



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ORLANDO ASSUNÇÃO RODRIGUÊS

**SISTEMA DE DEGRADAÇÃO DO SOLO PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE
POEIRA DE VIAS NÃO PAVIMENTADAS EM TÚNEL DE VENTO**

TUCURUÍ-PA
2026

ORLANDO ASSUNÇÃO RODRIGUÊS

**SISTEMA DE DEGRADAÇÃO DO SOLO PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE
POEIRA DE VIAS NÃO PAVIMENTADAS EM TÚNEL DE VENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica, pela
Universidade Federal do Pará.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Coorientador(a): Prof. Me. Danilo Silva Santos

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)

R696s Rodrigues, Orlando Assunção.
Sistema de degradação do solo para avaliação da emissão de poeira de vias não pavimentadas em túnel de vento. / Orlando Assunção Rodrigues. — 2026.
42 f. il. color.
Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Coorientador(a): Prof. Me. Danilo Silva Santos
Trabalho de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2026.
1. Degradação de vias. 2. Bancada experimental. 3. Vias não pavimentadas
4. Emissão de poeira. I. Título.

CDD 620.0072

ORLANDO ASSUNÇÃO RODRIGUÊS

**SISTEMA DE DEGRADAÇÃO DO SOLO PARA AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE
POEIRA DE VIAS NÃO PAVIMENTADAS EM TÚNEL DE VENTO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica, pela
Universidade Federal do Pará.

Data da aprovação: 13/02/2026

Conceito: BOM

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Orientador, NDAE/UFPA

Me. Danilo Silva Santos
Coorientador, NDAE/UFPA

Membro interno: Prof. Dr. Maciel da Costa Furtado
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro externo: Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
BulkSol

AGRADECIMENTOS

A Deus por sua graça e misericórdia, por me guiar e sustentar, na busca dos meus sonhos e objetivos.

À minha mãe, cuja força e dedicação foram determinantes para que eu aprendesse a transformar desafios em motivação para seguir adiante

À minha família, que constitui o alicerce essencial para que eu pudesse seguir adiante, mesmo diante das dificuldades e incertezas do caminho.

Ao meu pai, que representa a base de caráter e responsabilidade sobre a qual meus valores foram construídos.

A todos os Professores da Faculdade de Engenharia Mecânica que consistem nos pilares do conhecimento que orientaram minhas escolhas e moldaram minha formação acadêmica.

A todos os colaboradores do Laboratório Fluidodinâmica e Particulados.

Aos Engenheiros André Mesquita, Danilo Santos, Arthur Fontana, por me instruírem e auxiliarem durante todo este ciclo.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente, que consistem nos elos fundamentais para que esta trajetória se tornasse possível.

“Deleita-te também no SENHOR, e ele te concederá o que deseja o teu
coração”. (Salmos, Cap. 37, 4)

RESUMO

A degradação de vias não pavimentadas constitui uma das principais fontes de emissões fugitivas de poeira na mineração, impactando diretamente a saúde dos trabalhadores, a segurança operacional e o desempenho ambiental das operações. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento, construção e validação de uma bancada de degradação de vias projetada para simular, de forma controlada, o fenômeno de emissão de partículas decorrente do tráfego de veículos fora de estrada. O sistema experimental é composto por um cilindro metálico revestido por material impresso em 3D que replica o perfil de pneus, acionado por um atuador pneumático para realizar deslocamento sobre um leito contendo material característico de estradas de chão. A bancada possui 500 mm e integra uma seção de teste acoplada ao túnel de vento, permitindo controlar as condições aerodinâmicas e operacionais durante os ensaios. A partir dessa configuração, busca-se analisar a dinâmica de levantamento e transporte de partículas, correlacionando variáveis como rugosidade superficial, resistência ao rolamento e intensidade de emissão de particulados. Espera-se que os resultados contribuam para o avanço de metodologias de controle e mitigação de poeira em operações minerárias, além de ampliar o entendimento físico dos mecanismos de geração de poeira em ambientes experimentais que reproduzem, de maneira fiel, as condições reais de degradação de vias não pavimentadas. Os ensaios experimentais evidenciaram a influência direta do teor de umidade na degradação superficial e na mobilização de partículas. Em condição de 3% de umidade, observou-se elevada desagregação do material, ao passo que, em 5%, ocorreu redução parcial desse efeito. Para 7% de umidade, constatou-se aumento significativo da estabilidade superficial, com menor fragmentação e maior resistência à erosão, mesmo em regimes de maior velocidade.

Palavras-chave: emissão de poeira; vias não pavimentadas; bancada experimental; degradação de vias.

ABSTRACT

The degradation of unpaved roads is one of the main sources of fugitive dust emissions in mining operations, directly affecting worker health, operational safety and environmental performance. In this context, this study presents the development, construction and validation of a road-degradation test bench designed to simulate, under controlled conditions, the particle emission phenomenon caused by off-road vehicle traffic. The experimental system consists of a metallic cylinder coated with a 3D-printed material that replicates tire tread geometry, actuated by a pneumatic system to move over a bed containing soil materials representative of unpaved mining roads. The test bench is 500 mm long and includes a test section coupled to the wind tunnel, allowing control of aerodynamic and operational conditions during testing. This configuration allows the analysis of the mechanisms governing particle entrainment and transport, correlating variables such as surfaces roughness, rolling resistance and particulate emission intensity. The expected results aim to support the development of dust control and mitigation strategies in mining environments, while contributing to a more comprehensive understanding of the physical processes responsible for dust generation under experimentally controlled conditions that realistically simulate unpaved road degradation. Experimental tests demonstrated the direct influence of moisture content on surface degradation and particle mobilization. At 3% moisture content, significant material disintegration was observed, while at 5%, this effect was partially reduced. At 7% moisture content, a significant increase in surface stability was observed, with less fragmentation and greater resistance to erosion, even at higher speeds.

Keywords: dust emission; unpaved roads; experimental test bench; road degradation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Motivação.....	11
1.2 Objetivo geral	11
1.3 Objetivos específicos.....	11
1.4 Estrutura do trabalho.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE EMISSÃO DE POEIRAS EM VIAS.....	13
2.1 Material particulado e definição de poeira.....	13
2.2 Vias não pavimentadas	13
2.3 Camada de revestimento	14
2.4 Resistência ao rolamento.....	15
2.5 Estudos de laboratório sobre emissão de poeiras em vias.....	17
2.6 Prevenção contra emissão de poeira – supressores de poeira	17
3. SISTEMA DE DEGRADAÇÃO DE AMOSTRAS	19
3.1 Descrição do túnel de vento do FLUIDPAR	19
3.2 Descrição do sistema de degradação de amostras	19
3.3 Dimensionamento do suporte mecânico e cilindro de degradação	20
3.4 Sistema pneumático de deslocamento automatizado.....	22
3.5 Dimensionamento do perfil do rolo.....	27
4. FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE DEGRADAÇÃO	29
4.1 Descrição da fabricação dos componentes.....	29
4.2 Contador de ciclos	30
4.3 Procedimento de utilização.....	31
4.4 Apresentação final do equipamento.....	32
5. RESULTADO DO USO DO SISTEMA DE DEGRADAÇÃO	34
5.1 Comparação da emissão de poeira com o uso do sistema.	34
5.2 Análise qualitativa da aplicação do sistema.....	35
6. CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

As vias não pavimentadas desempenham um papel fundamental em operações de mineração, sendo responsáveis por grande parte do tráfego de caminhões, máquinas e veículos de apoio. Devido à interação entre o solo solto e o movimento dos pneus, ocorre o levantamento de poeira — um processo complexo influenciado por variáveis mecânicas, ambientais e geométricas.

Essas emissões fugitivas de poeiras constituem um desafio significativo, pois impactam diretamente a qualidade do ar, o conforto dos trabalhadores, a manutenção de equipamentos e o cumprimento de requisitos ambientais. A literatura mostra que fatores como granulometria do solo, umidade, velocidade do veículo e pressão de contato exercem influência direta sobre a intensidade do fenômeno. Segundo Bolotari Junior (2024), vias de acesso não pavimentadas - sem controle - representam uma das maiores fontes de emissões fugitivas de material particulado.

Somado a isso, o tráfego constante de grandes veículos e as atividades de terraplanagem contribuem significativamente para a dispersão dessas partículas, que são transportadas pelo vento, ampliando o impacto negativo na qualidade do ar (Lima, 2022). No entanto, a quantificação exata desse processo em campo envolve dificuldades críticas, como a impossibilidade de controlar variáveis meteorológicas (rajadas de vento e umidade relativa) e a complexidade logística para a instalação de sensores de precisão em áreas operacionais extensas.

Conforme apontado por Katra (2019), as medições de emissão de poeira em laboratório costumam apresentar concentrações de emissões fugitivas mais elevadas em comparação com as medições de campo, mesmo sob condições experimentais similares de solo e vento. Essa divergência ocorre devido à perturbação da estrutura original do solo durante a preparação das amostras em ambiente controlado. Dessa forma, torna-se relevante o desenvolvimento de métodos experimentais que permitam simular, em laboratório, as condições de levantamento de poeira de maneira controlada e reprodutível.

Nesse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma bancada experimental integrada a um túnel de vento para simular a interação entre um pneu e o material de estradas de chão. O sistema utiliza um cilindro de aço revestido com impressão 3D com perfil semelhante ao de pneus, deslocado sobre um leito contendo solo representativo. O movimento de 500 mm de ida e volta deslocado por um sistema pneumático, associado ao fluxo de ar do

túnel, permite estudar a suspensão de partículas de maneira sistemática. A pesquisa pretende fornecer dados experimentais relevantes e contribuir com soluções de engenharia voltadas ao controle da poeira, alinhadas com práticas sustentáveis e demandas operacionais da mineração.

