_face. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1311. Acesso em: 05 abr. 2024.

ZHOU, Lei; YANG, Shuying; YUAN, Zhulin *et al.* Inhibition of fine particles fugitive emission from the open-pit lignite mines by polymer aqueous solutions. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 555, p. 429-439, 20 out. 2018 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775718306174>. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.07.014>. Acesso em: 27 abr. 2024.

APÊNDICE A - Incertezas experimentais

Tabela A. 1 - Incertezas de medição do campo de velocidades para $\omega = 3\%$, sem supressor, variando a velocidade do vento.

Altura z (mm)	$\omega=3\%$ U=8m/s SS		$\omega=3\%$ U=12m/s SS		$\omega=3\%$ U=16m/s SS		$\omega=3\%$ U=20m/s SS	
	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)
3	5,07	0,04675	7,76	0,02992	8,69	0,02944	14,24	0,02197
4	5,27	0,04493	8,21	0,02861	8,75	0,02772	15,19	0,02190
5	5,45	0,04352	8,61	0,02760	9,54	0,02641	15,98	0,02197
6	5,68	0,04172	9,00	0,02669	10,08	0,02548	16,58	0,02209
7	5,84	0,04172	9,25	0,02669	10,88	0,02548	17,14	0,02209
8	6,04	0,04172	9,58	0,02669	11,62	0,02548	17,59	0,02209
12	6,76	0,03471	10,45	0,02447	12,97	0,02245	18,92	0,02291
20	7,59	0,03127	11,73	0,02306	14,61	0,02198	19,90	0,02343
36	8,01	0,02985	12,14	0,02276	15,51	0,02192	20,12	0,02355
68	8,01	0,02982	12,14	0,02277	15,75	0,02194	20,11	0,02354
132	8,00	0,02984	12,13	0,02279	15,86	0,02196	20,05	0,02350
250	7,98	0,02986	12,08	0,02282	15,96	0,02198	20,08	0,02351

Tabela A. 2 - Incertezas de medição do campo de velocidades para $\omega = 5\%$, sem supressor, variando a velocidade do vento.

Altura z (mm)	$\omega=5\%$ U=8m/s SS		$\omega=5\%$ U=12m/s SS		$\omega=5\%$ U=16m/s SS		$\omega=5\%$ U=20m/s SS	
	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)	u (m/s)	Incerteza (\pm m/s)
3	5,48	0,04254	8,27	0,02932	11,64	0,02317	14,50	0,02190
4	5,69	0,04104	8,76	0,02781	11,50	0,02317	15,03	0,02191
5	5,82	0,04011	9,12	0,02694	11,88	0,02284	15,75	0,02202
6	5,94	0,03933	9,50	0,02612	12,27	0,02258	15,99	0,02207
7	6,26	0,03933	9,77	0,02612	12,73	0,02258	16,52	0,02207
8	6,42	0,03933	10,20	0,02612	13,12	0,02258	16,63	0,02207
12	7,03	0,03359	11,05	0,02346	14,54	0,02190	18,52	0,02306
20	7,87	0,03040	11,80	0,02279	15,68	0,02199	19,65	0,02372
36	8,12	0,02962	12,03	0,02262	15,98	0,02205	20,09	0,02401
68	8,08	0,02976	12,03	0,02262	15,99	0,02205	20,13	0,02403
132	8,02	0,02992	12,04	0,02260	16,01	0,02205	20,09	0,02398
250	7,99	0,03002	12,02	0,02260	15,97	2,34803	20,12	0,02399

Tabela A. 3 - Incertezas de medição do campo de velocidades para $\omega = 5\%$ e 7% , $d = 1,75 \text{ L/m}^2$, $C_{ws} = 3\%$ variando a velocidade do vento.

Altura z (mm)	$\omega=7\%$ U=16m/s SS		$\omega=5\%$ U=16m/s d=1,75L/m ² C _{ws} =3%		$\omega=5\%$ U=12m/s d=1,75L/m ² C _{ws} =3%		$\omega=5\%$ U=8m/s d=1,75L/m ² C _{ws} =3%	
	u (m/s)	Incerteza (± m/s)	u (m/s)	Incerteza (± m/s)	u (m/s)	Incerteza (± m/s)	u (m/s)	Incerteza (± m/s)
3	10,98	0,02386	10,49	0,02471	7,41	0,03179	5,49	0,04132
4	11,30	0,02350	10,84	0,02425	7,57	0,03042	5,64	0,04031
5	11,89	0,02296	11,14	0,02387	7,87	0,03013	5,76	0,03953
6	12,22	0,02271	11,56	0,02342	8,23	0,02903	5,95	0,03832
7	12,62	0,02271	12,04	0,02342	8,55	0,02903	6,21	0,03832
8	12,95	0,02271	12,33	0,02342	8,96	0,02903	6,40	0,03832
12	14,28	0,02192	13,46	0,02215	10,11	0,02475	7,14	0,03273
20	15,60	0,02196	15,26	0,02190	11,60	0,02301	7,90	0,02997
36	16,05	0,02204	15,73	0,02195	12,03	0,02267	8,07	0,02947
68	16,16	0,02206	15,87	0,02198	12,01	0,02267	8,10	0,02941
132	16,12	0,02205	16,00	0,02200	12,01	0,02267	8,10	0,02944
250	16,06	0,02203	16,03	0,02201	12,03	0,02265	8,19	0,03291

