



ESTUDO DA QUEDA DE PRESSÃO NO TEE DE ALIMENTAÇÃO EM UM SISTEMA DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE BIOMASSAS

THAIS L. C. GOMES^{1*}, GIOVANI A. LOURENÇO², RODOLFO J. BRANDÃO¹, CARLOS H. ATAÍDE¹, CLAUDIO R. DUARTE¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Faculdade de Engenharia Química

²Instituto Federal de Goiás, Departamento de Áreas Acadêmicas
*e-mail: logettothais@gmail.com

RESUMO - A queda de pressão em um sistema de alimentação contribui significativamente na perda de energia total em sistemas de transporte pneumático. Assim, uma boa previsão do seu valor é imprescindível para a redução de custos e esforços experimentais. Neste contexto, um sistema de alimentação foi projetado, específico para o controle da vazão de biomassas, em uma linha de transporte pneumático de pressão positiva, que possibilitou avaliar a queda de pressão em um Tee de alimentação. As biomassas utilizadas no estudo foram: milho moído (MMO), sabugo de milho (SMI), palha de milho (PMI), casca de arroz (CAR) e farelo de trigo (FTR). Estas foram caracterizadas quanto à sua densidade, tamanho, forma, ângulo de repouso e teor de umidade. Como condições experimentais, foram empregadas velocidades médias do ar de 12 a 20 m.s⁻¹ e velocidades de rotação da válvula de 7, 16 e 25 rpm. A partir dos resultados obtidos, foi proposta uma modificação do modelo empírico apresentado por Lourenço (2019), para a previsão da queda de pressão no Tee de alimentação, através da inserção de um fator de forma. Os valores preditos pela correlação modificada apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais, com desvio máximo inferior a 10%.

INTRODUÇÃO

O transporte pneumático é um processo em que materiais particulados a granel são deslocados ao longo de dutos horizontais e/ou verticais, empregando o ar como meio transportador. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada nas indústrias químicas, alimentícias, minerais, farmacêuticas, metalúrgicas, entre outras (Klinzing, 2018; Wang *et al.*, 2017; Klinzing *et al.*, 2010). Na agricultura e na pecuária, grandes quantidades de grãos e rações animais também podem ser manuseados e transportados pneumaticamente.

Existem várias razões para o transporte pneumático ser o método mais comum para o transporte de materiais em pó e granulados pelas indústrias, tais como: baixo custo de manutenção e operação, variabilidade de produtos transportados, alta flexibilidade de

projeto, facilidade de automação e controle (Klinzing *et al.*, 2010; Mills, 2016; Wang *et al.*, 2017), além dos diversos sistemas de alimentação de sólidos que podem ser empregados.

Dentre os diferentes tipos de alimentadores de materiais particulados consolidados na indústria, pode-se destacar a válvula rotativa, um dos dispositivos mais empregados na alimentação de materiais em linhas de transporte pneumático, tendo em vista o seu baixo custo, facilidade de construção e simplicidade de operação (Mills, 2016; Gundogdu, 2004).

Durante a alimentação de sólidos em uma linha de transporte pneumático, existe uma intensa transferência de quantidade de movimento no ponto de mistura entre as fases (gás-sólidos), em que o gás apresenta um perfil de velocidade estabelecido (ou quase estabelecido), ao passo que a fase particulada

possui uma baixa velocidade ou valores próximos de zero. A combinação dessa variação de quantidade de movimento com a elevada turbulência, inerente da região, provoca um aumento na perda de carga gerada pelo sistema, que, por conseguinte, elevam os custos de operação do equipamento. Assim, para que a operação de um alimentador conduza a um bom desempenho do sistema como um todo, sua especificação deve considerar as características do material e do sistema, permitir um bom controle de vazões, com distribuição uniforme e regular de sólidos, além de minimizar ao máximo o aumento da queda de pressão do equipamento (Lopes, 2011).

Para reduzir a perda de carga na região de alimentação, dispositivos de transição podem ser utilizados entre o alimentador e a tubulação de transporte. O Tee de alimentação, por exemplo, é amplamente utilizado como dispositivo de transição entre a válvula rotativa e a linha de transporte pneumático, sendo responsável pela mistura e dispersão das partículas na linha (Klinzing *et al.*, 2010; Kessel, 1985). Segundo Klinzing *et al.* (2010), o projeto do Tee de alimentação é um assunto ainda muito debatido e controverso.

Até hoje, apenas uma quantidade limitada de dados experimentais está disponível na literatura para o projeto de um dispositivo de transição eficiente. Como cada partícula apresenta um comportamento fluidodinâmico diferente no transporte gás-sólido, as correlações empíricas acabam atuando como recursos essenciais para a predição da queda de pressão nesses dispositivos.

A maioria dos estudos reportados na literatura associados ao manuseio de materiais particulados utilizam pós ou partículas que apresentam formatos regulares, com uma estreita faixa de distribuição de tamanho. Assim, existe uma carência de informações a respeito da alimentação e transporte de materiais que apresentam formatos irregulares e significativas diferenças em suas propriedades físicas, como é o caso da

biomassa. A natureza dessas partículas impõe dificuldades consideráveis na previsibilidade dos processos de alimentação e transporte (Dai *et al.*, 2012), principalmente em sistemas com pressão positiva, fazendo com que o dimensionamento dos transportadores pneumáticos passem por testes em unidades piloto, aumentando os custos de projeto.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a queda de pressão em um Tee de alimentação de um sistema de transporte pneumático de biomassas, e propor uma modificação do modelo empírico apresentado por Lourenço (2019) para a previsão desta queda de pressão, com o intuito de melhorar a sua previsibilidade quando aplicado a materiais de diferentes naturezas, como as biomassas.

MATERIAL E MÉTODOS

Aparato Experimental

Os experimentos foram conduzidos em uma unidade de transporte pneumático composta por um compressor radial duplo IBRAM de 10 CV, com vazão máxima de $7,6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, pressão de 6800 mmca e vácuo de 5800 mmca. A unidade foi confeccionada com tubos de acrílico cristal, com diâmetro interno (D) de 74 mm, apresentando três trechos horizontais com comprimentos de 2,5 m, 3,90 m e 9 m, dois trechos verticais de 1,5 m e quatro curvas em PVC com raio de curvatura (R) de 300 mm ($R/D = 4$), conforme a Figura 1.

De uma forma simplificada, para a realização de cada teste experimental, inicialmente as biomassas tinham suas massas aferidas com o auxílio de uma balança digital (URANO, 30 kg de capacidade e 5 g de precisão). Posteriormente, os materiais eram alimentados no silo de alimentação, transportados ao longo da linha, separados da fase gasosa através de um ciclone de alta eficiência *Stairmand* com diâmetro do corpo cilíndrico de 207 mm e, por fim, direcionados para um silo de recebimento de sólidos.