1.1 Motivação

A necessidade de contornar eventuais imprecisões durante estudos experimentais sobre o levantamento de poeira em vias não pavimentadas se torna cada vez mais evidente. O comportamento do particulado depende de condições específicas e, como diversos métodos de ensaio exigem a reprodução controlada do fenômeno de emissão de poeiras, desenvolver uma bancada dedicada torna-se um elemento essencial para garantir maior qualidade e confiabilidade nos resultados obtidos durante as análises laboratoriais. A padronização do processo permite uma avaliação mais precisa dos efeitos gerados pelo tráfego de minério, contribuindo significativamente para estudos ambientais e para o desenvolvimento de soluções eficientes de controle de emissões.

1.2 Objetivo geral

Desenvolver e construir uma bancada de degradação de vias não pavimentadas para o estudo de emissão de poeiras em túnel de vento.

1.3 Objetivos específicos

- Dimensionar e fabricar cilindro de degradação e suporte mecânico;
- Dimensionar e fabricar luva em impressão 3D para o cilindro de degradação com ranhuras em escala dos pneus utilizados na mineração;
- Dimensionar e automatizar o atuador pneumático, garantindo controle preciso de velocidade, percurso e repetibilidade dos ensaios;
- Padronizar condições de teste para minimizar variáveis externas, assegurando confiabilidade na avaliação da emissão de poeiras.

1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1, apresenta-se a introdução do trabalho, contemplando a contextualização do tema, o problema de pesquisa e as motivações que levaram ao estudo. Além disso, definem-se os objetivos geral e específicos, bem como a justificativa da relevância desta pesquisa para o setor mineral.

No Capítulo 2, são abordados os principais problemas relacionados à geração e emissão de poeira em vias não pavimentadas utilizadas no transporte de minério, discutindo os mecanismos de formação, os fatores que influenciam o levantamento de partículas e as tecnologias de controle atualmente empregadas na indústria mineradora.

No Capítulo 3, apresenta-se o processo de dimensionamento dos componentes e sistemas necessários para a construção da bancada experimental, incluindo o desenvolvimento do cilindro simulador de roda, a seleção dos materiais, a definição do sistema de acionamento e as adaptações necessárias para reaproveitamento de equipamentos disponíveis.

No Capítulo 4, descrevem-se a montagem da bancada e o funcionamento integrado dos sistemas projetados, detalhando o movimento cíclico simulado, o preparo das amostras de material de estrada e os procedimentos operacionais adotados para execução dos ensaios.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados do uso do sistema de degradação, onde são analisados os ensaios de validação da bancada. São discutidas as observações qualitativas da degradação do leito sob diferentes variáveis de controle, como velocidade do vento (8, 12 e 16 m/s) e teores de umidade (3%, 5% e 7%), demonstrando a eficácia do sistema em reproduzir os mecanismos de emissão de partículas.

No Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais, discutindo-se os resultados obtidos, as limitações da bancada e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE EMISSÃO DE POEIRAS EM VIAS.

2.1 Material particulado e definição de poeira

Segundo Vieira (2009), o material particulado é uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas, que consiste em sólidos finos e gotículas de líquidos, dispersos no ar. Podem ser mencionadas simplesmente como poeiras, quando se referem às partículas urbanas com uma contribuição de partículas do solo e de areia, incluindo as emissões de vias não pavimentadas. A denominação material particulada abrange uma variação de tamanho de partícula: as partículas grossas geralmente são de poeiras fugitivas das rodovias e indústrias; as partículas finas são as de aerossóis secundários, as partículas da combustão e vapores de compostos orgânicos metálicos descondensados, que permanecem em suspensão por períodos longos porque têm baixa velocidade de sedimentação e são conhecidas como partículas inaláveis (ALVES, 2022).

2.2 Vias não pavimentadas

De acordo com dados divulgados na síntese do modo rodoviário, a malha brasileira se estende por mais de 1,5 milhão de quilômetros (desconsiderando a rede planejada). No entanto, somente 12,4% é pavimentada, o que corresponde a 213,5 mil quilômetros, dos quais 111.853 quilômetros foram avaliados pela Pesquisa da Confederação Nacional de Rodovias (CNT, 2024).

Segundo Pinho (2015), a manutenção preventiva é a estratégia mais eficaz para evitar problemas, como a geração excessiva de poeira, a formação de buracos, a remoção de materiais soltos e a construção inadequada de leiras de segurança. Contudo, observa-se que, na maioria das operações minerárias, predomina a manutenção corretiva, na qual os reparos são realizados apenas após a ocorrência dos danos, o que resulta no aumento dos custos operacionais e de conservação das vias.

A poeira é uma nuvem de partículas finas em suspensão desprendidas da pista, causada pela degradação das vias, provocados por tráfego constante desses caminhões fora de estrada, na operação de transporte e pode comprometer a segurança do tráfego devido ao seu impacto na baixa visibilidade do operador. É mais comum esse problema em estradas com solo argiloso, onde existe uma grande quantidade de material solto na superfície. Para manutenção, deve-se utilizar de caminhões pipa ou sistema de aspersão fixa para controle de poeira com umectação,

no caso da utilização de caminhões pipa, deve ser feita uma irrigação intermitente de 15m em 15m com objetivo de se evitar excesso de água na pista (COUTINHO, 2017).

As cargas de poeiras nas rodovias dependem de vários fatores, entre os quais o tipo de pavimento e condições de circulação, para os inventários de emissões de particulados e os modelos de qualidade do ar deve-se usar fatores de emissão obtidos localmente. As partículas resultantes da emissão de poeiras contêm vários constituintes químicos potencialmente perigosos, tais como metais, compostos plásticos e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, os quais podem desencadear efeitos adversos na saúde humana, incluindo câncer (ALVES 2022).

Segundo Filho (2010), Sousa (2011) e Tannant e Regensburg (2001), o pavimento de acesso de mina é constituído por quatro camadas:

- Revestimento;
- Base;
- Sub-base;
- Reforço de subleito, que são construídas acima do subleito.

Como foco a camada de revestimento estrutural, compreendida como uma camada única de carácter funcional, responsável por desempenhar a impermeabilização da estrutura, o provimento de uma superfície de rolamento segura e confortável, e a resistência aos esforços diretos do tráfego como tração, abrasão e cisalhamento, assegurando a durabilidade de todo o sistema pavimentado, conseqüentemente, contribuindo para a maior durabilidade do sistema e para a redução de processos de degradação.

2.3 Camada de revestimento

Podem ser utilizados os seguintes materiais para a construção do revestimento das estradas, de acordo com o modelo de Tannant e Regensburg (2001):

- Solos pedregulhos;
- Pedra britada;
- Concreto asfáltico;
- Concreto compactado a rolo (RCC);
- Solo estabilizado.

Solos cascalhosos naturais e pedra britada

Esses materiais são frequentemente usados porque normalmente são encontrados na própria mina ou no seu entorno, podendo ser usados a baixo custo e com rapidez de obtenção. Quando construídos e mantidos adequadamente, ambos os materiais propiciam estradas

estáveis que resistem à deformação e permitem boa tração com baixa resistência ao rolamento (PINHO, 2015)

Os atuais métodos de avaliação de desempenho funcional são subjetivos e de natureza localizada e qualquer deterioração na condição do pavimento é, portanto, difícil de avaliar. O fraco desempenho funcional manifesta-se pela:

- Baixa qualidade de condução;
- Poeira excessiva;
- Aumento do desgaste e danos nos pneus;
- Perda de produtividade.

O resultado desses efeitos é visto como um aumento nos custos gerais de operação e manutenção dos veículos, podendo ser associado à resistência ao rolamento (PINHO, 2015).

2.4 Resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento de um pneu refere-se à força que se opõe ao seu movimento sobre uma superfície. Essa resistência é causada pelas deformações do pneu devido ao atrito com o solo e obstáculos. A resistência ao rolamento afeta a energia necessária para mover um veículo, impactando diretamente o consumo de combustível. Pneus com menor resistência ao rolamento exigem menos energia, geram menos calor e têm melhor desempenho. Em suma, menor resistência resulta em menor consumo de energia, menos emissões e melhor performance. Pneus com essas características são frequentemente chamados de pneus ecológicos ou verdes (MICHELIN, 2026).

Segundo a Caterpillar (2026), os fatores de resistência ao rolamento descrevem a energia necessária para que rodas ou esteiras se desloquem sobre diferentes tipos de terreno. Esses valores variam com as condições da superfície e a carga aplicada, sendo essenciais para estimativas de desempenho de equipamentos fora de estrada.

A resistência ao rolamento pode ser calculada usando estas relações da conforme a equação: Caterpillar (2026)

$$RR = [2\% + (0.6\% \times a)] \times GVM \quad (1)$$

Sendo:

RR – Resistência ao Rolamento (tonelada-força (t)); 1 tf = 9806.6135801985 N.

0,6% x a – É o adicional de resistência causado pela deformação do solo;

GVM – Massa (t.);

Sendo assim. Para cada centímetro (cm) de penetração do pneu no solo, adiciona-se 0,6 % (ou 6 kg/t) à resistência. (CATERPILLAR, 2026).

A resistência de base de 2% é comumente utilizada para estimativas gerais. Entretanto, a precisão do cálculo de desempenho depende de uma descrição fiel das condições do terreno e da carga. A Tabela 1 apresenta os fatores de resistência específicos para diferentes superfícies e tipos de pneus, permitindo a seleção do coeficiente mais adequado à realidade operacional do projeto.

