



TRANSPORTE PNEUMÁTICO HORIZONTAL DE BIOMASSAS: EXPERIMENTOS EM UNIDADE PILOTO E SIMULAÇÕES NUMÉRICAS EM CFD

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 - O transporte pneumático de biomassa tem sido amplamente utilizado por indústrias químicas e de energia. As características e a estabilidade do fluxo gás-sólido são essenciais para o projeto e operação de plantas industriais. Tendo isso em vista, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a queda de pressão em um trecho horizontal de uma linha de transporte pneumático de biomassas em fase diluída, empregando-se diferentes taxas mássicas de sólidos e velocidades do ar transportador. 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). O aumento da taxa mássica de sólidos e da velocidade do ar proporcionaram o aumento da queda de pressão na linha, assim como do comprimento de aceleração do escoamento gás-sólido. Além disso, simulações numéricas em CFD foram realizadas para a previsão da queda de pressão no trecho horizontal para o transporte do sabugo de milho, utilizando a abordagem Euleriana Granular, aplicando o modelo de turbulência RGN ($k-\epsilon$) – *Dispersed*. O estudo numérico conseguiu prever de forma satisfatória o perfil de pressão estática ao longo do comprimento, apresentando um desvio médio de 0,71% em relação aos dados experimentais.

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. Nas indústrias químicas e de energia, esse processo tem sido amplamente utilizado para o transporte de biomassas, permitindo que o material particulado seja transferido pneumáticamente, por exemplo, para um silo de armazenamento, reator ou caldeira (Dai *et al.*, 2012; He *et al.*, 2012; Hassan e Björn, 2000).

Existem várias razões para o transporte pneumático ser o método mais comum para o transporte de materiais em pó e granulados pelas indústrias. Em primeiro lugar, a utilização de tubulações horizontais, verticais e curvas com qualquer combinação de orientações,

permite que o arranjo do sistema seja flexível tanto no layout da planta quanto na operação. Além disso, a condição de transporte fechado permite o deslocamento de vários tipos de materiais, incluindo aqueles considerados perigosos, sem gerar problemas ambientais. E, por último, este sistema pode operar automaticamente (Wang *et al.*, 2017).

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 do transporte de materiais que apresentam formatos irregulares e significativas diferenças em suas propriedades físicas, como é o caso das biomassas. A natureza dessas partículas impõe dificuldades consideráveis na previsibilidade dos processos de alimentação e transporte (Cui e Grace, 2006;

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.

De forma a contribuir para o enriquecimento da pesquisa associada ao manuseio de biomassas, este trabalho teve como objetivo avaliar a queda de pressão em um trecho horizontal de 9 m de um sistema transporte pneumático em fase diluída, através da utilização de biomassas com diferentes propriedades físicas e empregando-se diferentes taxas mássicas de sólidos e velocidades do ar. Além disso, foi possível propor um modelo numérico para a predição da queda de pressão no transporte pneumático horizontal de biomassas, utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD), e

avaliar o comportamento fluidodinâmico do escoamento multifásico.

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.