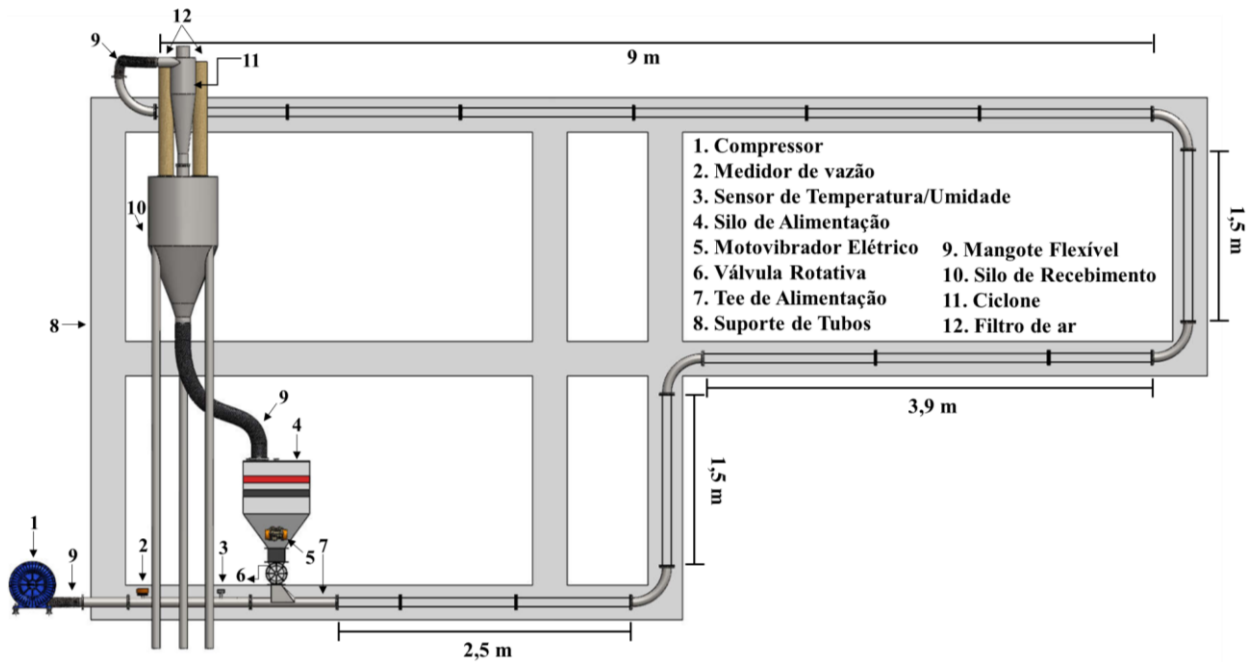


Figura 1: Aparato experimental do sistema de transporte pneumático.

Sistema de Alimentação de Sólidos

Conforme apresentado na Figura 2, o sistema de alimentação de sólidos é formado por um silo de 171 L e uma válvula rotativa com rotor de bolso profundo, composta por 8 pás do tipo extremidade aberta, que comporta um volume útil de sólido de 1,1 L. Para acoplar a válvula rotativa à linha de transporte pneumático, foi instalado um Tee de alimentação, projetado de acordo com Klinzing *et al.* (2010). Para auxiliar na homogeneidade

da alimentação, dois motorvibradores MVL de 75 FC (Força Centrífuga) foram instalados em lados opostos da região piramidal do silo. Todos os experimentos foram realizados com o silo fechado e com os motorvibradores a 3600 RPM.

Na tampa superior do silo e na carcaça da válvula rotativa havia janelas de visualização, feitas em acrílico, que permitiam o operador observar o processo de alimentação.

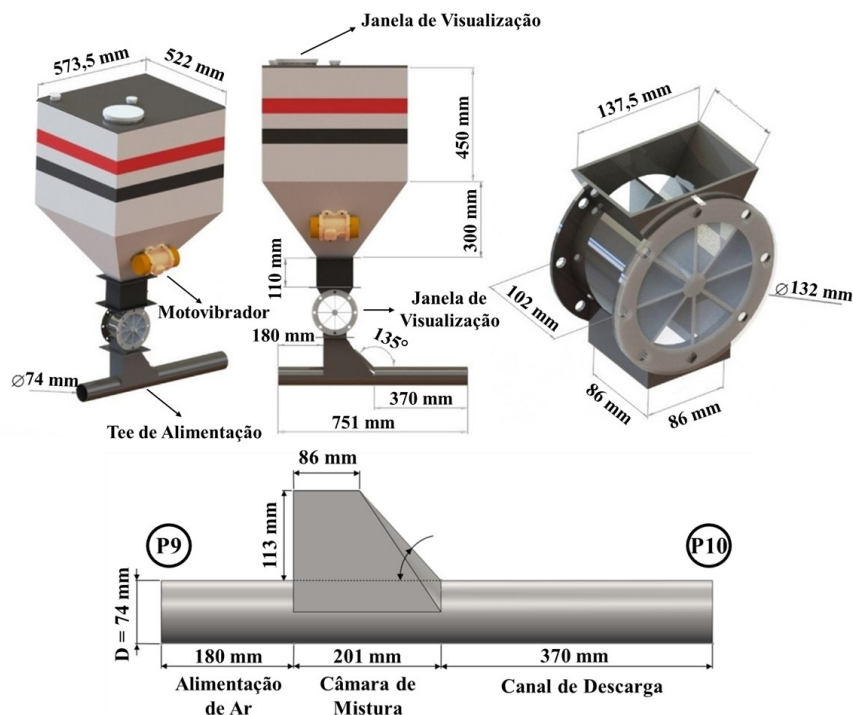


Figura 2: Sistema de alimentação com detalhes do projeto.

Aquisição de Dados e Controle do Sistema

O sistema de aquisição de dados e controle da unidade experimental foi realizado com o auxílio do dispositivo NI USB-6211 e do inversor de frequência vetorial WEG - CFW500D28P0T2DB20. A vazão volumétrica do ar foi aferida através de um medidor de vazão volumétrica tipo turbina em linha da Tecnofluid, modelo TVT 75, que enviava os dados para a placa de aquisição e, através do software supervisor LabVIEW, a vazão volumétrica era convertida em velocidade média, baseado na área da secção transversal da tubulação. O inversor de frequência era o elemento final responsável por controlar a rotação do motor do compressor e, conseqüentemente, a velocidade do ar na linha.