O pneu diagonal (ou convencional) possui uma estrutura rígida composta por camadas de lonas têxteis sobrepostas em ângulos (30° a 40°), tornando-o altamente resistente a cortes e danos laterais, ideal para cargas pesadas, terrenos irregulares e uso agrícola.

O pneu radial é o padrão moderno de pneus, caracterizado por lonas de carcaça dispostas radialmente (a 90°) em relação ao sentido de rodagem, com cintas de aço sob a banda de rodagem. Oferece maior aderência, conforto, durabilidade e economia de combustível, sendo ideal para rodovias e velocidades elevadas em carros, vans e caminhões.

A escolha entre esteiras (especialmente de borracha) e pneus convencionais (diagonais ou radiais) em máquinas de mineração e de construção depende do tipo de terreno, carga de trabalho e necessidade de conservação do solo

Tabela 1: Tabela de Superfícies e Percentuais de Estimativa

(continuação)

Tabela de Superfícies e Percentuais de Estimativa			
Descrição da Superfície	Pneus (diagonais)	Pneus (radiais)	Esteira e Pneus
Superfície A – Superfície dura e lisa	1,5%	1,2%	1,0%
Superfície B – Firme, suave, ondulante	3,0%	2,5%	1,8%
Superfície C – Terra sulcada (25 mm)	4,0%	4,0%	2,4%
Superfície D – Terra sulcada (50 mm)	5,0%	5,0%	3,0%

Fonte: https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/rolling-resistance-factors.html Autor: CATERPILLAR, *Rolling resistance factors*, Acesso em: jan. 2026

Tabela 1: Tabela de Superfícies e Percentuais de Estimativa

(conclusão)

Tabela de Superfícies e Percentuais de Estimativa			
Descrição da Superfície	Pneus (diagonais)	Pneus (radiais)	Esteira e Pneus
Superfície E – Terra macia (100 mm)	8,0%	8,0%	4,8%
Superfície F – Cascalho solto (150 mm)	10,0%	10,0%	7,0%
Superfície G – Terra macia (200 mm)	14,0%	14,0%	10,0%
Superfície H – Muito macio (300 mm)	20,0%	20,0%	15,0%

Fonte: https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/rolling-resistance-factors.html Autor: CATERPILLAR, *Rolling resistance factors*, Acesso em: jan. 2026

A graduação de resistência ao rolamento vai de “A” até “H”, sendo “A” o mais eficiente e “H”, o menos eficiente na classe de consumo de combustível. Essa informação pode ser encontrada na etiqueta do pneu. (CATERPILLAR, 2026).

2.5 Estudos de laboratório sobre emissão de poeiras em vias

A poluição atmosférica causada pela geração de poeira durante o manuseio de minérios pode ser um problema grave. Diante do risco associado à inalação de poeira, a regulamentação da qualidade do ar tem estabelecido padrões cada vez mais rigorosos. Operações mineiras como detonação de explosivos, transporte, carregamento e lavra de minérios, geram diferentes tipos de impactos ambientais, os quais podem e devem ser amenizados (NAZARENO, 2018).

De acordo com Ramalho (2020), o estudo em túnel de vento é um importante passo para a realização de ensaios experimentais no estudo de secagem de minérios e outros materiais, sobretudo no estudo de controle de poeira.

2.6 Prevenção contra emissão de poeira – supressores de poeira

De acordo com a Norma Regulamentadora de Mineração (NRM 09), prevenção contra poeiras minerais:

- Nos locais onde haja geração de poeiras, na superfície ou no subsolo, deve ser realizado o monitoramento periódico da exposição dos trabalhadores, através de

grupos homogêneos de exposição e das medidas de controle adotadas, com o registro dos dados;

- Em toda mina deve estar disponível água em condições de uso, com o propósito de controle da geração de poeiras nos postos de trabalho, onde rocha ou minério estiver sendo perfurado, cortado, detonado, carregado, descarregado ou transportado;
- Os equipamentos geradores de poeira com exposição dos trabalhadores devem utilizar dispositivos para sua eliminação ou redução e ser mantidos em condições operacionais de uso;
- Quando ultrapassados os limites de tolerância à exposição a poeiras minerais, devem ser adotadas medidas técnicas e administrativas que reduzam, eliminem ou neutralizem seus efeitos sobre a saúde dos trabalhadores e considerados os níveis de ação estabelecidos nas NRM;
- As superfícies de máquinas, instalações e pisos dos locais de trânsito de pessoas e equipamentos devem ser periodicamente umidificados ou limpos, de forma a impedir a dispersão de poeira no ambiente de trabalho.

Ocorre que a prática corriqueira de mitigação da poeira gerada consiste, na maioria das mineradoras, da aspersão contínua de água sobre as vias, por meio de caminhões pipas. Demanda, para tanto, a necessidade de vários desses veículos em trânsito simultaneamente, além de pontos estratégicos de coleta d'água nos domínios da mina. medida tem se mostrado necessária, mas em contrapartida, pouco eficiente, haja vista a rápida percolação de água para o interior do pavimento, que drena com facilidade pelas características arenosas que geralmente possui (PINHO, 2015).

Segundo Nazareno (2018), o uso de supressores de poeira à base de biopolímeros apresentou eficiência de 96% na redução do consumo de água e 98% na mitigação da emissão de poeira. Dessa forma, foi possível alcançar 100% de controle da poeira nas áreas tratadas, promovendo maior estabilidade superficial da estrada com a aplicação desse supressor.

3. SISTEMA DE DEGRADAÇÃO DE AMOSTRAS

3.1 Descrição do túnel de vento do FLUIDPAR

O Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FLUIDPAR), localizado na Universidade Federal do Pará (UFPA), Campus Universitário de Tucuruí, dispõe de um túnel de vento e de infraestrutura experimental adequada para a realização de ensaios controlados. Configurando-se como um ambiente acadêmico voltado ao desenvolvimento de pesquisas nas áreas de mecânica dos fluidos, fenômenos de transporte, aerodinâmica, escoamentos internos, bem como estudos envolvendo a dinâmica de partículas. O laboratório oferece suporte técnico-científico para a execução de experimentos que demandam controle rigoroso das condições de escoamento, possibilitando a análise detalhada do comportamento de fluidos e materiais particulados em diferentes regimes operacionais. A figura 1 apresenta o túnel de vento disponível no laboratório FLUIDPAR, utilizado para a realização de ensaios.

Figura 1. Túnel de vento.



Fonte: Artur José Cunha da Silva, 2018.

A seção de testes possui dimensões de 600 mm x 600 mm x 1800 mm e permite a visualização por uma parede lateral feita de acrílico. As configurações do equipamento construtivas permitem que sejam atingidas velocidades de até 124 km/h, (SILVA, 2018).

3.2 Descrição do sistema de degradação de amostras

A degradação de vias não pavimentadas utilizadas por caminhões fora de estrada é um fenômeno intensificado pelas elevadas cargas por eixo, altos volumes de tráfego e condições operacionais típicas da mineração. O impacto repetitivo dos pneus sobre o leito da via promove a fragmentação do material de revestimento, reduzindo sua coesão e favorecendo a formação

de irregularidades como sulcos, trilhas de rodagem e afundamentos longitudinais. Além disso, o cisalhamento gerado durante o deslocamento dos veículos provoca a quebra das partículas do solo, resultando em aumento da fração fina disponível na superfície. Essa camada de material particulado torna-se altamente suscetível ao processo de ressuspensão, especialmente em períodos de clima seco, contribuindo para a intensificação da emissão de poeiras, demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Emissão de Poeiras.



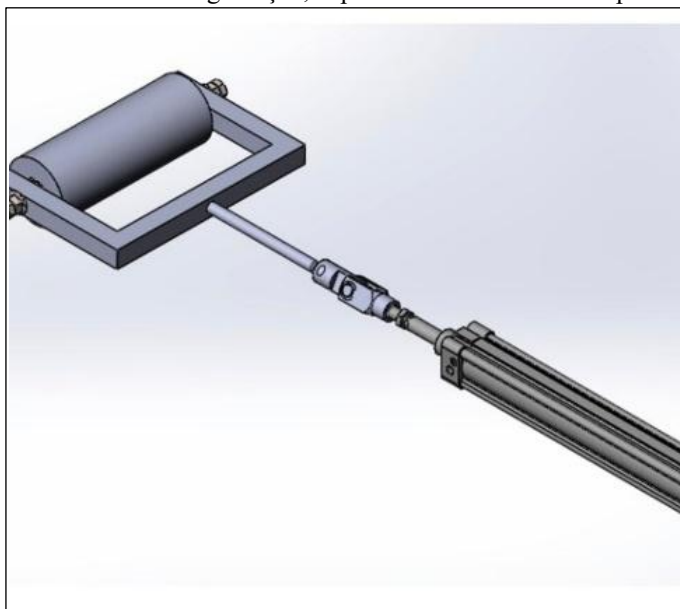
Fonte: <https://pxhere.com/pt/photo/1621650> (2026)
Acesso em: jan. 2026

Assim, compreender os mecanismos de degradação é essencial para avaliar a eficiência de técnicas de controle e para o desenvolvimento de soluções que prolonguem a vida útil das vias e reduzam os impactos ambientais associados ao tráfego minerário.

3.3 Dimensionamento do suporte mecânico e cilindro de degradação

A bancada de degradação foi projetada, utilizando um software de modelagem CAD, para ser um equipamento compacto e de simples fabricação, integrando os sistemas e dispositivos selecionado. A partir dessas análises, chegou-se a um produto previamente definido, o que possibilitou o dimensionamento adequado do suporte mecânico e do cilindro de degradação (figura 3).