Tabela A. 4 - Incertezas de medição do campo de velocidades para $\omega = 5\%$, variando dosagem concentração.

Altura z (mm)	$\omega=5\%$ U=16m/s d=1,75L/m ² C _{ws} =2%		$\omega=5\%$ U=16m/s d=1,75L/m ² C _{ws} =4%		$\omega=5\%$ U=12m/s d=1,17L/m ² C _{ws} =3%		$\omega=5\%$ U=8m/s d=2,33L/m ² C _{ws} =3%	
	u (m/s)	Incerteza (± m/s)	u (m/s)	Incerteza (± m/s)	u (m/s)	Incerteza (± m/s)	u (m/s)	Incerteza (± m/s)
3	10,24	0,02490	10,02	0,02478	11,83	0,02318	10,49	0,02421
4	10,49	0,02454	10,90	0,02364	11,90	0,02313	11,10	0,02349
5	11,20	0,02363	11,14	0,02339	12,34	0,02279	11,50	0,02311
6	11,62	0,02322	11,50	0,02305	12,70	0,02258	11,90	0,02280
7	12,17	0,02322	12,08	0,02305	13,06	0,02258	12,21	0,02280
8	12,66	0,02322	12,45	0,02305	13,37	0,02258	12,56	0,02280
12	14,03	0,02196	13,81	0,02196	14,79	0,02192	13,98	0,02194
20	15,72	0,02197	15,51	0,02198	16,18	0,02196	15,67	0,02200
36	16,10	0,02204	15,96	0,02208	16,61	0,02203	16,15	0,02211
68	16,07	0,02204	15,99	0,02209	16,58	0,02203	16,17	0,02215
132	16,03	0,02203	15,92	0,02207	16,56	0,02202	16,08	0,02209
250	15,98	0,02202	15,94	0,02207	16,49	0,02201	16,05	0,02208

APÊNDICE B - Resultados da análise de dupla materialidade: impactos socioambientais

Tabela B. 1: Análise da materialidade de impacto socioambiental

		Análise da materialidade de impacto socioambiental										
Tema material proposto	#	Impacto socioambiental proposto	Potencial ou real (P/R)	Impacto (P/N)	Severidade do impacto (1-5)			Probabilidade (1-100%)		Importância do impacto		Pontuação Materialidade de Impacto socioambiental (Eixo x)
					Escala	Escopo	Remediabilidade (0- NA,1-remediável, 5-Muito pouco remediável)					
Comunidades locais; Relações comunitárias	1	- Programas de engajamento das comunidades para monitoramento dos níveis de poeira.	P	Pos.	3	3	0	80%	Alta	3,0	Moderado	2,4
	2	- Poeira causa impacto em plantações, por inibição da fotossíntese, prejudicando plantaço de subsistência.	P	Neg.	3	2	4	60%	Média	3,0	Moderado	1,8
	3	- Poeira visível causando incômodo para os moradores, inclusive diminuindo visibilidade das vias, podendo causar incidentes, entre veículos da mineradora e comunitários.	P	Neg.	5	3	5	60%	Média	4,0	Extensivo	2,6
	4	- Doenças respiratórias na população das comunidades, causadas por poeira.	P	Neg.	4	3	4	60%	Média	3,0	Moderado	2,2
	5	- Uso compartilhado do recurso hídrico (para supressão de poeira e para sobrevivência das comunidades), gerando conflitos devido à escassez de água, afastamento dos animais aquáticos e terrestres próximo às fontes de captação de água.	P	Neg.	3	3	3	80%	Alta	3,0	Moderado	2,4

