Anais do Congresso Brasileiro de Iniciação Científica
(https://periodicos.unisanta.br/COB)

ISSN 2317-1316

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE MILHO EM UNIDADE DE ACRÍLICO: CORRELAÇÃO DA PERDA DE CARGA, FATOR DE DARCY E DO COEFICIENTE DE PERDA LOCALIZADA COM O NÚMERO DE REYNOLDS

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF PNEUMATIC CORN CONVEYING IN AN ACRYLIC UNIT: CORRELATION OF PRESSURE DROP, DARCY FRICTION FACTOR, AND LOCALIZED LOSS COEFFICIENT WITH THE REYNOLDS NUMBER

Gabriel Marcos da Silva, Giovanna Ferreira Sincerre Vida, Kauãn Morales Gabriel, Leonardo Henriques dos Santos, Luís Henrique Fernandes de Albuquerque, Matheus Ferreira Martins, Miguel Arcanjo Mujica Romas de Souza, Walace Oliveira Bastos, Nelize Maria de Almeida Coelho, Deovaldo de Moraes Júnior, Vitor da Silva Rosa

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Química
E-mail para contato: gv214630@alunos.unisanta.br

RESUMO – O transporte pneumático de materiais particulados depende das condições operacionais e da geometria do sistema. Este trabalho analisa experimentalmente as perdas de carga no transporte de milho em um protótipo de acrílico, com trecho horizontal e curva de 45°. Os ensaios variaram a velocidade do ar e a rotação do alimentador; as diferenças de pressão foram medidas por piezômetros. Avaliaram-se as relações entre Reynolds, fator de atrito de Darcy e coeficiente de perda localizada. Com milho inserido no sistema, o fator de atrito médio aumentou de 0,0171 (ar) para 0,0290–0,0315, e K passou de 0,267 para 0,583–0,687, indicando maior resistência ao escoamento.

Palavras-chave: Transporte pneumático; Milho; Perda de carga; Fator de atrito; Perda localizada.

ABSTRACT – Pneumatic conveying of particulate materials depends on operating conditions and system geometry. This study experimentally analyzes pressure losses during corn conveying in an acrylic prototype with a horizontal pipe and a 45° elbow. Tests varied air velocity and feeder speed; pressure differences were measured using piezometers. Relationships among Reynolds number, Darcy friction factor, and local loss coefficient were evaluated. With corn fed into the system, the mean friction factor increased from 0.0171 (air only) to 0.0290–0.0315, while K rose from 0.267 to 0.583–0.687, indicating greater flow resistance.

Keywords: Pneumatic conveying; Corn; Pressure loss; Friction factor; Local loss.

ISSN 2317-1316

1. INTRODUÇÃO

A expansão da produção e da comercialização de grãos no Brasil tem ampliado a demanda por infraestrutura de transporte e evidenciado limitações na logística nacional. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), aproximadamente 95% das unidades armazenadoras brasileiras possuem acesso rodoviário, enquanto a participação dos modais ferroviário e hidroviário é significativamente menor, demonstrando a dependência do transporte rodoviário e a concentração de veículos durante as safras (CONAB, 2026).

Esse cenário tende a se intensificar com o crescimento da movimentação de commodities agrícolas. O Plano Nacional de Logística (PNL) 2050 indica que algumas regiões brasileiras poderão apresentar aumento de aproximadamente 300% na demanda por transporte de soja e milho nos próximos 15 anos, impulsionado principalmente pelas exportações. Além disso, os custos dos fretes agrícolas variam conforme as condições de mercado, os custos operacionais, o período de colheita e as condições climáticas, podendo agravar os gargalos logísticos. Nesse contexto, torna-se necessário buscar soluções que aumentem a eficiência da movimentação de granéis sólidos e favoreçam a integração entre os diferentes modais de transporte (CONAB, 2026; BRASIL - Ministério dos Transportes, 2026).