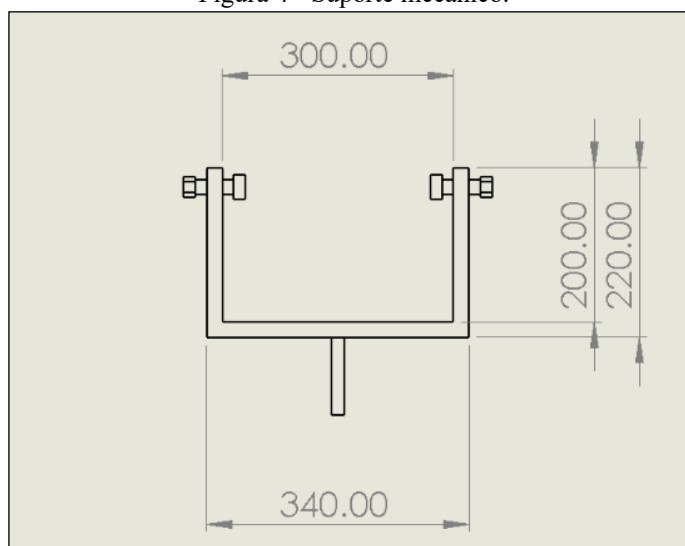
Figura 3: Cilindro de degradação, suporte mecânico e atuador pneumático.



Fonte: Autoria própria (2026).

O suporte mecânico (figura 4) para a bancada de degradação de vias, tem dimensões 300 mm x 200 mm, visando fixação, movimento unidirecional, além de proporcionar aos equipamentos do sistema um alinhamento nivelado entre seus movimentos.

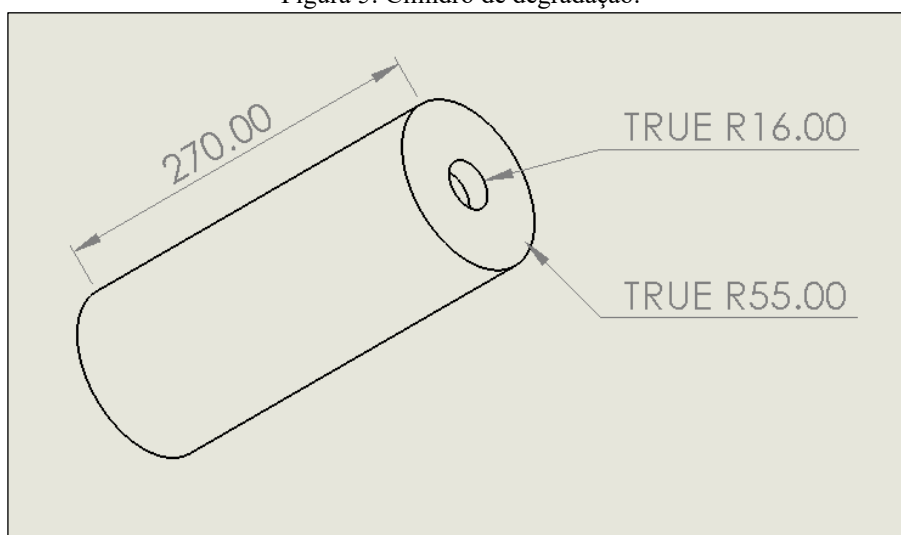
Figura 4 - Suporte mecânico.



Fonte: Autoria própria (2026).

Conforme a Figura 5, o cilindro de degradação possui as seguintes dimensões: diâmetro 110 mm, comprimento do cilindro de degradação 270 mm. São definidas a fim de se obter um espaço adequado para ser fixado ao suporte e assim centralizado no corpo de prova, além disso é feito uma cava de 32 mm de diâmetro no tarugo para a introdução do rolamento (6002), o qual vai possibilitar o movimento de rotação.

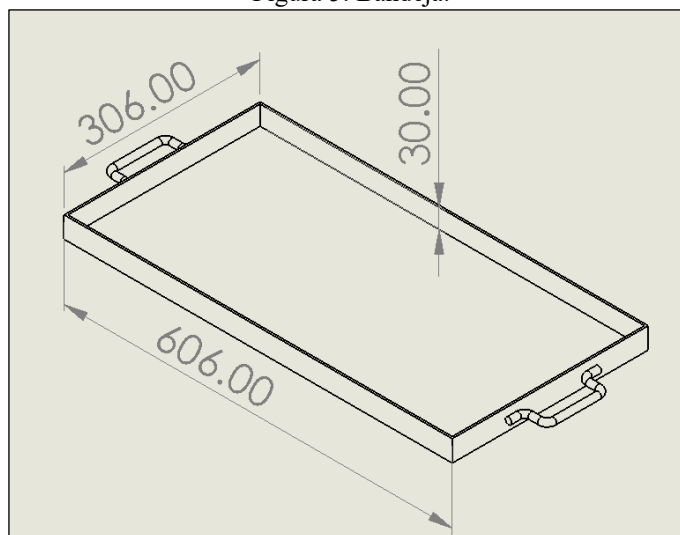
Figura 5: Cilindro de degradação.



Fonte: Autoria própria (2026).

A bandeja apresenta dimensões de 300 mm × 600 mm × 30 mm (Figura 5) e comporta até 8.500 g de material, utilizado como amostra representativa de estradas não pavimentadas.

Figura 5: Bandeja.



Fonte: Autoria própria (2026)

3.4 Sistema pneumático de deslocamento automatizado

Este sistema é projetado para realizar o deslocamento do cilindro de degradação de vias e executar de forma controlada, precisa e sem interferência humana, desta forma podemos definir a velocidade e dimensionar o deslocamento com o auxílio da automação.

O sistema é composto por:

- Atuador Pneumático;
- Compressor de ar;

- Regulador de fluxo;
- Válvula Solenoide Pneumática Direcional;
- Relé interface;
- Sensor magnético;
- Contador de pulso;
- Tubulações e conexões;

A Figura 6 apresenta o modelo de Atuador Pneumático utilizado no sistema de degradação, consistindo em um atuador de dupla ação tipo (ISSO 15552) que desempenha o deslocamento do cilindro de degradação sobre o leito.

Figura 6: Atuador pneumático



Autor: //www.polybelt.com.br/ (2026).

Acessado em: Acesso em: jan. 2026

O Compressor de Ar foi utilizado como fonte primária de energia para atuadores pneumáticos, é responsável por gerar e fornecer o ar comprimido necessário para o funcionamento dos cilindros e demais dispositivos do sistema, como demonstra a Figura 7. Ele converte energia mecânica em energia pneumática, garantindo um fluxo contínuo e estável de ar sob pressão adequada para acionamento dos atuadores.

Figura 7: Compressor de ar.



Autor: [//www.polybelt.com.br/](http://www.polybelt.com.br/) (2026).
Acesso em: jan. 2026

A válvula de controle de fluxo para cilindros pneumáticos 3/8" × 6 mm, representado na Figura 8, é utilizado para o controle da vazão e da velocidade do ar comprimido, atuando regulador de fluxo. Esse dispositivo permite ajustar a quantidade de ar que flui para os atuadores pneumáticos, como os cilindros, possibilitando o controle preciso da velocidade de deslocamento.

Figura 8: Regulador de Fluxo.



Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).
Acesso em: jan. 2026

As Válvula Solenoide/mola 5/2 Vias 1/4 Pneumática Tubo 6mm 12v são componentes comuns em sistemas de automação industrial, usadas para controlar o fluxo de ar comprimido para atuar cilindros de dupla ação, dispositivo apresentado conforme a Figura 9.

Figura 9: Válvulas Solenoides.



Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).
Acesso em: jan. 2026

O sensor magnético funciona como um interruptor reed (contacto magnético) que fecha na presença de um campo magnético, geralmente proveniente de um ímã. É amplamente utilizado em sistemas de segurança, controle de movimento, posicionamento de motores elétricos e detecção de falhas em equipamentos. A Figura 10 apresenta o sensor magnético do tipo três fios, configuração NA, padrão NPN, com comprimento de cabo de 1 m, grau de proteção IP67 e revestimento externo em PVC cinza, resistente a óleo.

Figura 10: Sensor Magnético



Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).
Acesso em: jan. 2026

Os sensores de campo magnético são especialmente adequados para detecção sem contato da posição do pistão em cilindros pneumáticos. Seguindo um princípio operacional eletrônico. O Contador de Pulsos Digital Inova INV-CC1-01 é utilizado para monitorar e

contabilizar os ciclos de degradação sobre o leito com material e defini-los em uma contagem de 10 ciclos. Conforme pode se observar na Figura 11, o contador de pulsos é um dispositivo eletrônico de quatro dígitos utilizado para registrar os ciclos de operação do atuador do túnel de vento, a partir de sinais NPN ou PNP, permitindo o monitoramento quantitativo dos ensaios de emissão de poeira.

Figura 11: Contador de Pulso



Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).

Acesso em: jan. 2026

O relé atua como elemento de interface de potência e isolamento elétrico, permitindo o acionamento seguro dos atuadores e dispositivos auxiliares do túnel de vento. A Figura 12 demonstra o relé eletromecânico Finder MasterBASIC, modelo 34.51 com bobina de 24 V e contato reversível de 6 A, é utilizado como interface de comando e isolamento elétrico, permitindo o acionamento seguro dos circuitos de potência do sistema experimental.

Figura 12: Relé Eletromecânico



Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).

Acesso em: jan. 2026

A seguir, a Figura 13 representa o Conector pneumático metálico do tipo engate rápido (push-in) com rosca macho, utilizado para a conexão direta de tubos flexíveis de ar comprimido

a componentes do circuito (válvulas, reguladores ou cilindros), garantindo vedação e montagem rápida no sistema pneumático do túnel de vento.

Figura 13: Conector pneumático metálico do tipo engate rápido (push-in) com rosca macho.



Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).
Acesso em: jan. 2026

A Figura 14 apresenta o Conector pneumático em ângulo de 90°, do tipo engate rápido (push-in) com rosca macho, empregado para redirecionar a linha de ar comprimido em espaços reduzidos, permitindo a organização da tubulação e a correta alimentação dos atuadores no sistema experimental.

Figura 14: Conector pneumático em ângulo de 90°, do tipo engate rápido (push-in) com rosca macho.

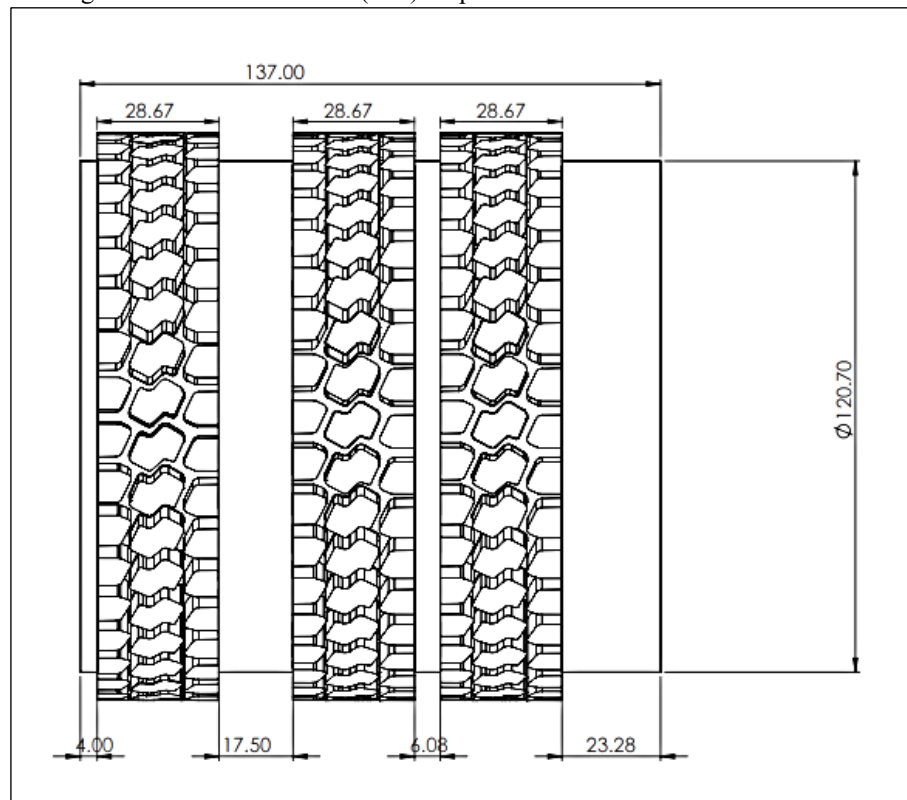


Autor: <https://www.polybelt.com.br/> (2026).
Acesso em: jan. 2026

3.5 Dimensionamento do perfil do rolo

Afim de implementar as características dos pneus utilizados nas mineradoras, buscou-se remodelar os perfis de pneus utilizados pelas empresas do ramo, o perfil do pneu em questão selecionado, foi o pneu ‘AEOLUS R24 AE 41’, como demonstrado no Desenho técnico de perfil dos pneus, conforme a Figura 15.

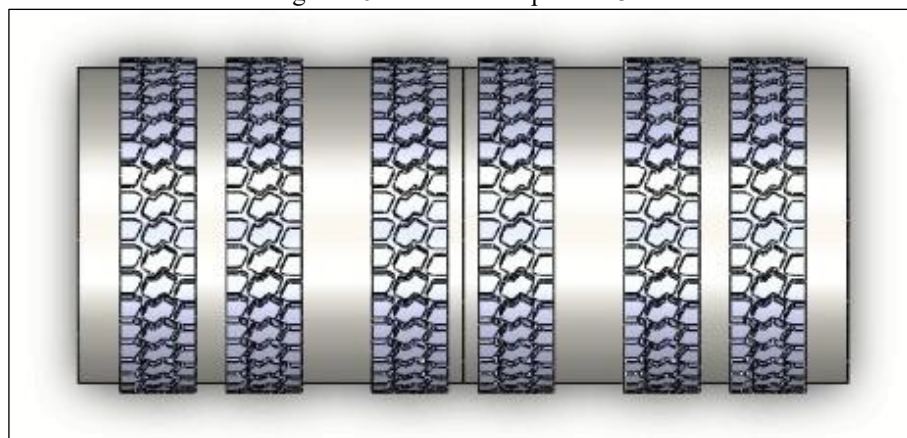
Figura 15: Desenho técnico (mm) do perfil dos Pneus AEOLUS R24 AE 41.



Autor: Aatoria própria (2026).

Para a determinação e reprodução do perfil do mesmo, desenvolveu um molde em impressão 3D projetado em software de modelagem CAD, conforme demonstrado na Figura 16, que funcionará como uma luva buscando imitar a ranhura e o fenômeno físico do atrito pneu/leito.

Figura 16: Molde em impressão 3D.



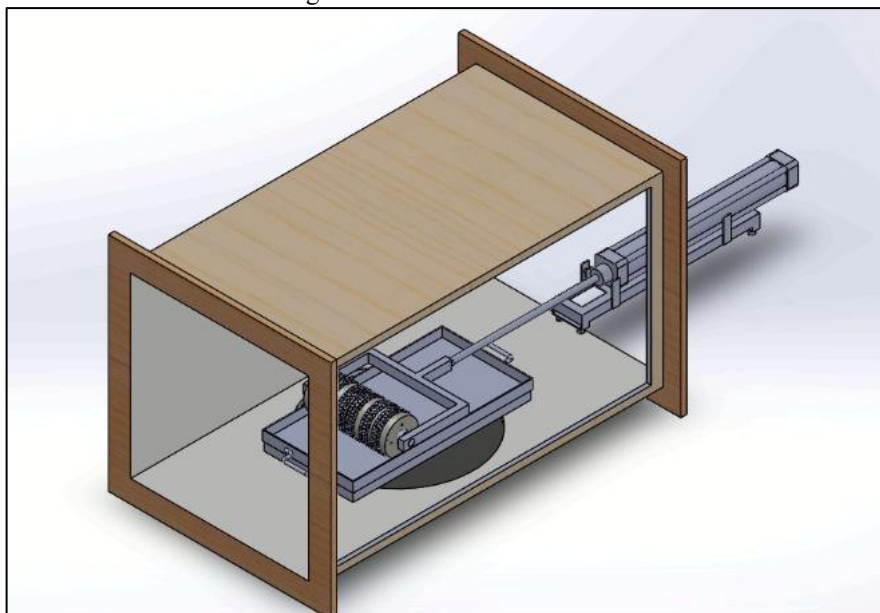
Autor: Aatoria própria (2026).

4. FABRICAÇÃO DO SISTEMA DE DEGRADAÇÃO

4.1 Descrição da fabricação dos componentes

Com o objetivo de realizar a seleção dos componentes mecânicos, através de um software de modelagem CAD, foi possível verificar medidas, interferências e possibilidades de montagem, como mostra a (figura 17).

Figura 17: Emissão de Poeiras.



Fonte: Autoria própria (2026)

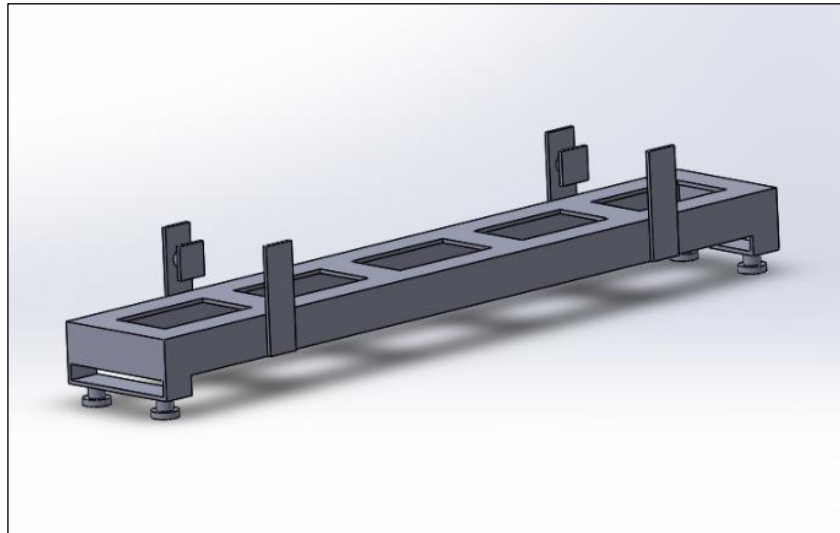
O cilindro de degradação é fixado ao suporte mecânico por meio de parafusos. A conexão entre o atuador pneumático e o sistema de degradação utiliza um elo de engate rápido (figura 18), facilitando a desmontagem após os ciclos de teste. Para garantir a precisão operacional, um suporte específico (Figura 19) alinha e nivela o movimento linear do atuador.

Figura 18: Ponteira Macho Garfo e Ponteira fêmea P/ Cilindro ISSO 15552



Fonte: <https://www.mercadolivre.com.br/ponteira-femea-garfo-pistaocilindro-5063mm-rosca-m16x150/up/MLBU1970800909>

Figura 19: Suporte mecânico do atuador pneumático.