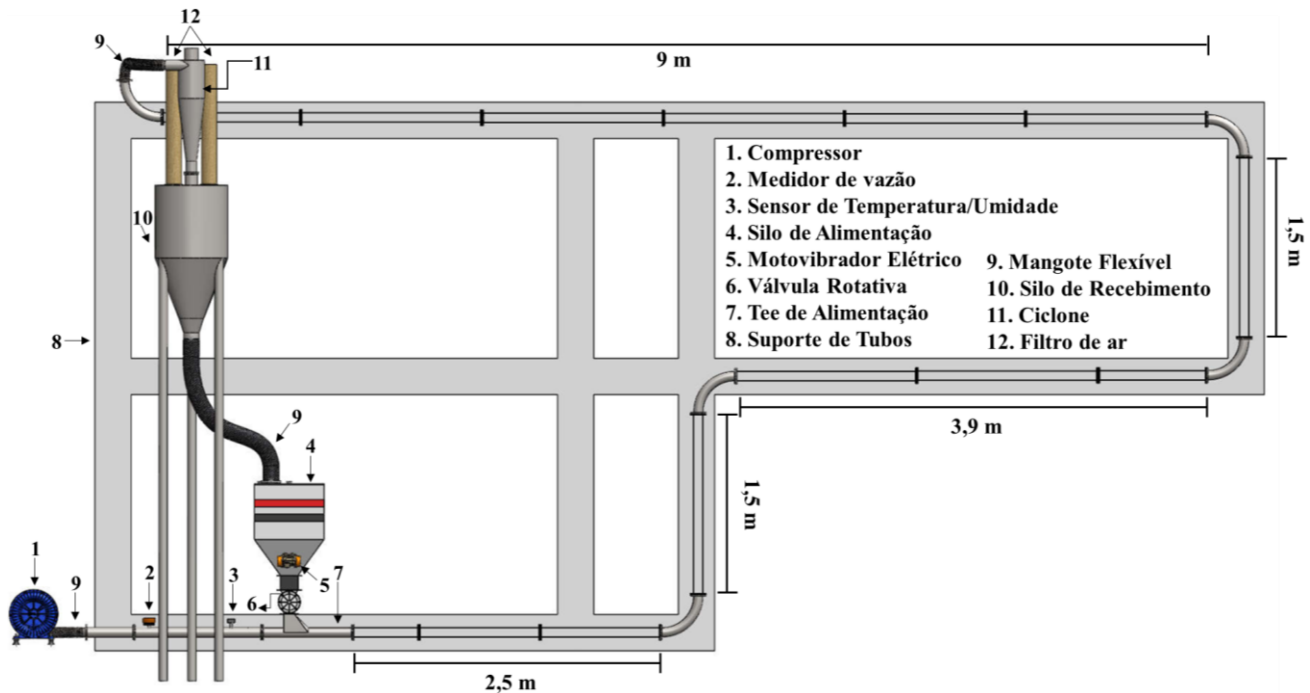


Figura 1: Aparato experimental do sistema de transporte pneumático.

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.

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 motovibradores 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.

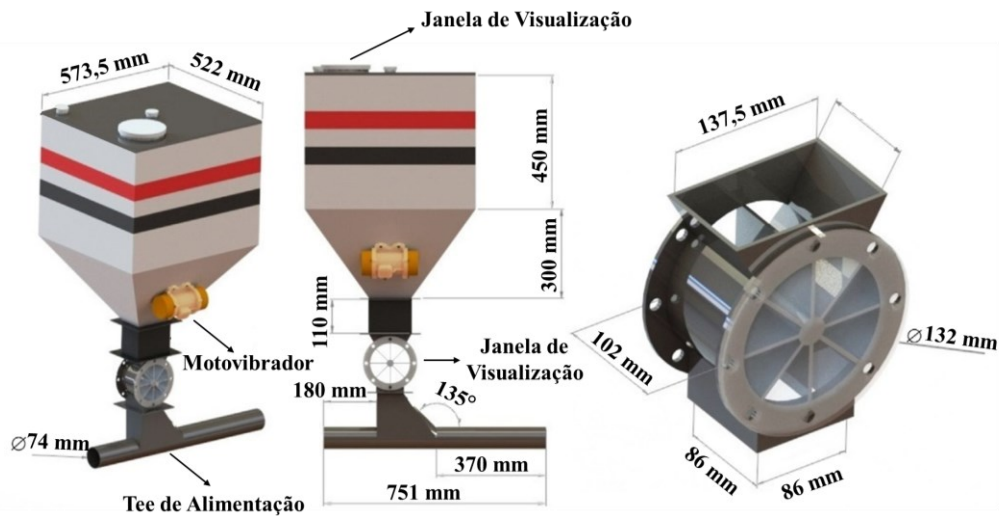


Figura 2: Sistema de alimentação com detalhes do projeto.

Para avaliar as regiões de aceleração e de fluxo totalmente desenvolvido do escoamento gás-sólido, foram dispostas oito tomadas de pressão ao longo do trecho horizontal de 9 m da linha de transporte pneumático. A primeira tomada de pressão (P1) foi posicionada a 10 cm de distância da curva. Posteriormente, quatro

tomadas de pressão foram dispostas com distanciamento de 94 cm entre elas, no intuito de alcançar uma melhor representação da região de aceleração. As três últimas tomadas foram instaladas com um maior distanciamento, conforme apresentado na Figura 3.