O transporte pneumático consiste na movimentação de materiais particulados por meio de uma corrente de ar no interior de tubulações, utilizando a transferência de quantidade de movimento da fase gasosa para as partículas sólidas (MILLS, 2004). Sua aplicação à movimentação de grãos exige considerar propriedades como densidade aparente, granulometria, formato, teor de umidade e resistência mecânica, que influenciam na velocidade necessária para manter as partículas em movimento, evitar sua deposição e controlar as perdas de carga. Velocidades excessivas, por sua vez, podem intensificar os impactos entre os grãos e as paredes da tubulação, favorecendo a geração de partículas finas e danos ao material transportado (PAN, 1999).

Entre as vantagens do transporte pneumático destacam-se a operação contínua, a reduzida ocupação de espaço e a movimentação do produto em sistema fechado. Entretanto, a geração de partículas finas e poeiras exige cuidados de segurança, uma vez que determinadas concentrações podem representar riscos de ignição (BRIDLE; WOODHEAD, 2002).

Na cadeia logística de grãos, esse sistema apresenta potencial para aplicações de curta distância, como a transferência entre silos, unidades de processamento, terminais de transbordo

ISSN 2317-1316

e instalações de armazenagem. Nessas operações, pode reduzir a necessidade de movimentações intermediárias realizadas por veículos, contribuindo para a diminuição do consumo de combustíveis e das emissões associadas. Segundo o IPCC (2022), o transporte rodoviário respondeu por aproximadamente 69% das emissões de gases de efeito estufa do setor de transportes em 2019, evidenciando a importância de estratégias para reduzir sua participação. Contudo, os benefícios ambientais do transporte pneumático dependem do consumo energético dos equipamentos e da fonte de energia utilizada, sendo necessário avaliar se as emissões evitadas superam aquelas decorrentes da operação do sistema (IPCC, 2022).

Dessa forma, o desenvolvimento de sistemas de transporte pneumático para grãos apresenta potencial para modernizar a movimentação de granéis sólidos, especialmente em instalações que demandam fluxo contínuo entre pontos próximos. Como solução complementar aos modais convencionais, essa tecnologia pode contribuir para reduzir etapas intermediárias, otimizar operações e favorecer a integração logística, em consonância com as necessidades de ampliação da capacidade de transporte e redução de gargalos identificadas no planejamento nacional (BRASIL - Ministério dos Transportes, 2026; BRASIL - Ministério da Agricultura e Pecuária, 2026).

Por esse viés, tem-se como objetivo analisar experimentalmente a perda de carga dos grãos de milho em um sistema de transporte pneumático protótipo, avaliando a influência da velocidade do ar, da rotação da carambola alimentadora e da utilização de uma curva de 45° sob diferentes condições operacionais.

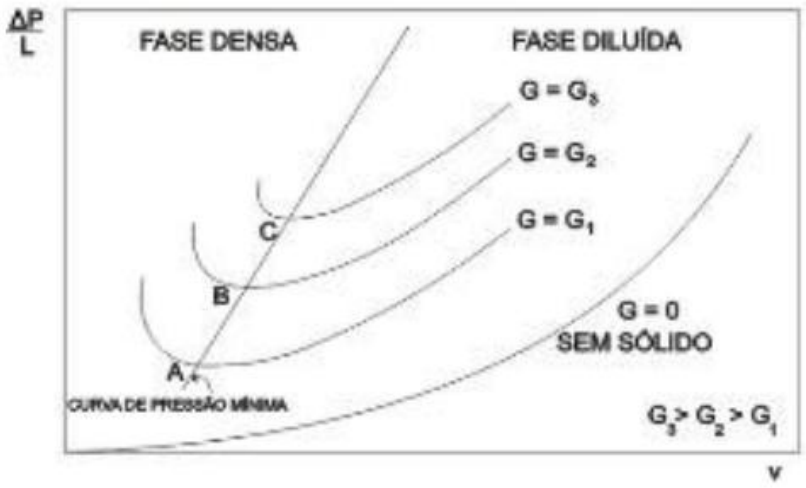
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O transporte pneumático utiliza um fluido, geralmente ar, para mover materiais particulados através de tubulações, sendo amplamente empregado em processos industriais e agrícolas. No entanto, em condições especiais, como ambientes com risco de incêndio, explosão ou impacto à saúde dos trabalhadores, podem ser usados outros gases. O deslocamento das partículas é feito por ventiladores, sopradores ou compressores, dependendo da pressão necessária no sistema.