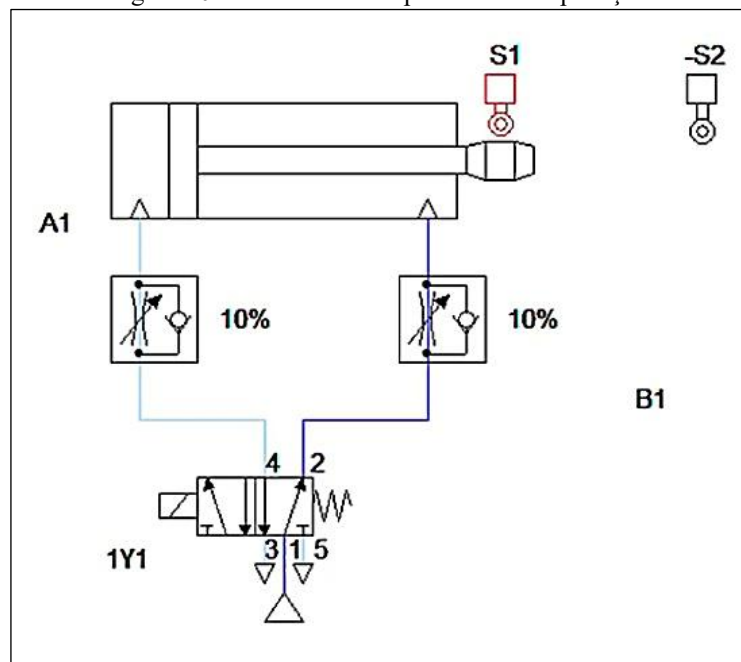


Fonte: Autoria própria (2026).

4.2 Contador de ciclos

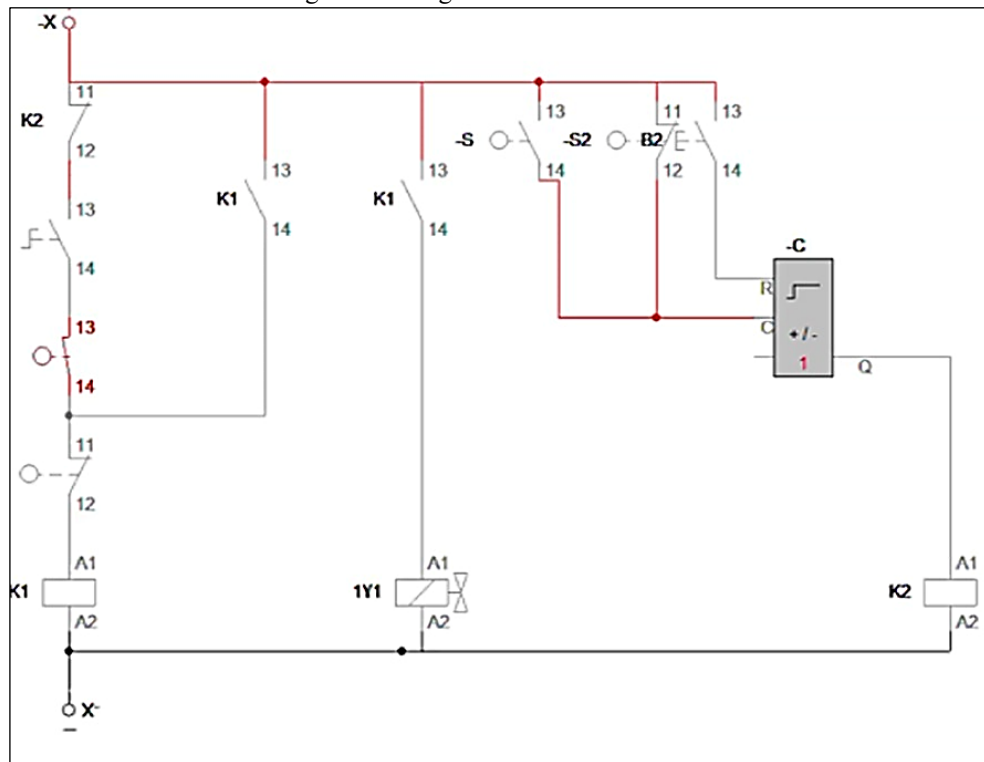
A bancada experimental é composta por um sistema atuador pneumática dupla ação com êmbolo magnético, controlado por uma válvula solenoide 5/2 vias (Figura 20). Dois sensores magnéticos posicionados no corpo do cilindro detectam os fins de curso (avanço e retorno), enviando sinais a um contador digital para registro automático de ciclos e monitoramento da posição linear assim como demonstrado no diagrama do sistema elétrico. (figura 21).

Figura 20: Sistema atuador pneumática dupla ação.



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 21: Diagrama do sistema elétrico.



Fonte: Autoria própria (2026).

Esse arranjo permite controle do movimento repetitivo, rastreabilidade dos dados experimentais e maior confiabilidade operacional. Além disso, o emprego de sensores magnéticos reduz o desgaste de componentes e aumenta a vida útil do sistema, em conformidade com as boas práticas de instrumentação pneumática e segurança descritas nas normas técnicas aplicáveis (ABNT, 2013; ABNT, 2015; FESTO, 2018; SMC, 2020).

4.3 Procedimento de utilização

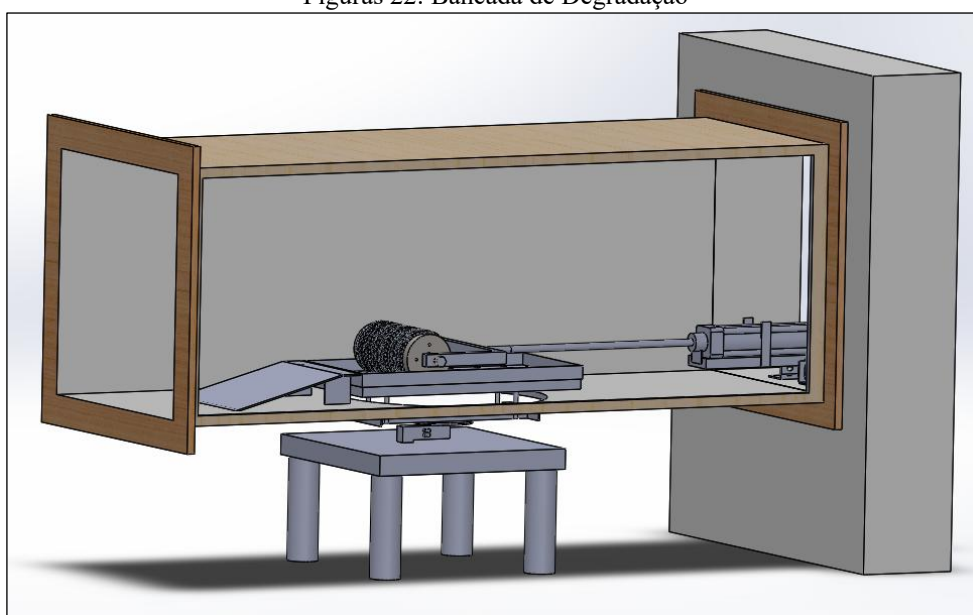
- I. O material é levado a secagem a 105° C durante 24 horas, após resfriado em temperatura ambiente é peneirado até atingir uma granulometria de 2,35 mm;
- II. A amostra de minério é umedecida em 3%, 5% e 7% de água, logo após homogeneizada é prensada em uma bandeja de 300 mm x 600 mm x 30 mm a fim de manter o material compactado e aglomerado;
- III. A bandeja, no centro do túnel de vento, recebe a ação de um rolo que simula o tráfego de um caminhão fora de estrada;
- IV. O percurso, a velocidade e os ciclos de degradação são automatizados, garantindo um movimento padronizado e sem interferência humana;

V. Após a degradação, o material é centralizado no túnel de vento para a verificação qualitativa da emissão de partículas sob uma velocidade de vento de 8 m/s, 12 m/s e 16 m/s.

4.4 Apresentação final do equipamento

Concluídas a partir da concepção do projeto as etapas de seleção, especificação de componentes e princípios de funcionamento dos sub sistemas, obtém-se a bancada de degradação de vias para o estudo de emissão de poeira. A versão final do equipamento pode ser visualizada a partir de uma modelagem 3D exibida na Figura 22.

Figuras 22: Bancada de Degradação



Fonte: Autoria própria (2026).

Nesta etapa, foram realizados ensaios preliminares com a bancada de degradação de vias, com o objetivo de verificar o funcionamento integrado dos subsistemas mecânico, pneumático e de interface com o túnel de vento. Inicialmente, avaliou-se a capacidade do sistema em realizar o movimento cíclico de ida e volta de 500 mm do cilindro de degradação sobre o corpo de prova, garantindo alinhamento entre o eixo de deslocamento e a bandeja contendo o material de estrada.

Durante os testes, observou-se que o atuador pneumático foi capaz de reproduzir, de forma repetitiva, o percurso especificado, sem ocorrência de travamentos ou desalinhamentos significativos. A luva em impressão 3D, acoplada ao cilindro metálico, manteve boa aderência ao eixo, e o perfil de ranhuras mostrou-se eficaz na geração de deformações superficiais no material compactado. Visualmente, foi possível identificar a formação de trilhas de rodagem e

o aumento de frações finas soltas na superfície, indicando que o mecanismo de degradação cumpre o papel de fragmentar o material de revestimento.

Do ponto de vista operacional, verificou-se ainda o comportamento do sistema sob diferentes configurações de pressão de alimentação e de regulação de fluxo. Tais ajustes permitiram variar a velocidade de deslocamento do cilindro, demonstrando a flexibilidade da bancada para realização de futuros ensaios com diferentes condições de carregamento dinâmico. Os resultados preliminares, portanto, indicam que a bancada atende aos requisitos de curso útil, repetibilidade de movimento e capacidade de degradação do leito de ensaio.