Emissões de MP, Gestão do ar	6	- Doenças respiratórias em trabalhadores.	P	Neg.	4	3	3	60%	Média	3,0	Moderado	2,0
	7	- Programas de gestão da qualidade do ar, com indicadores claros, atendendo os limites da legislação, e em linha com as ODS 3, 11 e 12.	P	Pos.	4	5	0	80%	Alta	4,0	Extensivo	3,6
	8	- Diminuição da visibilidade das vias devido a poeira, acidentes e paradas de produção.	P	Neg.	3	2	3	80%	Alta	2,0	Negligenciável	2,1
	9	- Percepção da comunidade de falta de cuidado da empresa com saúde e meio ambiente.	P	Neg.	3	3	4	80%	Alta	3,0	Moderado	2,7
Uso e disponibilidade de água para supressão de poeira; Gestão de águas. Água e efluentes.	10	- Implementação de sistemas de monitoramento em tempo real dos níveis de poeira, permitindo aplicação de supressores apenas quando necessário, economizando água, reforçando a LSO.	P	Pos.	3	3	0	80%	Alta	3,0	Moderado	2,4
	11	- Captação intensa em bacias críticas, competição com comunidades e ecossistemas. - Captação acima da outorga.	P	Neg.	4	5	4	80%	Alta	4,0	Extensivo	3,5
Mudanças climáticas, resiliência climática.	12	- Novas tecnologias para reduzir o consumo de água. - Utilização de circuito fechado de água. Melhora da LSO ao demonstrar gestão do risco climático e hídrico (seca, escassez e competição por água).	P	Pos.	4	4	4	80%	Alta	4,0	Extensivo	3,2
	13	- Contribuição para o aquecimento global pelo consumo de diesel, energia e pelos processos envolvidos na supressão de poeira. - Paradas de produção devido à falta de visibilidade das vias. - Conflitos com as comunidades. - Risco aumentado de acidentes e de doenças respiratórias.	P	Neg.	5	4	4	80%	Alta	4,0	Extensivo	3,5

APÊNDICE C - Resultados análise de dupla materialidade: impactos financeiros

Tabela C. 1 - Análise da materialidade de impacto financeiro

		Análise da materialidade de impacto financeiro						
#	Tema material proposto	#	Impacto financeiro proposto	Ameaça / oportunidade	Probabilidade impacto financeiro	Importância do impacto financeiro: Escala	Pontuação Materialidade de impacto financeiro (Eixo y)	Dupla materialidade?
1	Comunidades locais; Relações comunitárias	1	- Melhora do relacionamento com a comunidade, diminuindo paralisações das operações e redução das compensações.	Oportunidade	80%	4 Extensivo	3,2	Sim
		2	- Indenizações, multas, perda LSO, perda LO.	Risco	60%	4 Extensivo	2,4	Não
		3	- Indenizações, multas, perda LSO, perda LO. '- Responsabilização criminal	Risco	80%	4 Extensivo	3,2	Sim
		4	- Indenizações, multas, perda LSO, perda LO.	Risco	40%	4 Extensivo	1,6	Não
		5	- Paradas de produção, não atendimento de requisitos legais por falta de água e emissão MP acima do permitido.	Risco	80%	3 Moderado	2,4	Sim

2	Emissões de MP, Gestão do ar	6	- Indenizações, tratamentos de saúde. - Pagamento de multas por exceder os níveis de emissão regulamentados.	Risco	80%	3	Moderado	2,4	Sim
		7	- Reduz riscos materiais (multas, paralisações, passivos e custo de capital) e também criam oportunidades materiais (eficiência operacional, licenciamento mais previsível, acesso a financiamento e preferência de clientes/investidores)	Oportunidade	80%	4	Extensivo	3,2	Sim
		8	- Indenizações, processos civil e criminal	Risco	80%	4	Extensivo	3,2	Sim
		9	- Perda da licença social para operar, paralisações, causando perdas produção.	Risco	60%	4	Extensivo	2,4	Sim
3	Uso e disponibilidade de água para supressão de poeira; Gestão de águas. Água e efluentes.	10	- Redução do consumo de água, gastos com energia de captação. - Redução da probabilidade de multas regulatórias por consumo além da outorga. - Redução de paradas operacionais devido à baixa visibilidade das estradas. - Redução com manutenção de estradas.	Oportunidade	80%	5	Significante	4,0	Sim
		11	- Obras de CAPEX para buscar alternativas. - Multas do governo, ANA. - Paradas de produção por falta de água para supressão. - Aumentos dos custos com taxas regulatórias.	Risco	80%	4	Extensivo	3,2	Sim

4	Mudanças climáticas, resiliência climática.	12	- A maior oportunidade financeira é reduzir a dependência de água "nova" (limitada por outorga e conflito social) enquanto se aumenta a resiliência a secas prolongadas, evitando paradas operacionais e custos de conformidade.	Oportunidade	80%	4	Extensivo	3,2	Sim
		13	- Obras de CAPEX para buscar alternativas. - Secas prolongadas secando as fontes de água. - Aumento das taxas hídricas. - Aumentos dos custos com para otimização dos recursos hídricos na supressão de poeira. - Aumento do gasto com supressores.	Risco	80%	5	Significante	4,0	Sim