Dois transmissores de pressão diferencial da marca Cole-Parmer foram utilizados durante o estudo da queda de pressão no Tee de alimentação, um para medir a diferença de pressão entre os pontos P9 e P10 (Figura 2), com faixa de medição de 0 a 2491 Pa e precisão de 0,5%, e outro para medir a pressão de saída no Tee (P10), com faixa de medição de 0 a 6227 Pa e precisão de 0,4%. Para pressões de saída no Tee superiores a 6227 Pa, foi utilizado um sensor de pressão diferencial Freescale, modelo

Mpx5050DP, com faixa de leitura de 0 a 50000 Pa e precisão de 2,5%.

Vale ressaltar que, antes da realização dos testes experimentais, os transmissores de pressão passavam por um processo de calibração para garantir uma maior precisão nas medidas realizadas.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram coletados através do transmissor RHT-DM da NOVUS, para que fosse possível determinar a densidade média do gás em cada experimento realizado.

Caracterização das Biomassas

As biomassas utilizadas no presente trabalho para a realização dos testes experimentais foram: o milho moído (MMO), sabugo de milho (SMI), palha de milho (PMI), casca de arroz (CAR) e o farelo de trigo (FTR), conforme apresentado na Figura 3. A palha e o sabugo de milho foram fornecidos pela empresa JC Rações e Insumos Siderúrgicos LTD da cidade de Uberlândia, já processados. O milho e a casca de arroz foram submetidos ao processo de moagem, de forma a evitar o travamento da válvula rotativa. Já o farelo de trigo, foi utilizado conforme fornecido comercialmente, sem processamentos adicionais.



Figura 3: Biomassas empregadas no estudo.

Estes materiais foram inicialmente submetidos a um processo de caracterização para a determinação das seguintes propriedades físicas: distribuição de tamanho de partículas, densidade bulk aerada e compactada, índice de Hausner, densidade aparente, densidade real, ângulo de repouso estático, teor de umidade em

base seca e esfericidade. É importante ressaltar que todos os processos de caracterização foram realizados em triplicata.

Distribuição de tamanho de partículas: O diâmetro médio das partículas de cada material foi representado pelo diâmetro médio de Sauter (d_s), que foi obtido através da técnica de

peneiramento. Para isso, foi utilizado o sistema vibratório AS 300 control da Retsch, com peneiras padrão Tyler de 12" em aço inoxidável de alta liga (ASTM E11), por um tempo de 20 minutos.

Densidades bulk, aparente e real: A densidade bulk aerada (ρ_{ba}) foi medida utilizando uma proveta de vidro de 250 mL. Com o auxílio de um funil, a biomassa foi acomodada no recipiente sob a ação da gravidade, sem que houvesse qualquer tipo de perturbação. Com isso, a densidade bulk aerada pôde ser calculada pela razão entre a massa e o volume ocupado pelas partículas. Para a determinação da densidade bulk compactada (ρ_{bc}), a proveta foi deixada cair sob a ação de sua própria massa, para que houvesse a compactação das partículas. Este procedimento foi repetido várias vezes até que o volume de material não fosse mais alterado com número de batidas.

Para avaliar a fluidez e compressibilidade dos materiais, foi calculado o índice de Hausner (HR) através da razão entre a densidade bulk compactada e a densidade bulk aerada.

A densidade aparente ou densidade do sólido (ρ_s) foi obtida pela técnica de picnometria líquida utilizando éter de petróleo puro, enquanto a densidade real (ρ_{real}) foi medida em um picnômetro a gás (He) do modelo Micromeritics Accupyc 1330 (Cardoso *et al.*, 2013).

Umidade em base seca: Para a determinação da umidade, o material foi colocado em estufa a 105°C até atingir massa constante (ISO 18134). A razão entre a massa de água evaporada da amostra e a massa final do sólido seco resultou no teor de umidade em base seca, U_{bs} .

Ângulo de repouso: Para a determinação do ângulo de repouso (α), o material particulado foi despejado sobre uma superfície plana com auxílio de um funil. Para facilitar o escoamento dos materiais e minimizar o efeito de parede, foi utilizado um funil com diâmetro interno de saída de 2 cm, o qual foi disposto a uma distância de 15 cm em relação à base da superfície plana. Após o despejamento dos materiais, o diâmetro e a altura do monte formado foram medidos e o ângulo de repouso foi calculado a partir da Equação 1:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{H}{R} \right) \quad (1)$$

sendo: H a altura e R o raio do monte formado após o escoamento dos materiais (Lam *et al.*, 2008).

Fator de forma: Para caracterizar a forma das partículas, foi utilizado o conceito de esfericidade (ψ), a qual foi medida por análise dinâmica de imagem no equipamento Camsizer L, da marca Retsch, segundo procedimento descrito pela norma ISO 13322-2/2006. A esfericidade é calculada de acordo com a Equação 2.

$$\psi = \frac{4\pi A}{P^2} \quad (2)$$

Sendo: P o perímetro ou circunferência medida a partir da projeção da partícula e A a área de cobertura dessa projeção.

Avaliação da Queda de Pressão no Tee de Alimentação

Para a realização dos experimentos, o silo de alimentação foi inicialmente preenchido com uma massa pré-estabelecida de material e, em seguida, fechado para garantir a equalização da pressão entre o silo e a linha de transporte, evitando os efeitos de refluxo. Então, o sistema de aquisição de dados foi ativado e a velocidade média do ar desejada foi ajustada para o início da circulação do gás na tubulação. Atingida a velocidade média do ar, a válvula rotativa era acionada na rotação escolhida e o cronômetro disparado a partir do momento que o primeiro compartimento da válvula despejava sólidos na linha. Ao mesmo tempo, o sistema de aquisição coletava os dados de pressão (P9 e P10) através dos sensores instalados no Tee de alimentação. Parava-se o cronômetro exatamente quando as últimas partículas do silo eram alimentadas ao sistema de transporte. A taxa mássica de sólidos foi determinada pela razão entre a massa previamente conhecida de material no silo e o tempo gasto para que a válvula alimentasse todo o material na linha, conforme a Equação 3. É importante ressaltar que não houve perdas de materiais para o ambiente no overflow do ciclone.

$$\dot{m}_s = \frac{m}{t} \quad (3)$$

Como condições operacionais adotadas, o silo de alimentação foi preenchido com cada biomassa até uma altura de 0,3 m, a velocidade do ar foi variada de 12 a 20 m/s e a velocidade de rotação da válvula foi ajustada para 7, 16 e 25 rpm, tendo como referência o trabalho de Lourenço *et al.* (2019).