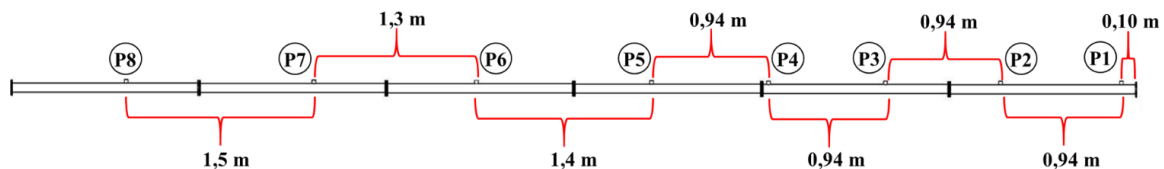


Figura 3: Distribuição das tomadas de pressão ao longo do trecho horizontal de 9 m.

Aquisição de Dados e Controle do Sistema

O sistema de aquisição de dados e controle da unidade experimental foi realizado com o auxílio dos dispositivos multifuncionais USB-6211 e USB-6009 da National Instruments (NI) e de um inversor de frequência vetorial (WEG - CFW500D28P0T2DB20). A vazão volumétrica do ar era aferida através de um medidor de vazão volumétrica tipo turbina em linha da Tecnofluid, modelo TVT 75, que enviava os dados para uma das placas 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.

Pressões estáticas foram medidas ao longo do trecho horizontal superior da unidade, através dos pontos P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 e P8, conforme apresentado na Figura 3. A pressão no ponto P1 foi medida utilizando um transmissor de pressão diferencial da marca Cole-Parmer, com faixa de medição de 0 a 6227 Pa e precisão de 0,4%. Já as medidas nos pontos P2, P3, P5, P6, P7 e P8 foram realizadas através da diferença de pressão em relação ao ponto P1, utilizando transmissores de pressão diferencial da AutoTran, modelo 851, com faixa de leitura ajustável de no máximo 2989 Pa e com precisão de 1%. 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). 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.

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.

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.

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

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

Procedimento Experimental

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 foi então 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 (P1 e P8) através dos sensores instalados no trecho horizontal. 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.

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

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 em 14, 16, 18 e 20 m/s e a rotação da válvula ajustada para 5, 15, 25, 35 e 45 rpm.

Estudo Numérico

Como a unidade piloto de transporte pneumático utilizada neste estudo possuía uma grande extensão e o foco do trabalho estava na avaliação do transporte horizontal de biomassas em fase diluída, apenas uma região da unidade foi adotada para a realização do estudo numérico. Esta correspondeu a um trecho vertical de 0,5 m, uma curva com raio de curvatura de 0,3 m e um trecho horizontal de

8,06 m, de acordo com a posição da última tomada de pressão apresentada na Figura 3. Dessa forma, com o auxílio do *software* Gambit 2.4.6, foi construída uma malha tridimensional estruturada contendo 583.110 células hexaédricas, com as mesmas dimensões do equipamento experimental.

A abordagem Euleriana Granular, aplicando o modelo de turbulência RGN ($k-\epsilon$) - *Dispersed*, foi utilizada para descrever o transporte pneumático em fase diluída do sabugo de milho. As simulações foram realizadas utilizando o resolvidor numérico Fluent®, versão 14.0. A modelagem matemática empregada pode ser observada na Tabela 1, enquanto os métodos numéricos utilizados para a solução das equações estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 1: Modelagem Matemática.

Modelo Multifásico	Euleriano Granular
Modelo de Turbulência	RNG ($k-\epsilon$) - <i>Dispersed</i>
Modelo de Arraste	Gisdaspow (1992)
Modelo <i>Lift</i>	Saffiman-Mei (1965,1968)
Pressão de Sólidos	Lun <i>et al.</i> (1984)
Função de Distribuição Radial	Lun <i>et al.</i> (1984)
Viscosidade Granular	Gisdaspow (1992)
Viscosidade Granular <i>Bulk</i>	Lun <i>et al.</i> (1984)
Coefficiente de Restituição	$e_{ss} = 0,9$

Tabela 2: Métodos de Solução.