Existem dois tipos principais de transporte pneumático: o de fase densa, onde a concentração de partículas ultrapassa 30% em volume, e o de fase diluída, com concentração inferior a 1% (Moraes et.al., 2017).

ISSN 2317-1316

Figura 1: Mudança de fase densa para diluída, onde v = velocidade do ar e G = vazão do sólido.



Fonte: Moraes, 2012.

Como observado pela Figura 1, a fase densa possui grandes perdas de carga (comparada a sua vazão) em seu percurso e sua curva característica é inclinada para baixo, dado que sua queda de pressão diminui ao aumento da vazão de ar. Ao passo que na curva característica da fase diluída encontra-se o fenômeno oposto, ao aumento da vazão de ar a queda de pressão tende a aumentar, gerando uma curva ascendente. Essa é a região mais utilizada para transporte de grãos, portanto, a região que será abordada nesse estudo.

As principais vantagens deste tipo de transporte incluem: baixo risco de contaminação do material, já que o transporte ocorre em dutos fechados, sem contato com o ambiente; flexibilidade de montagem, permitindo a instalação de dutos verticais, inclinados ou horizontais; custos reduzidos de operação e manutenção; capacidade de transportar diferentes tipos de materiais com propriedades similares; facilidade de automação; maior higiene e segurança no ambiente de trabalho (Klinzing et.al.,1997; Marcus et.al., 2005).

Entretanto, há algumas desvantagens: alto consumo de energia; abrasão dos dutos, em especial na parte inferior; degradação dos sólidos, caso o sistema não seja bem dimensionado; limitações de distância; complexidade de projeto; e transporte unidirecional (Klinzing et.al.,1997; Silva, 2005).

Devido ao elevado consumo de energia, o transporte pneumático é mais adequado para movimentar partículas finas em distâncias curtas. A maioria dos sistemas trabalha com vazões entre 1 e 400 toneladas por hora, distâncias inferiores a 1 km, e partículas com diâmetro abaixo de 10 mm (Klinzing et.al.,1997).

ISSN 2317-1316

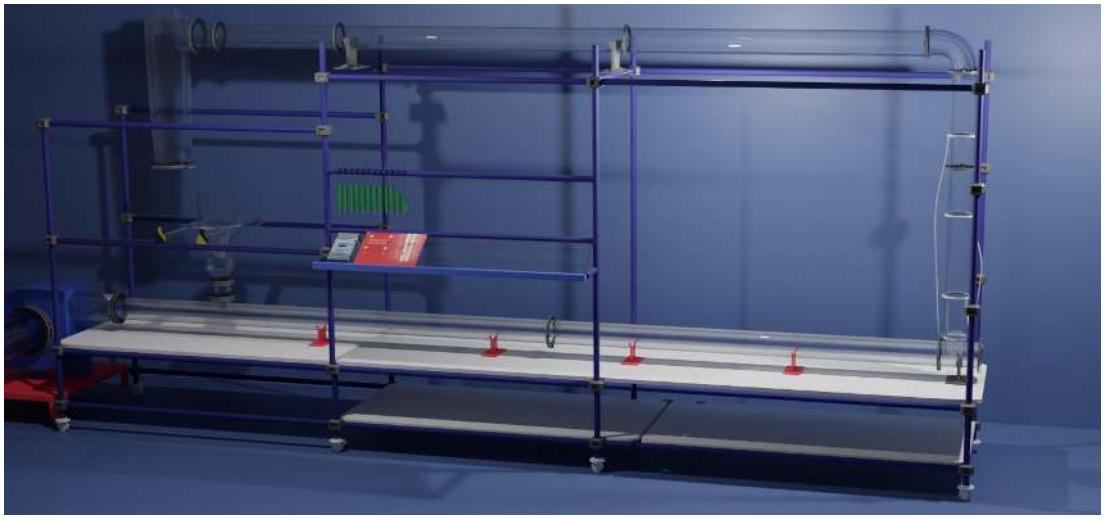
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Equipamentos utilizados