Correlação Empírica para a Previsão da Queda de Pressão no Tee de Alimentação

A literatura apresenta algumas correlações empíricas para a predição da queda de pressão em sistemas gás-sólido, como em ciclones, leitos fluidizados e de jorro, sistemas de transporte pneumático, entre outros (Ogawa, 1984; Barth, 1958; Szikszay, 1988; Weber, 1991; Barbosa e Pinho, 2006).

Os ciclones, por exemplo, apresentam expressões bem estabelecidas para previsão da queda de pressão, como pode ser observado na Equação 4, apresentada por Ogawa (1984):

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (4)$$

sendo: ζ o coeficiente de queda de pressão, que pode ser determinado a partir das dimensões do equipamento, conforme reportado no trabalho de Shepherd e Lapple (1939).

Já em sistemas de transporte pneumático, Barth (1958) propôs um modelo para estimar a queda de pressão total em condições de transporte em fase diluída, baseado nas contribuições individuais das quedas de pressão do ar e dos sólidos, independente da direção do escoamento, conforme mostrado na Equação 5. É perceptível que este modelo é fortemente baseado na teoria de escoamento monofásico do fluido, com a inclusão dos termos de carga e fator de atrito de sólidos.

$$\Delta P_t = \Delta P_f + \Delta P_s = \left(\lambda_f + \phi \lambda_s \right) \frac{\rho_f v_f^2 L}{2D} \quad (5)$$

O atrito entre os sólidos e a parede do tubo é um importante fator a ser avaliado. Este depende das características das partículas sólidas, material da tubulação, velocidade do fluido e da carga de sólidos (Szikszay, 1988). Em uma metodologia simples e alternativa, Szikszay (1988) e Weber (1991) consideraram

um único fator de atrito (fator de atrito total, λ_t) para representar a queda de pressão do fluxo gás-sólido, como apresentado na Equação 6.

$$\Delta P_t = \lambda_t \frac{\rho_f v_f^2 L}{2D} \quad (6)$$

O fator de atrito total pode ser escrito como uma simples função de parâmetros adimensionais associados às propriedades das partículas e do fluido, dimensões da tubulação e condições operacionais. No trabalho de Szikszay (1988) os seguintes adimensionais foram abordados, Equação 7, quando avaliado um sistema de transporte pneumático horizontal em fase diluída:

$$\lambda_t = a \phi^b Fr^c \left(\frac{d_s}{D} \right)^d \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^e \quad (7)$$

Tendo em vista que o Tee de alimentação é um dispositivo de mistura gás-sólido que contribui significativamente para a queda de pressão na linha de transporte pneumático, Lourenço (2019) propôs uma correlação empírica para a predição da queda de pressão neste dispositivo, Equação 8, utilizando como materiais a serragem de MDF, finos de bagaço de cana de açúcar e grãos de malte pilsen.

$$\Delta P = \left(\frac{d_s}{D} \right)^{-0,1754} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^{-0,0569} (\phi)^{0,6995} \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (8)$$

Neste trabalho, foi proposto uma modificação da correlação apresentada por Lourenço (2019), através da inserção do parâmetro esfericidade no termo d_s/D , conforme apresentado na Equação 9, com o intuito de melhorar a previsibilidade da correlação, uma vez que as partículas de biomassa são irregulares.

$$\Delta P = \left(\frac{d_s \psi}{D} \right)^a \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^b (\phi)^c \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (9)$$

Os parâmetros a, b e c da Equação 6 foram determinados através da regressão não linear dos dados experimentais de queda de pressão no Tee para as cinco biomassas estudadas, com auxílio do *software* Statistica[®] 7.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização das Biomassas

A partir dos resultados obtidos do processo de peneiramento, modelos de distribuição granulométrica a 2 parâmetros foram ajustados para cada material avaliado. De acordo com o coeficiente de correlação (R^2), o modelo de distribuição Rosin-Rammler-Bennet (RRB) foi aquele que melhor representou a distribuição de tamanho das partículas para os cinco materiais. Na Tabela 1 são apresentados os valores dos parâmetros ajustados para cada biomassa e seus respectivos coeficientes de correlação.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de todas as propriedades avaliadas para

cada material, com os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 1: Parâmetros do modelo RRB de distribuição granulométrica.

Material	R^2	Parâmetros
MMO	0,9932	$d_{63,2} = 1,39$ mm $n = 1,72$
SMI	0,9980	$d_{63,2} = 1,21$ mm $n = 1,81$
PMI	0,9998	$d_{63,2} = 1,56$ mm $n = 1,36$
CAR	0,9921	$d_{63,2} = 0,85$ mm $n = 3,73$
FTR	0,9878	$d_{63,2} = 0,59$ mm $n = 1,60$

Tabela 2: Propriedades das biomassas.

Material	Grupo Geldart	ρ_{ba} (kg/m ³)	ρ_{bc} (kg/m ³)	ρ_s (kg/m ³)	ρ_{real} (kg/m ³)	d_s (μ m)	U_{bs} (%)	α (°)	HR (-)	ψ (-)
MMO	B	645 ± 9	858 ± 7	1092 ± 8	1457 ± 3	696 ± 26	11,28 ± 0,14	36 ± 2	1,33 ± 0,03	0,78 ± 0,04
SMI	B	252 ± 3	307 ± 5	865 ± 15	1369 ± 10	650 ± 25	9,56 ± 0,08	34 ± 2	1,22 ± 0,01	0,65 ± 0,03
PMI	B	144 ± 5	187 ± 5	738 ± 18	1249 ± 16	653 ± 34	10,02 ± 0,26	35 ± 2	1,30 ± 0,01	0,33 ± 0,02
CAR	B	257 ± 3	356 ± 3	918 ± 8	1500 ± 5	559 ± 46	8,54 ± 0,23	32 ± 1	1,38 ± 0,02	0,34 ± 0,05
FTR	B	318 ± 4	455 ± 3	1069 ± 3	1392 ± 5	339 ± 18	12,68 ± 0,21	41 ± 1	1,43 ± 0,02	0,62 ± 0,03

Correlação Empírica para a Previsão da Queda de Pressão no Tee de Alimentação

Na Figura 4 são apresentados os gráficos da queda de pressão no Tee em função da velocidade do ar para diferentes taxas mássicas de sólidos de cada biomassa. Nota-se que, para todos os materiais avaliados, o aumento da velocidade de rotação da válvula e, conseqüentemente, da vazão mássica de sólidos, proporcionou o aumento da queda de pressão no Tee de alimentação. Isso se deve ao

fato de que a elevação da quantidade de sólidos na linha impõe uma certa dificuldade para a passagem do ar transportador, que a depender da sua velocidade, provoca o acúmulo de material na saída do Tee, gerando uma região de turbilhonamento e o aumento da perda de carga. Da mesma forma, o aumento da velocidade do ar aumenta o processo de interação entre as fases fluida e sólida, provocando um maior atrito partícula-partícula e partícula-parede, justificando assim o aumento da queda de pressão.