Acoplamento	<i>Phase Coupled SIMPLE</i>
Pressão - Velocidade	(<i>PCSIMPLE</i>)
	Gradiente:
	<i>LEAST SQUARES CELL BASED</i>
	Momento:
	<i>SECOND ORDER UPWIND</i>
Discretização Espacial	Fração Volumétrica (α):
	<i>QUICK</i>
	Energia Cinética Turbulenta (k):
	<i>SECOND ORDER UPWIND</i>
	Taxa de Dissipação Turbulenta (ϵ):
	<i>SECOND ORDER UPWIND</i>
Passo de Tempo	10^{-4} s
Critério de Convergência	10^{-3}
Tempo de Simulação	100 s

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização das Biomassas

Na Tabela 3 estão apresentados os valores médios de todas as propriedades avaliadas para

cada material, com os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 3: Propriedades das biomassas.

Material	Grupo Geldart	d_s (μm)	ρ_{ba} (kg/m^3)	ρ_{bc} (kg/m^3)	ρ_s (kg/m^3)	ρ_{real} (kg/m^3)	U_{bs} (%)	α ($^\circ$)	HR (-)	Ψ (-)
MMO	B	696,44 ±	645,28 ±	857,83 ±	1092,51 ±	1456,6 ±	11,28 ±	35,60	1,33 ±	0,78 ±
		26,45	9,14	7,01	8,18	3,0	0,14	± 2,59	0,03	0,04
SMI	B	650,21 ±	252,16 ±	307,19 ±	865,20 ±	1368,6 ±	9,56 ±	34,41	1,22 ±	0,65 ±
		24,69	3,41	5,04	15,48	10,5	0,08	± 1,55	0,01	0,03
PMI	B	653,39 ±	143,93 ±	187,42 ±	737,94 ±	1249,2 ±	10,02 ±	35,03	1,30 ±	0,33 ±
		33,71	4,75	5,39	18,54	16,4	0,26	± 1,83	0,01	0,02
CAR	B	559,13 ±	257,33 ±	356,00 ±	918,15 ±	1499,8 ±	8,54 ±	31,74	1,38 ±	0,34 ±
		46,23	3,00	2,76	8,23	5,3	0,23	± 1,32	0,02	0,05
FTR	B	338,92 ±	318,19 ±	455,04 ±	1069,36 ±	1392,4 ±	12,68 ±	41,03	1,43 ±	0,62
		18,35	3,53	3,49	3,22	5,3	0,21	± 1,24	0,02	± 0,03

Estudo Experimental

Nas Figuras 4 a 8 são apresentados os gráficos referentes às pressões estáticas ao longo do trecho horizontal para diferentes taxas mássicas de sólidos de cada material, à velocidade do ar constante.

A partir dos dados experimentais, foi possível identificar duas regiões, a região de aceleração do escoamento gás-sólido, que segue uma tendência exponencial, e a região de fluxo totalmente desenvolvido, que apresenta uma tendência linear. Tripathi *et al.* (2018) propuseram uma equação exponencial-linear, Equação 4, para representar esse comportamento das pressões estáticas, a qual foi ajustada aos dados experimentais deste estudo.

$$P = a_1 \exp\left(-\frac{x}{a_2}\right) + a_3 + a_4 x \quad (4)$$

Segundo Santo *et al.* (2018), na zona de aceleração a queda de pressão por unidade de comprimento não é constante, uma vez que a energia necessária para acelerar as partículas é reduzida à medida que elas são transportadas ao longo do duto. Após a zona de aceleração, a pressão estática tende a diminuir linearmente e a queda de pressão por unidade de comprimento se torna constante, indicando o início da zona de fluxo totalmente desenvolvido, onde a

velocidade média das partículas se torna constante.

A partir das Figuras 4 a 8 é possível notar que, de modo geral, como esperado, o aumento da taxa mássica de sólidos proporcionou o aumento da queda de pressão na linha, devido a uma maior concentração de partículas na seção transversal do duto, dificultando o escoamento do ar pela tubulação e aumentando o atrito das partículas com a parede. Além disso, é possível observar que a região exponencial das curvas se torna mais acentuada para as condições de maiores taxas mássicas de sólidos, indicando um maior comprimento da tubulação para as partículas alcançarem uma velocidade média constante, isto é, maior é o comprimento de aceleração.