O estudo foi realizado em uma unidade piloto de transporte pneumático, em acrílico, denominada Transportador Pneumático, projetada e montada para fins experimentais no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília (UNISANTA), como identificado pela Figura 2. O equipamento é composto por um ventilador centrífugo acionado por motor com rotação variável, direcionador de fluxo, tubos de Pitot, alimentador rotativo, manômetros de tubo inclinado, anéis piezométricos instalados nos dutos horizontal e vertical, coletor de partículas e ciclone.

A configuração da unidade apresenta características semelhantes às descritas por Moraes (2012), que aborda o uso de uma instalação piloto para a investigação do transporte pneumático de partículas em fase diluída, incluindo a avaliação de parâmetros de pressão e escoamento.

Figura 2: Unidade piloto de transporte pneumático da Universidade Santa Cecília



3.2 Procedimento experimental

Inicialmente, foram verificadas as condições de funcionamento do equipamento e dos instrumentos de medição. Os ensaios foram realizados em diferentes frequências do inversor, iniciando-se em 35 Hz e avançando em incrementos de 2 Hz até a frequência máxima de 53 Hz.

Para cada frequência estabelecida, foram realizadas medições com o sistema operando inicialmente apenas com ar. A velocidade do ar foi determinada com o auxílio de um

ISSN 2317-1316

anemômetro, enquanto a pressão estática foi obtida por meio do banco de piezômetros conectado aos anéis piezométricos instalados nos dutos horizontal e vertical.

Após as medições com ar, grãos de milho foram introduzidos no sistema para avaliar o comportamento do escoamento na presença de partículas sólidas. Mantendo-se a frequência do inversor, variou-se a rotação angular da carambola do alimentador rotativo em 70°, 80°, 90°, 100° e 110°. O procedimento foi repetido para as demais frequências avaliadas, permitindo comparar as condições de operação com ar e com a mistura de ar e milho.

As medições foram realizadas em triplicata para cada condição experimental, de modo a avaliar a repetibilidade dos resultados. Posteriormente, os dados foram organizados de acordo com a frequência do inversor, a rotação angular da carambola e a condição de escoamento.

3.3 Tratamento dos dados

Os dados experimentais foram utilizados para avaliar a variação da velocidade do ar, da pressão estática e das perdas de carga nas diferentes condições operacionais. Inicialmente, foram elaborados gráficos relacionando as leituras das tomadas de pressão à frequência do inversor, considerando as diferentes rotações angulares do alimentador rotativo. Essa representação permitiu comparar as quedas de pressão observadas nos pontos de medição analisados.

As equações foram utilizadas com base na metodologia apresentada por Moraes (2012) e utilizadas para calcular as perdas de carga, o número de Reynolds, o fator de atrito e o coeficiente de perda localizada.

O banco de piezômetros fornece leituras expressas em altura de coluna de água. Para converter essa grandeza em pressão, utilizou-se a Equação (1):

$$P(Pa) = h(m) \times \frac{101325\ (Pa)}{10{,}33\ (mca)} \quad (1)$$

Com os valores de pressão obtidos, foram determinadas as diferenças de pressão entre os pontos de medição (entre as tomadas 4 e 6 para o trecho horizontal e entre as tomadas 6 e 8 para o trecho do acessório curva), utilizadas na avaliação das perdas de carga distribuídas e localizadas. A análise foi complementada pela elaboração de gráficos relacionando os

ISSN 2317-1316

parâmetros estudados ao número de Reynolds, com o objetivo de investigar a influência das condições de escoamento sobre a dissipação de energia na tubulação e na curva de 45°.