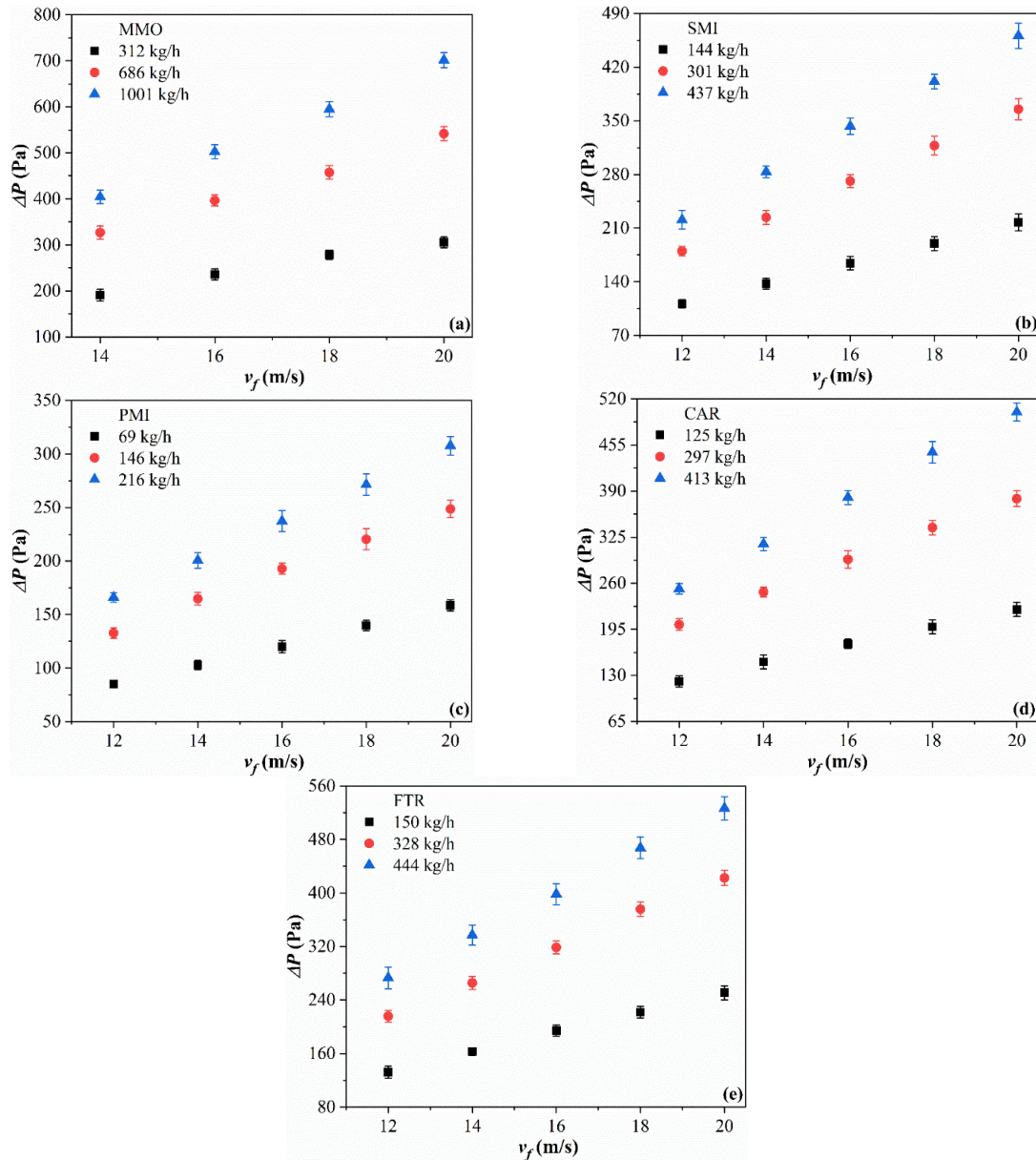


Figura 4: Variação da queda de pressão no Tee com a velocidade do ar para diferentes taxas mássicas de sólidos, considerando o MMO (a), SMI (b), PMI (c), CAR (d) e FTR (e)

Segundo a correlação proposta por Lourenço (2019), Equação 8, a queda de pressão no Tee de alimentação depende da sua geometria, velocidade do ar, propriedades do material transportado e da carga de sólidos. Tendo em vista que no seu trabalho os materiais empregados apresentavam formas mais regulares, através da utilização de pós e grãos, e que as partículas de biomassa empregadas neste estudo apresentavam uma maior irregularidade em sua forma e maior diversidade em suas propriedades físicas, a correlação sugerida pelo autor proporcionou valores de desvios altos para alguns materiais empregados neste estudo, principalmente para a palha e o milho moído. O desvio máximo dos valores preditos em relação aos experimentais foi de 17,14% e os desvios

médios foram de 9,36%, 3,99%, 7,67%, 3,28%, 4,17% para o milho moído, sabugo de milho, palha de milho, casca de arroz e o farelo de trigo, respectivamente.

Assim, neste trabalho foi proposto uma modificação na correlação de Lourenço (2019), através da inserção do parâmetro esfericidade, conforme foi apresentado pela Equação 9, para melhorar a sua previsibilidade. A partir da regressão não linear de um conjunto de 72 dados experimentais, adotando-se um nível de significância de 5%, foi possível obter os parâmetros da equação, Tabela 3, com coeficiente de determinação de 99,18%.

A correlação modificada completa para previsão da queda de pressão no Tee com a

utilização de biomassas é representada pela Equação 10.

Tabela 3: Parâmetros da correlação modificada para previsão da queda de pressão no Tee.

Parâmetros	p-valor
a = -0,2240	0,0118
b = -0,0957	0,0098
c = 0,6520	0,0100

$$\Delta P = \left(\frac{d_s \psi}{D} \right)^{-0,2240} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} \right)^{-0,0957} (\phi)^{0,6520} \frac{\rho_f v_f^2}{2} \quad (10)$$

Os resultados preditos pela Equação 10 foram comparados aos resultados experimentais, conforme mostrado na Figura 5. Nota-se que a correlação proposta pôde prever de forma satisfatória os dados experimentais, apresentando um desvio máximo inferior a 10%. Nas Figuras 6 a 9 são apresentados os gráficos comparativos entre os dados experimentais e os preditos da queda de pressão no Tee em função da velocidade do ar, para as três taxas mássicas de cada biomassa. De forma

geral, a correlação proposta apresentou uma boa concordância com os dados experimentais, com desvios médios de 3,15%, 3,99%, 3,34%, 2,54%, 3,80% para o milho moído, sabugo de milho, palha de milho, casca de arroz e o farelo de trigo, respectivamente. Dessa forma, é possível afirmar que a inclusão de um fator de forma melhorou significativamente a previsibilidade da correlação.