As principais contribuições para a queda de pressão em escoamentos gás-sólido em tubulações horizontais são: a energia necessária para que a força de arrasto seja exercida sobre as partículas; perdas de momento e energia por colisões partícula-partícula e as perdas de momento e energia por colisões partícula-parede (Patro e Dash, 2014b).

O aumento da taxa mássica de sólidos aumenta o número de partículas na linha e, portanto, intensifica a frequência de colisões partícula-partícula e partícula-parede, proporcionando maiores perdas de energia e o aumento da queda de pressão no sistema (Patro *et al.*, 2014a).

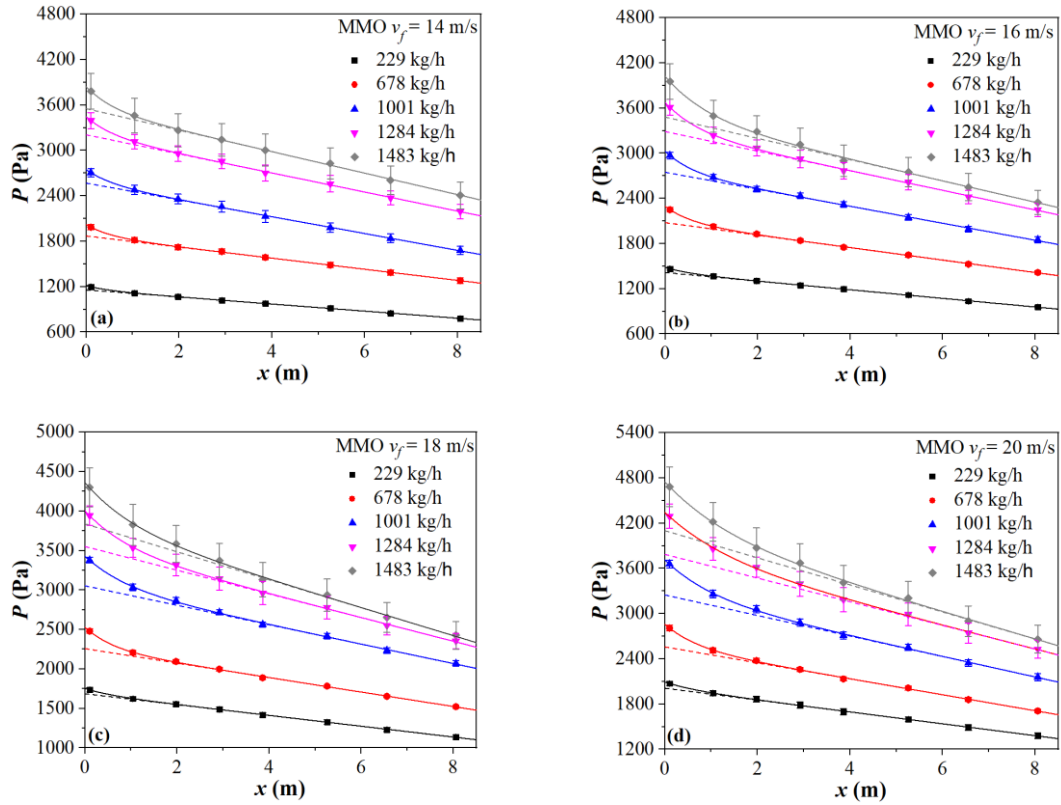


Figura 4: Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para o MMO em diferentes taxas mássicas de sólidos e condições de velocidade do ar de 14 m/s (a), 16 m/s (b), 18 m/s (c) e 20 m/s (d).