A partir das diferenças de pressão obtidas entre os pontos de medição, foram calculadas as perdas de carga do escoamento. Para isso, utilizou-se a relação entre a diferença de pressão e o peso específico do fluido, conforme a Equação (2):

$$hf(m) = \frac{\Delta P(Pa)}{\gamma\left(\frac{N}{m^3}\right)} \tag{2}$$

Para o cálculo do número de Reynolds, utilizou-se a equação (3):

$$Re = \frac{D(m)\times v\left(\frac{m}{s}\right)\times \rho\left(\frac{kg}{m^3}\right)}{\mu(Pa.s)} \tag{3}$$

Para analisar as perdas de carga distribuídas, foi utilizada a equação de Darcy-Weisbach, rearranjada para determinar o fator de atrito, conforme a Equação (4):

$$f = hf(m) \times \frac{D(m)\times 2\times g\left(\frac{m}{s^2}\right)}{L(m)\times\left[v\left(\frac{m}{s}\right)\right]^2} \tag{4}$$

O fator de atrito foi relacionado ao número de Reynolds por meio de gráficos, permitindo avaliar o comportamento da resistência ao escoamento nas diferentes condições experimentais.

Para a análise da perda de carga localizada, foi considerado o coeficiente de perda localizada (K) associado à curva de 45°. Esse coeficiente foi determinado a partir da relação entre a perda de carga localizada no acessório e a energia cinética do escoamento, conforme a Equação (5):

$$K = hf(m) \times \frac{2\times g\left(\frac{m}{s^2}\right)}{\left[v\left(\frac{m}{s}\right)\right]^2} \tag{5}$$

Por fim, foram elaborados gráficos do coeficiente de perda localizada em função do número de Reynolds, a fim de avaliar a variação da resistência imposta pela curva ao escoamento. A análise conjunta dos resultados permitiu comparar as perdas de carga distribuídas e localizadas nas diferentes condições operacionais investigadas.