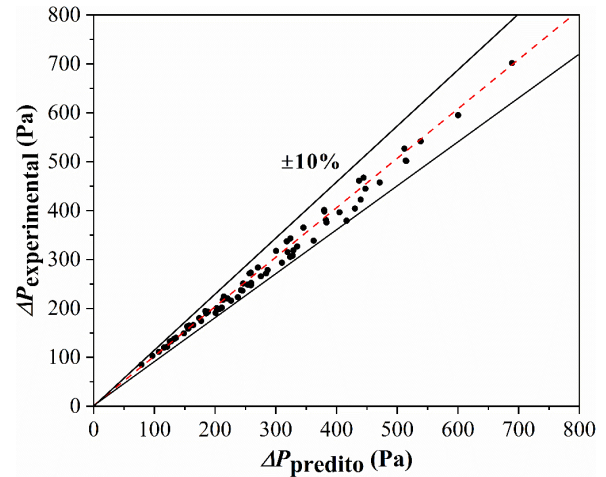


Figura 5: Comparação entre os valores experimentais e os preditos pela correlação modificada para a queda de pressão no Tee.

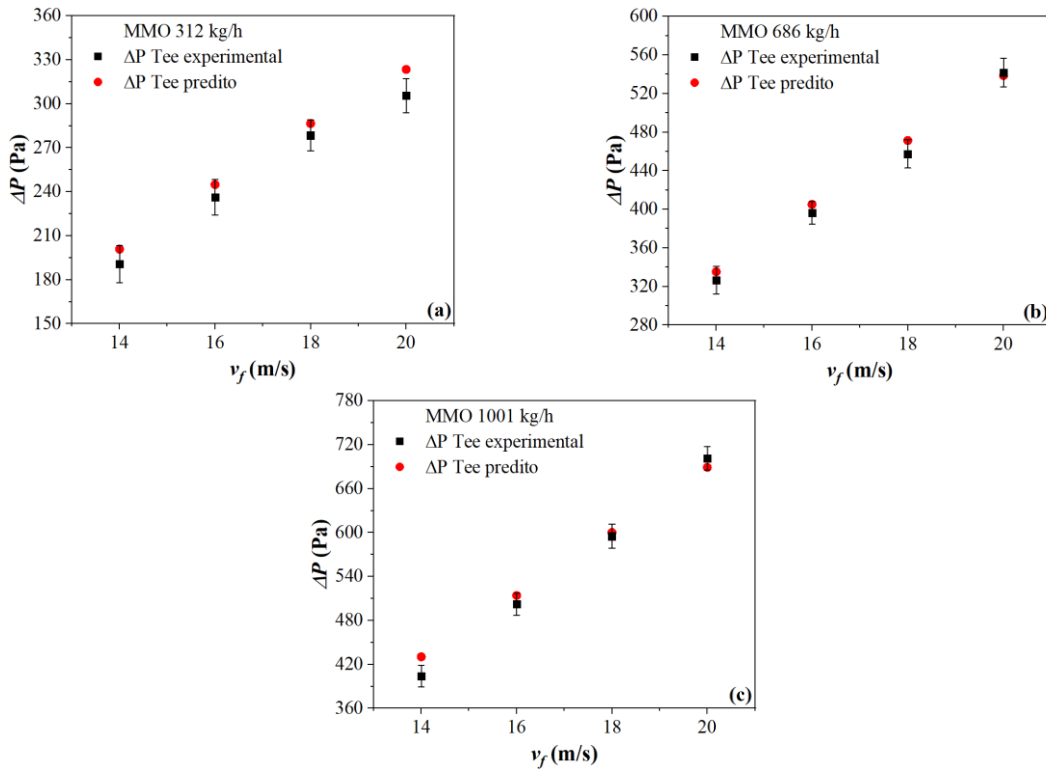


Figura 6: Comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pela correlação modificada para a queda de pressão no Tee, considerando o MMO a uma taxa mássica de sólidos de 312 kg/h (a), 686 kg/h (b) e 1001 kg/h (c).

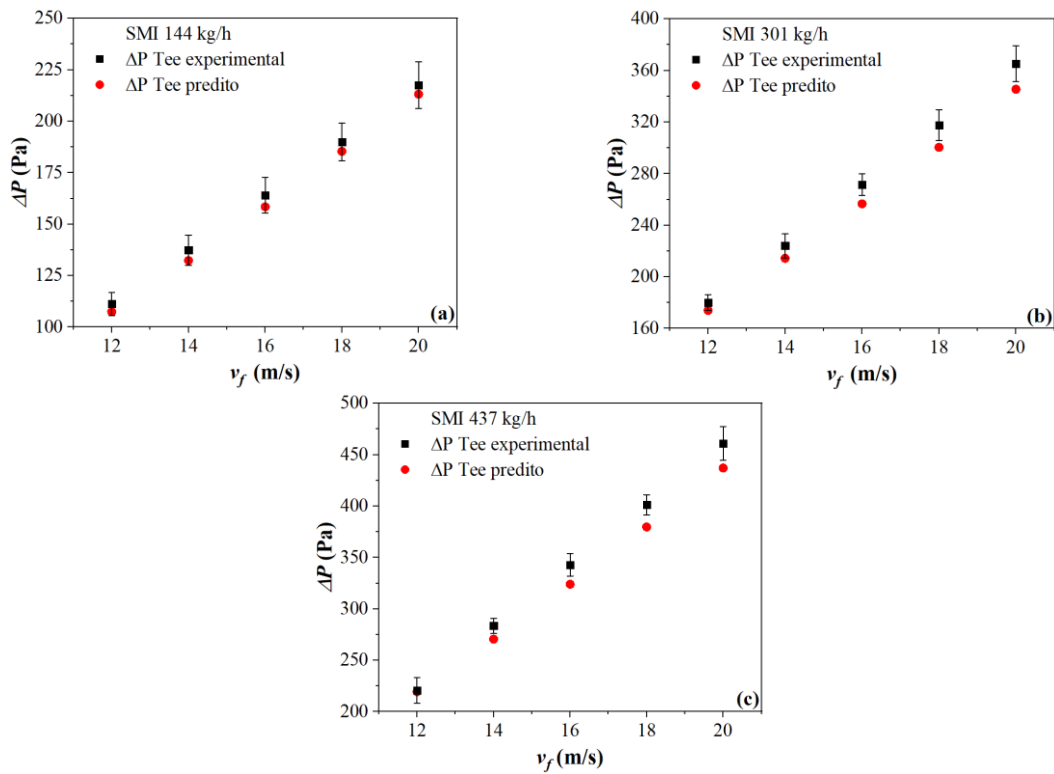


Figura 7: Comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pela correlação modificada para a queda de pressão no Tee, considerando o SMI a uma taxa mássica de sólidos de 144 kg/h (a), 301 kg/h (b) e 437 kg/h (c).