5. RESULTADO DO USO DO SISTEMA DE DEGRADAÇÃO

5.1 Comparação da emissão de poeira com o uso do sistema.

Embora, nesta fase, não tenham sido realizadas medições quantitativas de emissões de poeira ou de concentração de material particulado. Em particular, a integração com o túnel de vento possibilita controlar a velocidade do escoamento de ar sobre a amostra, o que é fundamental para investigar a emissão de partículas geradas pela degradação mecânica do revestimento.

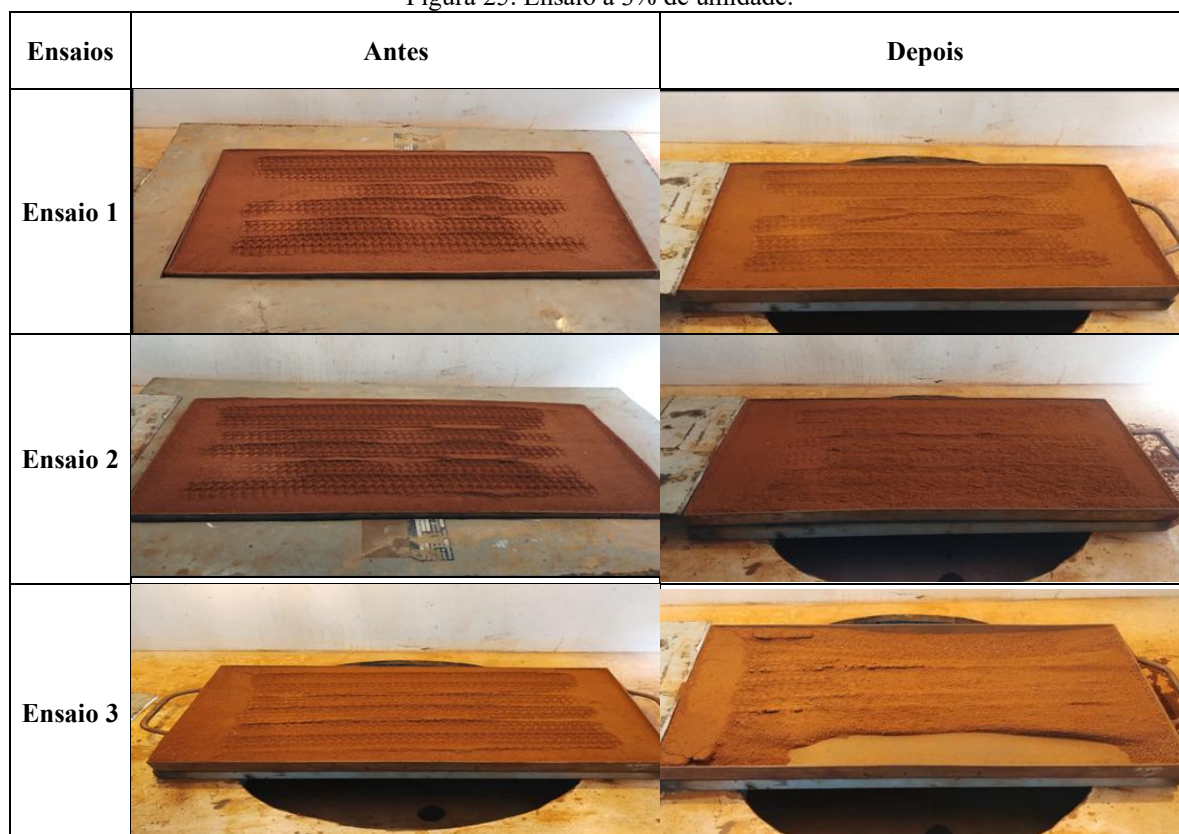
Outro aspecto relevante diz respeito à flexibilidade construtiva do sistema. A possibilidade de substituir a luva em impressão 3D por diferentes geometrias de banda de rodagem, bem como de utilizar materiais de estrada com granulometria e umidade controlada, amplia o campo de aplicação da bancada para estudos comparativos de desempenho de supressores de poeira e de configurações de revestimento. Dessa forma, a bancada apresentada na (figura 23), não apenas reproduz o fenômeno físico de degradação, como também se apresenta como uma plataforma experimental versátil para o desenvolvimento de soluções de controle de emissões em vias não pavimentadas.

Figuras 23: Bancada de Degradação



Fonte: A autoria própria (2026).

Figura 25: Ensaio a 3% de umidade.

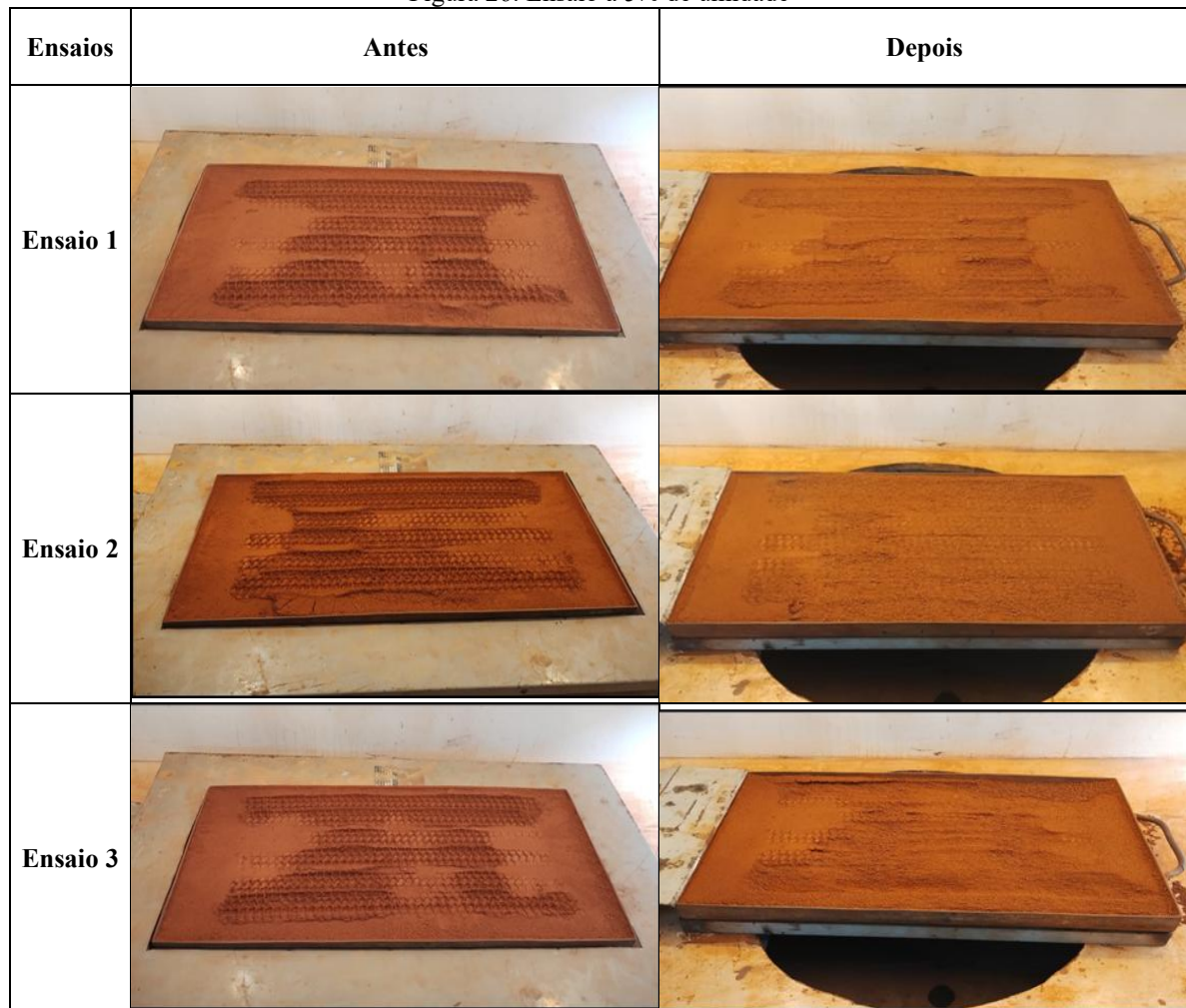


Fonte: Autoria própria (2026).

Na Figura 26, referentes aos ensaios com umidade de 5%, verifica-se uma redução parcial da degradação superficial em comparação ao caso anterior. Embora ainda sejam visíveis marcas de rolagem e alteração da textura do leito, a maior coesão proporcionada pelo aumento da umidade contribuiu para a diminuição da desagregação do material. Entretanto, nos ensaios com velocidades mais elevadas, ainda se observam zonas de desgaste significativo, demonstrando que a ação combinada da rolagem e do escoamento de ar continua sendo um fator determinante para a mobilização de partículas.