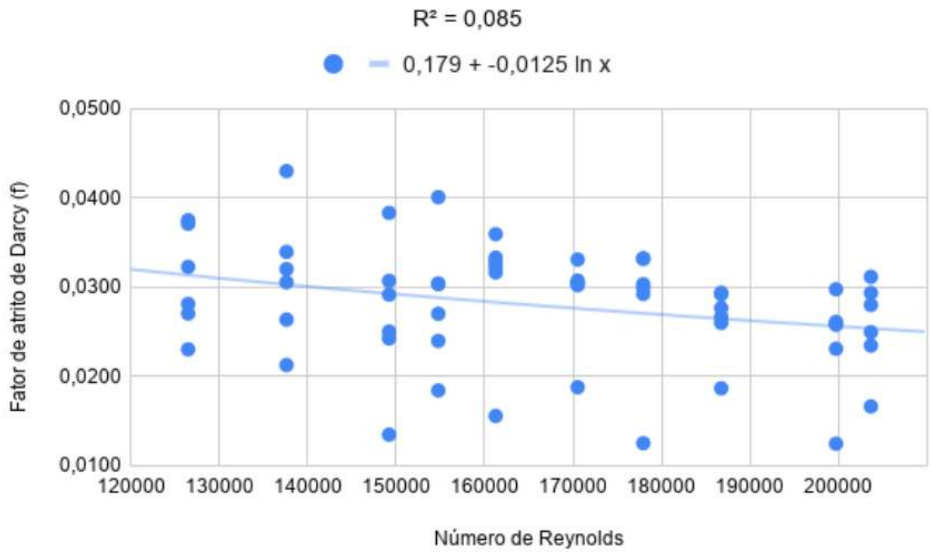
ISSN 2317-1316

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios experimentais do transporte pneumático de milho foram conduzidos em triplicata, variando a frequência do inversor de 35 a 53 Hz, o que resultou em velocidades do ar na saída entre 16,31 m/s e 26,25 m/s. Os números de Reynolds obtidos (entre $1,26 \times 10^5$ e $2,04 \times 10^5$) caracterizam um regime de escoamento plenamente turbulento. Inicialmente, o ensaio de referência com escoamento monofásico (somente ar, 0 kg/h de vazão de sólido) apresentou um fator de atrito de Darcy (f) médio de 0,0171. Com a introdução da fase sólida, o atrito no trecho horizontal elevou-se expressivamente para patamares médios entre 0,0290 e 0,0315, demonstrando o acréscimo de resistência imposto pelas colisões e reentraçamento dos grãos.

Abaixo, o Gráfico 1 ilustra o comportamento consolidado do fator de atrito de Darcy (f) em função do número de Reynolds (Re) para o escoamento horizontal.

Gráfico 1 – Curva do fator de atrito em função do número de Reynolds.



Conforme evidenciado no Gráfico 1, os pontos que indicam a presença de milho (valores de f entre 0,0231 e 0,043) deslocam-se consistentemente para valores superiores de f em relação ao ar puro (valores de f entre 0,0125 e 0,0230). Observa-se justamente uma dispersão acentuada dos pontos experimentais nas condições com sólidos atingindo o pico de f em 0,043. Esse comportamento decorre da natureza flutuante e oscilatória do escoamento gás-sólido em duto

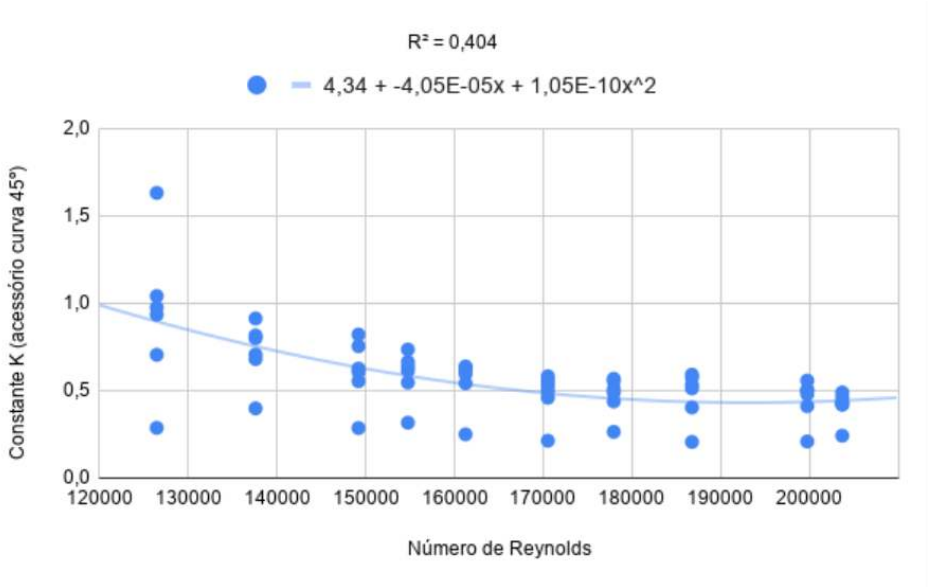
ISSN 2317-1316

horizontal, onde a distribuição irregular dos grãos gera variações instantâneas no gradiente de pressão.

Além das perdas distribuídas, avaliou-se o impacto das singularidades geométricas através do coeficiente de perda localizada (K) na curva de 45°. Enquanto na condição de ar isolado o coeficiente K apresentou média de 0,267, a inserção do fluxo de milho elevou as médias para valores entre 0,583 e 0,687, dobrando efetivamente a resistência hidráulica da curva.

O Gráfico 2 apresenta a variação do coeficiente de perda localizada (K) em função do número de Reynolds (Re) na curva do sistema.