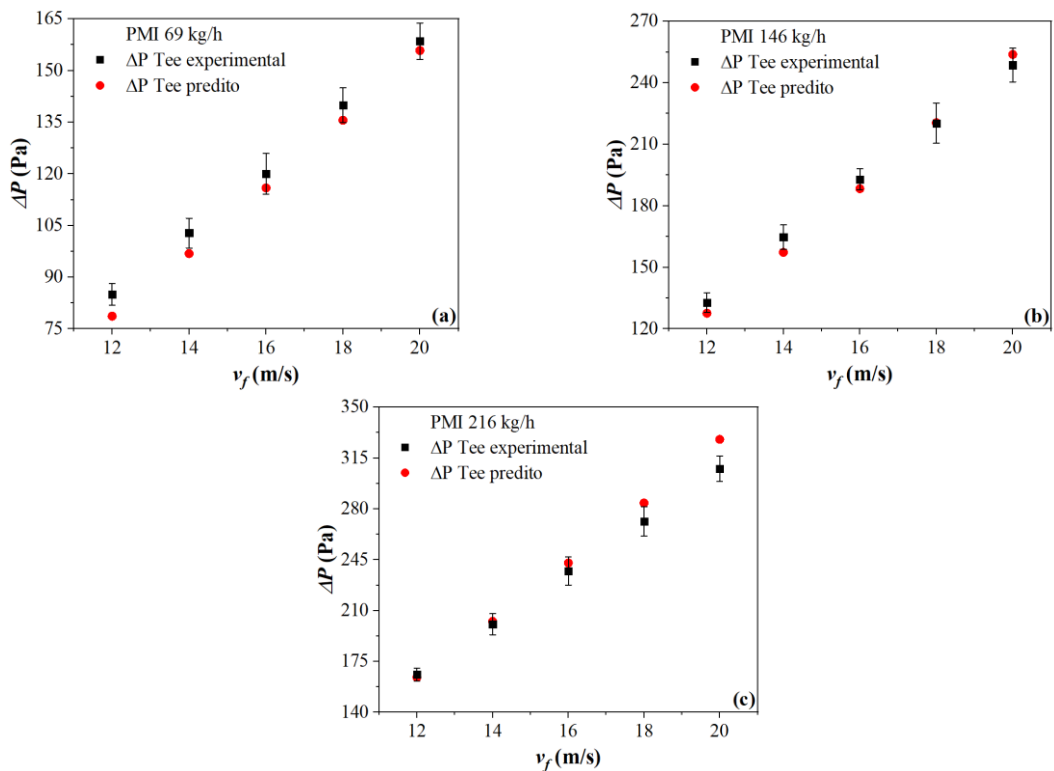


Figura 8: Comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pela correlação modificada para a queda de pressão no Tee, considerando a PMI a uma taxa mássica de sólidos de 69 kg/h (a), 146 kg/h (b) e 216 kg/h (c).

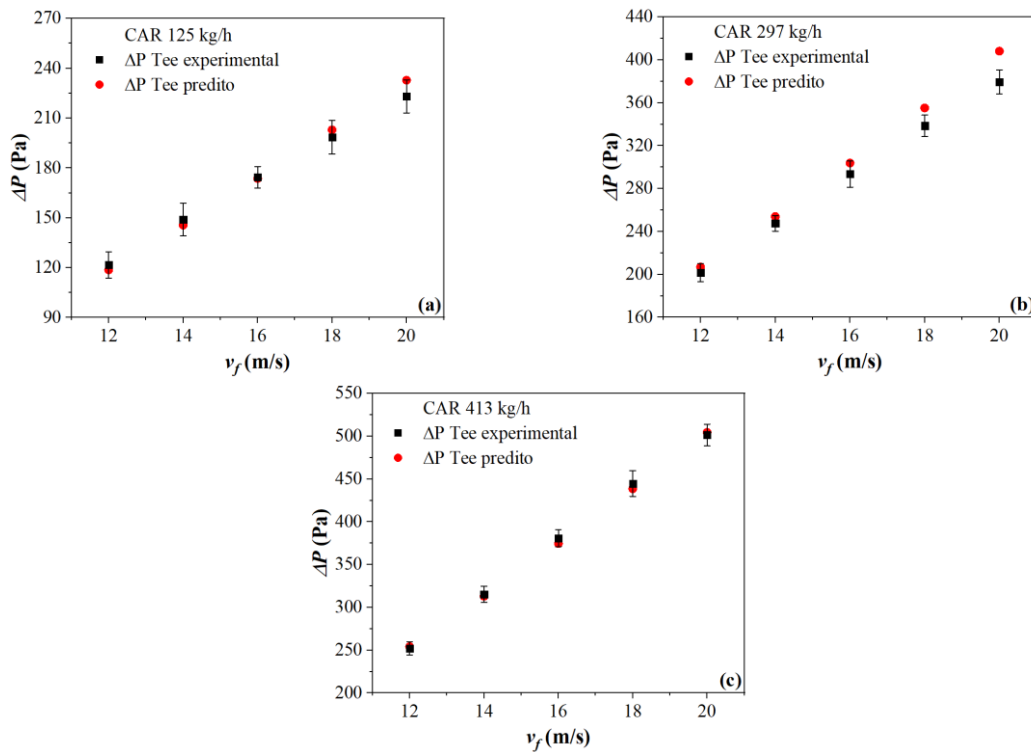


Figura 9: Comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pela correlação modificada para a queda de pressão no Tee, considerando a CAR a uma taxa mássica de sólidos de 125 kg/h (a), 297 kg/h (b) e 413 kg/h (c).