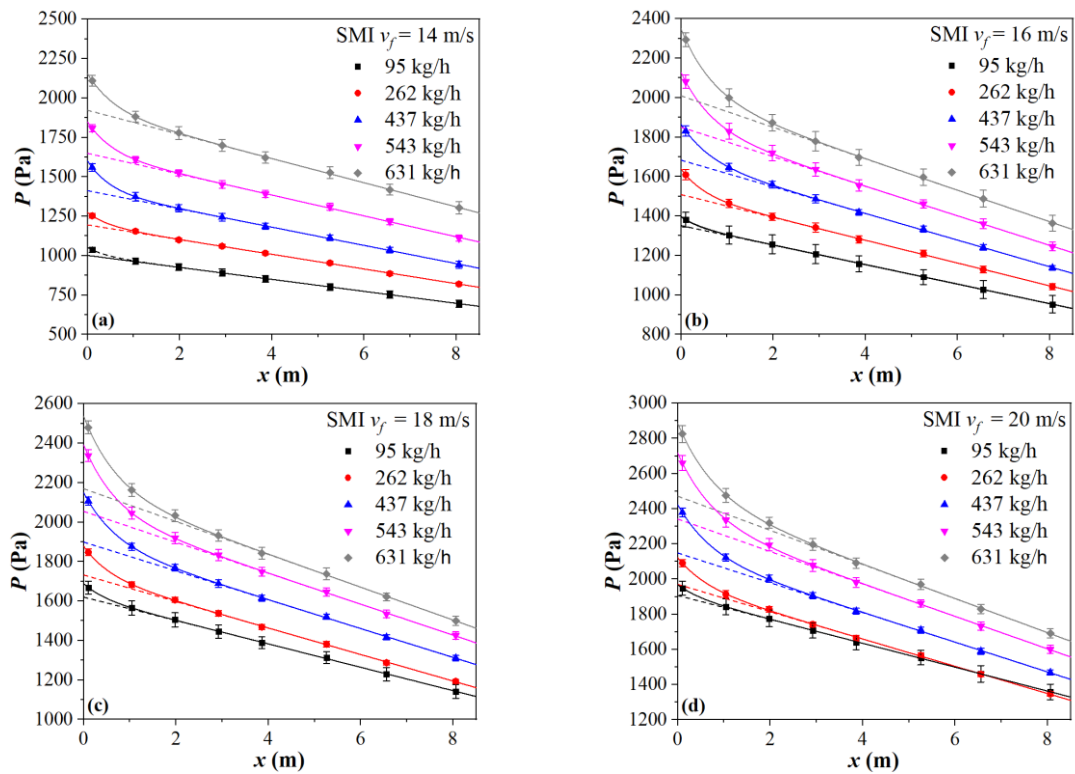


Figura 5: Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para o SMI em diferentes taxas mássicas de sólidos e condições de velocidade do ar de 14 m/s (a), 16 m/s (b), 18 m/s (c) e 20 m/s (d).