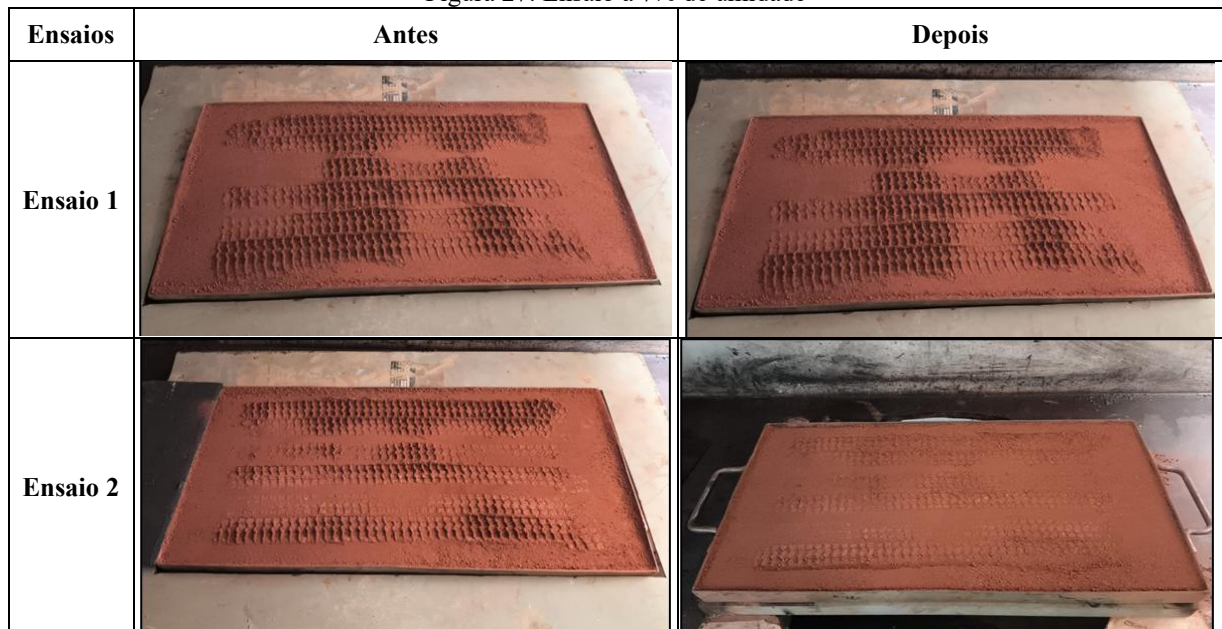
Por sua vez, os ensaios apresentados na Figura 27, realizados com umidade de 7%, mostram comportamento distinto, caracterizado por maior estabilidade superficial do leito. As marcas de rolagem permanecem visíveis, porém com menor profundidade e menor evidência de fragmentação do material. A presença de maior teor de umidade aumentou a coesão entre as partículas do solo, reduzindo a degradação mecânica e, conseqüentemente, o potencial de emissão de poeira. Mesmo sob velocidades mais elevadas de escoamento, o material apresentou maior resistência à erosão superficial.

Figura 26: Ensaio a 5% de umidade



Fonte: Autoria própria (2026).

Figura 27: Ensaio a 7% de umidade



Fonte: Autoria própria (2026).

Essas observações demonstram que o sistema experimental é capaz de reproduzir, de forma controlada, os principais mecanismos físicos associados à degradação de vias não pavimentadas e à geração de poeira, constituindo uma ferramenta adequada para estudos comparativos e para a avaliação de técnicas de controle de emissões particuladas.

6. CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu o objetivo geral de projetar e construir uma bancada experimental de degradação de vias não pavimentadas integrada a um túnel de vento, capaz de reproduzir, em ambiente controlado de laboratório, os principais mecanismos físicos associados à emissão de poeira decorrente do tráfego de veículos fora de estrada. A integração entre o sistema mecânico de degradação e o escoamento de ar permitiu simular de forma representativa as condições operacionais observadas em vias de mineração, estabelecendo uma plataforma experimental adequada para estudos de emissão de material particulado.

Do ponto de vista de projeto, foi realizado a fabricação e construção do cilindro de degradação e do suporte mecânico, assegurando rigidez estrutural, alinhamento adequado e compatibilidade com as dimensões do túnel de vento disponível no Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados (FLUIDPAR). O conjunto apresentou desempenho satisfatório durante os ensaios preliminares, permitindo o deslocamento uniforme do cilindro sobre o leito de ensaio sem falhas mecânicas ou desalinhamentos significativos.

Desenvolveu-se uma luva em impressão 3D com geometria inspirada nos perfis de pneus utilizados na mineração, a qual foi acoplada com sucesso ao cilindro metálico. As ranhuras reproduziram de forma eficaz o fenômeno de atrito pneu–revestimento, promovendo a formação de trilhas de rodagem, deformações superficiais e fragmentação do material compactado, características típicas da degradação observada em vias não pavimentadas reais.

No que se refere ao sistema pneumático de deslocamento automatizado foi devidamente dimensionado e integrado à bancada, possibilitando o controle preciso do percurso, da velocidade de deslocamento e do número de ciclos de degradação. A utilização de válvulas solenoides, sensores magnéticos e contador de pulsos garantiu elevada repetibilidade dos movimentos, conferindo confiabilidade operacional aos ensaios realizados.

Em relação aos procedimentos de utilização de preparo das amostras, foram contempladas etapas de granulometria até 2,35 mm. Secagem a 105° C, controle de umidade (3, 5 e 7%), compactação do material e exposição ao escoamento de ar (8, 12 e 16 m/s). A aplicação desses procedimentos permitiu observar de forma consistente a influência das variáveis de umidade e velocidade do vento sobre o comportamento de degradação do leito. Os resultados qualitativos evidenciaram maior fragmentação e liberação de partículas finas em condições de baixa umidade, bem como maior estabilidade superficial com o aumento do teor

de água, comportamento condizente com o esperado para materiais granulares, de acordo com a literatura.

Como limitações do estudo, destaca-se que os ensaios realizados nesta etapa foram predominantemente qualitativos, não contemplando ainda medições quantitativas de concentração de material particulado em suspensão, como PM10 e PM2,5. Além disso, não foram avaliados diferentes tipos de materiais de revestimento nem a aplicação de produtos supressores de poeira, o que restringe a análise ao comportamento inicial de degradação mecânica do leito. A ausência de instrumentação específica para coleta de partículas limita a obtenção de dados numéricos mais precisos sobre a emissão de poeira.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a instrumentação da bancada com sensores e sistemas de amostragem para quantificação de material particulado em suspensão, possibilitando análises mais completas das emissões. Sugere-se ainda a realização de campanhas experimentais sistemáticas com diferentes tipos de solos, granulometrias e teores de umidade, bem como a avaliação da eficiência de supressores de poeira comumente utilizados na mineração

REFERÊNCIAS

- ALVES, Célia. **Ressuspensão de poeiras rodoviárias: emissões, composição química e toxicidade.** *CAPAR – Ciência e Ambiente para Todos*, v. 11, art. 3, 2022. Disponível em: <<https://revistas.ua.pt/index.php/capiar>>. Acesso em: 23 nov. 2025
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4414:2015 — Sistemas pneumáticos: regras gerais e requisitos de segurança.** Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 1219-1:2013 — Sistemas e componentes pneumáticos e hidráulicos: representação gráfica e simbólica — Parte 1: Representação geral.** Rio de Janeiro, 2013
- BOLOTARI JUNIOR, N.; SILVA, H. S. C.; VIANA, T. A. D.; SIMÕES, A.; SOUZA, L. R. de. **Caracterização dos fatores de emissão de material particulado na mineração de terras raras.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL – CONGEA, 15., 2024, Belém-PA. Anais... Belém: CONGEA, 2024. DOI: 10.55449/congea.15.24.IV-008. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2024/IV-008.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2025.
- CATERPILLAR. **Rolling resistance factors.** Disponível em: https://www.cat.com/en_US/articles/ci-articles/rolling-resistance-factors.html. Acesso em: 26 nov. 2025.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de Rodovias 2024. Brasília, 2024.** Disponível em: <https://static.poder360.com.br/2024/11/Pesquisa-CNT-de-Rodovias-2024.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2025.
- COUTINHO, Heitor Lobo. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto.** 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- FESTO DIDACTIC. **Pneumatics — Basic Principles: Technical Handbook.** Esslingen: Festo Didactic, 2018.
- FILHO, A. B. **Projeto e construção de estradas de mina.** Belo Horizonte: 2010.
- KATRA, I. **Comparison of Diverse Dust Control Products in Wind-Induced Dust Emission from Unpaved Roads.** *Applied Sciences*, [S.l.], v. 9, n. 23, p. 5204, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app9235204>. Acesso em: 20 nov. 2025.
- LIMA, Diego. **Como eliminar a poeira de vias não pavimentadas com aplicação de produto de supressão de poeira.** *Intelecto Ltda Soluções Ambientais*, 18 jun. 2024. Disponível em: <https://intelectolta.com.br/2024/06/18/>. Acesso em: nov. 2025
- MICHELIN. **Informações básicas sobre pneus: resistência ao rolamento.** Disponível em: <https://www.michelin.com.br/auto/conselhos/informacoes-basicas-sobre-pneus/resistencia-ao-rolamento>. Acesso em: nov. 2025.
- NAZARENO, Guilherme Cassini; SILVA, Larissa Alves da; BARROS, Adriano José de; DINIZ, Fernanda da Fonseca; FERREIRA, Telma Ellen Drumond. Estudo de caso — **poeira nas operações de mina: alta eficiência no controle de particulados através do uso de supressor**

natural. Revista Observatorio de la Economía Latinoam, out. 2018 Disponível: <https://www.eumed.net/rev/oel/2018/10/control-particulado-supresornatural.htm>. Acesso em: nov. 2025.

PINHO, R. M. **Avaliação de métodos de controle de poeira em vias não pavimentadas na mineração**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

POLY-BELT, **Industria e Comercio de Acessórios Industriais Ltda**. Disponível em: <https://www.polybelt.com.br/>. Acesso em: 26 nov. 2025.

SMC CORPORATION. **Pneumatic systems and components: technical manual**. Tokyo: SMC Corporation, 2020.

SOUSA, R. C. **Dimensionamento e desempenho de estradas de mina**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

SILVA, Artur José Cunha da. **Estudo experimental e numérico de uma turbina eólica em escala de eixo horizontal com e sem difusor**. 2018. 114 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus de Tucuruí, Tucuruí, 2018.