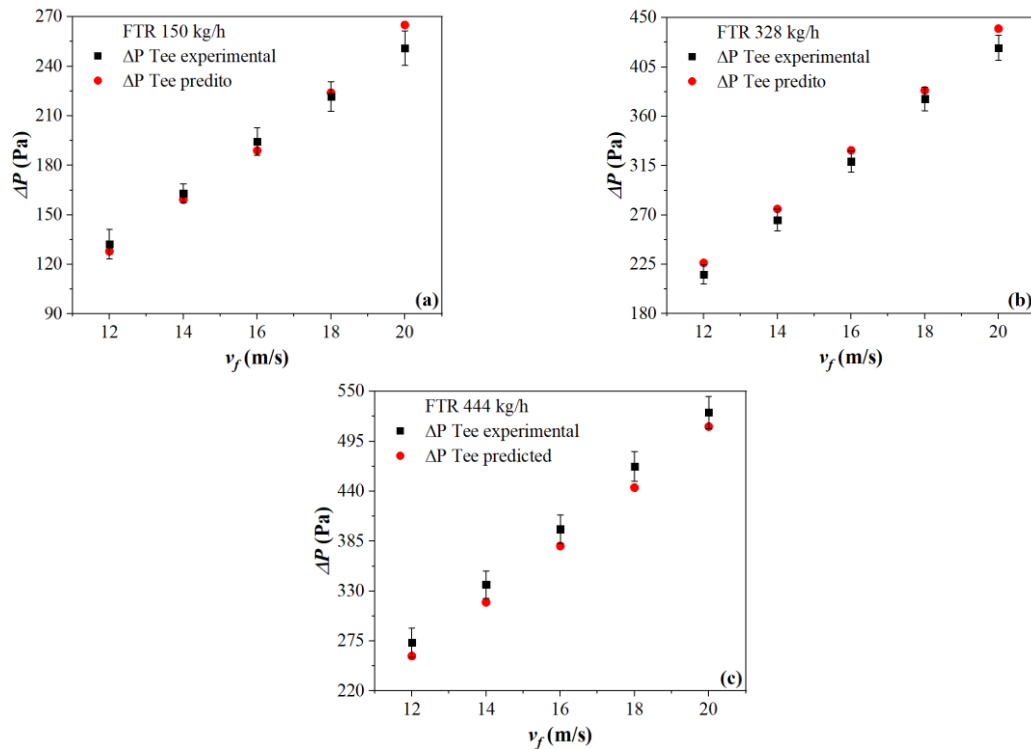


Figura 10: Comparação entre os dados experimentais e os valores preditos pela correlação modificada para a queda de pressão no Tee, considerando o FTR a uma taxa mássica de sólidos de 150 kg/h (a), 328 kg/h (b) e 444 kg/h (c).

CONCLUSÃO

A partir do estudo da queda de pressão no Tee de alimentação, foi possível concluir que,

para todos os materiais avaliados, o aumento da velocidade de rotação da válvula rotativa e da velocidade do ar transportador proporcionaram o aumento da queda de pressão no dispositivo.

Além disso, a proposta de modificação da correlação empírica sugerida por Lourenço (2019), para a predição da queda de pressão no Tee, apresentou uma boa concordância com os dados experimentais, com desvio máximo inferior a 10% e desvios médios de 3,15%, 3,99%, 3,34%, 2,54%, 3,80% para o milho moído, sabugo de milho, palha de milho, casca de arroz e o farelo de trigo, respectivamente. Dessa forma, a inserção de um fator de forma na correlação contribuiu significativamente para a previsão da queda de pressão no Tee de alimentação, uma vez que as partículas de biomassa possuem formas irregulares.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio financeiro concedido pela FAPEMIG, CNPQ e CAPES e à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia.

NOMENCLATURA

A	Área de projeção da partícula	$[\mu\text{m}^2]$
D	Diâmetro interno da tubulação	$[\text{mm}]$
d_s	Diâmetro médio de Sauter	$[\mu\text{m}]$
HR	Índice de Hausner	$[-]$
L	Comprimento da tubulação	$[\text{m}]$
m	Massa de material no silo	$[\text{kg}]$
P	Perímetro de projeção da partícula	$[\mu\text{m}]$
t	Tempo gasto pela válvula rotativa para alimentar o material na linha	$[\text{h}]$
U_{bs}	Teor de umidade em base seca	$[-]$
v_f	Velocidade do fluido	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
α	Ângulo de repouso estático	$[-]$
λ_f	Fator de atrito do fluido	$[-]$
λ_s	Fator de atrito do sólido	$[-]$
ρ_{ba}	Densidade <i>bulk</i> aerada	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_{bc}	Densidade <i>bulk</i> compactada	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_f	Densidade da fase fluida	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_{real}	Densidade real	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_s	Densidade da fase sólida	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ψ	Esfericidade de partícula	$[-]$

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, R.; PINHO, C. (2006), Dilute Phase Vertical Pneumatic Conveying of Cork Stoppers, *Revista de Engenharia Térmica*, Vol 5, p. 36-41.
- BARTH, W. (1958), *Stromungsvorgange beim Transport von Festteilchen und Flüssigkeitsteilchen in Gasen*, *Chemie Ingenieur Technik*, Vol 30, p. 171-180.
- DAI, J.; CUI, H.; GRACE, J. R. (2012), Biomass feeding for thermochemical reactors, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol 38, p. 716-736.
- GUNDOGDU, M. Y. (2004), Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows, *Powder Technology*, Vol 139, p. 76-80.
- KESSEL, S. R. (1985), The interaction between rotary valves and pneumatic conveying pipelines. Doctoral Thesis – University of Greenwich, Thames Polytechnic.
- KLINZING, G. E. (2018), A review of pneumatic conveying status, advances and projections, *Powder Technology*, Vol 333, p. 78-90.
- KLINZING, G. E.; RIZK, F.; MARCUS, R.; LEUNG, L. S. (2010), *Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach*. New York: Springer.
- LOPES, C. S. (2011), Estudo da alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático. PPGEQ/UFSCar – São Carlos – SP.
- LOURENÇO, G. A. (2019), Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade: proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica. PPGEQ/UFU - Uberlândia - MG (tese de doutorado).
- MILLS, D. (2016), *Pneumatic Conveying Design Guide*. Elsevier Ltd.
- OGAWA, A. (1984), *Separation of Particles from Air and Gases*, CRC Press.
- SHEPHERD, C. B.; LAPPLE C. E. (1939). *Air pollution control: a design approach*. Waveland Press Inc., Illinois.
- SZIKSZAY, G. (1988), Friction factor for dilute phase pneumatic conveying, *Bulk Solids Handling*, Vol 8, p. 395-399.
- WANG, Y.; WILLIAMS, K.; JONES, M.; CHEN, B. (2017), CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass, *Applied Thermal Engineering*, Vol 125, p. 185-208.
- WEBER, M. (1991), Friction of the air and the air/solid mixture in pneumatic conveying, *Bulk Solids Handling*, Vol 11, p. 99-102.