Gráfico 2 – Curva da constante K em função do número de Reynolds.



A análise do Gráfico 2 demonstra que, em baixas velocidades, o impacto inercial dos grãos de milho contra o extradorso da curva gera picos severos de K, alcançando até 1,63 na maior vazão testada. Como os sólidos possuem inércia superior à fase gasosa, eles não acompanham instantaneamente a mudança de direção, resultando em perdas de carga por colisão inelástica significativas. Do ponto de vista da Engenharia Química e de projetos industriais, tais resultados indicam que o dimensionamento de sistemas de transporte pneumático para longas distâncias deve rigorosamente ponderar as perdas por singularidades, visto que o consumo energético associado às curvas pode ser o fator limitante da viabilidade operacional frente ao transporte rodoviário convencional.

ISSN 2317-1316

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que as condições operacionais e a presença de milho influenciam diretamente as perdas de carga no transporte pneumático. A introdução dos grãos elevou o fator de atrito de Darcy médio de 0,0171 para valores entre 0,0290 e 0,0315 no trecho horizontal, enquanto o coeficiente de perda localizada médio na curva de 45° aumentou de 0,267 para valores entre 0,583 e 0,687, evidenciando o acréscimo da resistência ao escoamento. Os resultados reforçam a importância de considerar as perdas distribuídas e localizadas no dimensionamento desses sistemas. Agradecemos aos professores orientadores e ao técnico de laboratório Volnei pelo apoio, pelas orientações e pela contribuição para a realização deste trabalho. Para estudos futuros, sugere-se investigar outras condições operacionais, diferentes vazões de sólidos e geometrias de tubulação, visando ampliar a compreensão das perdas de carga e contribuir para o aprimoramento dos sistemas de transporte pneumático.

6. DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Durante a elaboração deste trabalho, utilizou-se a ferramenta Gemini e ChatGPT para auxiliar na melhoria de coesão e síntese textual. O conteúdo gerado foi revisado, editado e validado pelos autores, que assumem total responsabilidade pelo texto final.

7. REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Infraestrutura e Logística. Brasília, DF: MAPA, 2026.

BRASIL. Ministério dos Transportes. Plano Nacional de Logística 2050. Brasília, DF: Ministério dos Transportes, 2026.

BRIDLE, I.; WOODHEAD, S. R. Particle degradation in pneumatic conveyors: use of data from a pilot-sized test facility to predict degradation in an industrial conveyor. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, v. 216, n. 2, 2002.

CONAB (BRASIL - Companhia Nacional de Abastecimento). Anuário Agrologístico 2026. Brasília, DF: Conab, 2026.

ISSN 2317-1316

CONAB. Logística de escoamento dos produtos agropecuários no Brasil: estrangulamentos dos fluxos de exportação. Brasília, DF: Companhia Nacional de Abastecimento.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report. Chapter 10: Transport. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

KLINZING, G. E.; et al.; Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach. 2ed. London: Chapman & Hall. 1997, 624 p.

MARCUS, R. D., LEUNG L. S., KLINZING G. E., RIZK F.; Pneumatic conveying of solid. London: Chapman and Hall. 2010.

MILLS, D. Pneumatic conveying design guide. 2. ed. Oxford: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2004.

MORAES, M.S. et.al. Experimental quantification of the head loss coefficient K for fittings and semi-industrial pipe cross section solid concentration profile in pneumatic conveying of polypropylene pellets in dilute phase; 2017, Powder Technology.

MORAES, M.S.; Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída: Curvas de pressão e distribuição de partículas. Tese (Doutorado), Unicamp, Campinas, março de 2012.
PAN, R. Material properties and flow modes in pneumatic conveying. Powder Technology, v. 104, n. 2, p. 157–163, 1999.

SILVA, D.R.; Transporte Pneumático – Tecnologia, projetos e aplicações na indústria e nos serviços. Artliber, 2005.