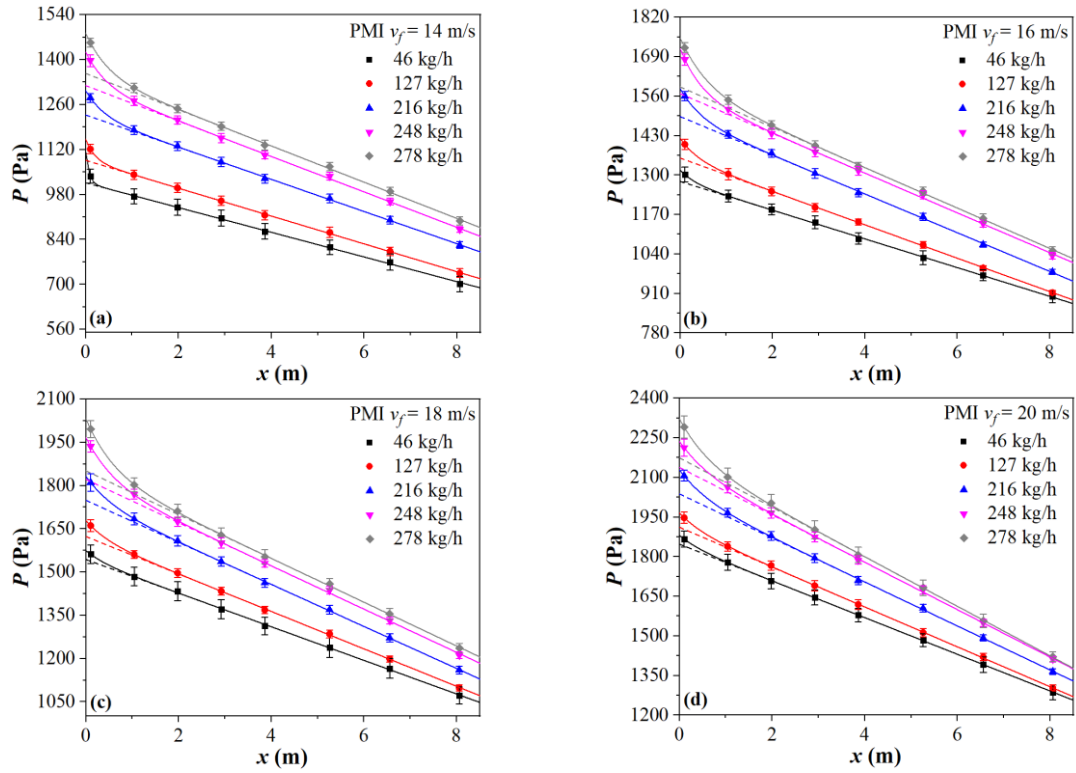


Figura 6: Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para a PMI em diferentes taxas mássicas de sólidos e condições de velocidade do ar de 14 m/s (a), 16 m/s (b), 18 m/s (c) e 20 m/s (d).

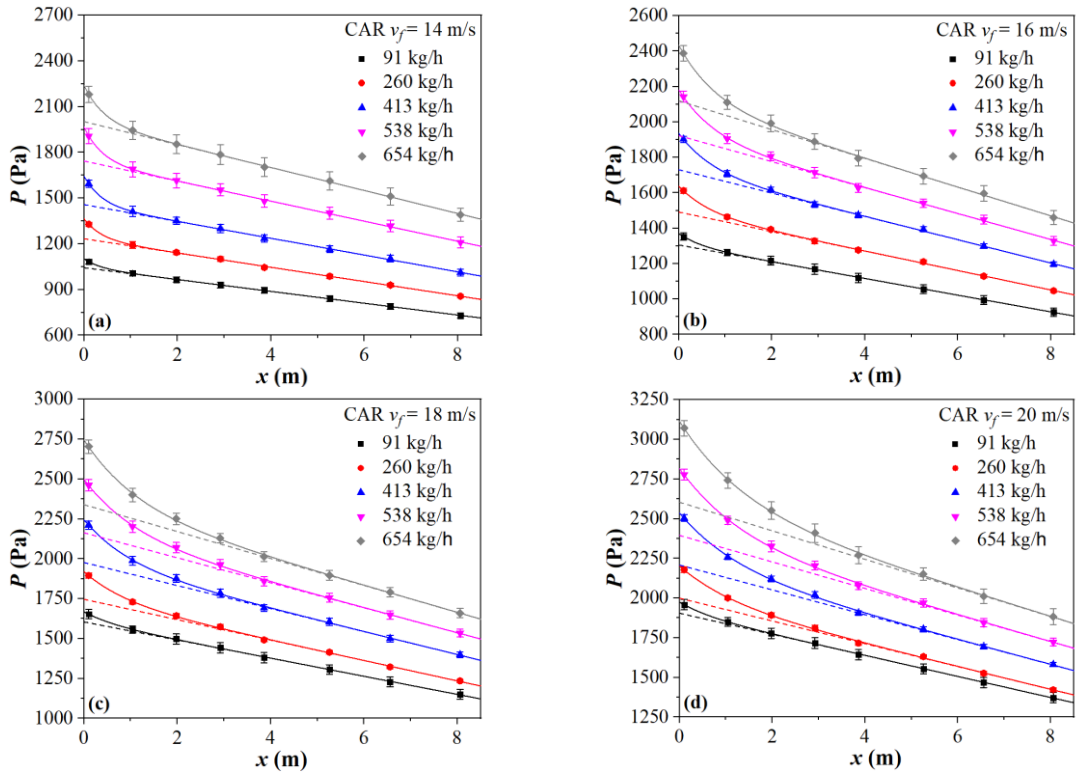


Figura 7: Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para a CAR em diferentes taxas mássicas de sólidos e condições de velocidade do ar de 14 m/s (a), 16 m/s (b), 18 m/s (c) e 20 m/s (d).

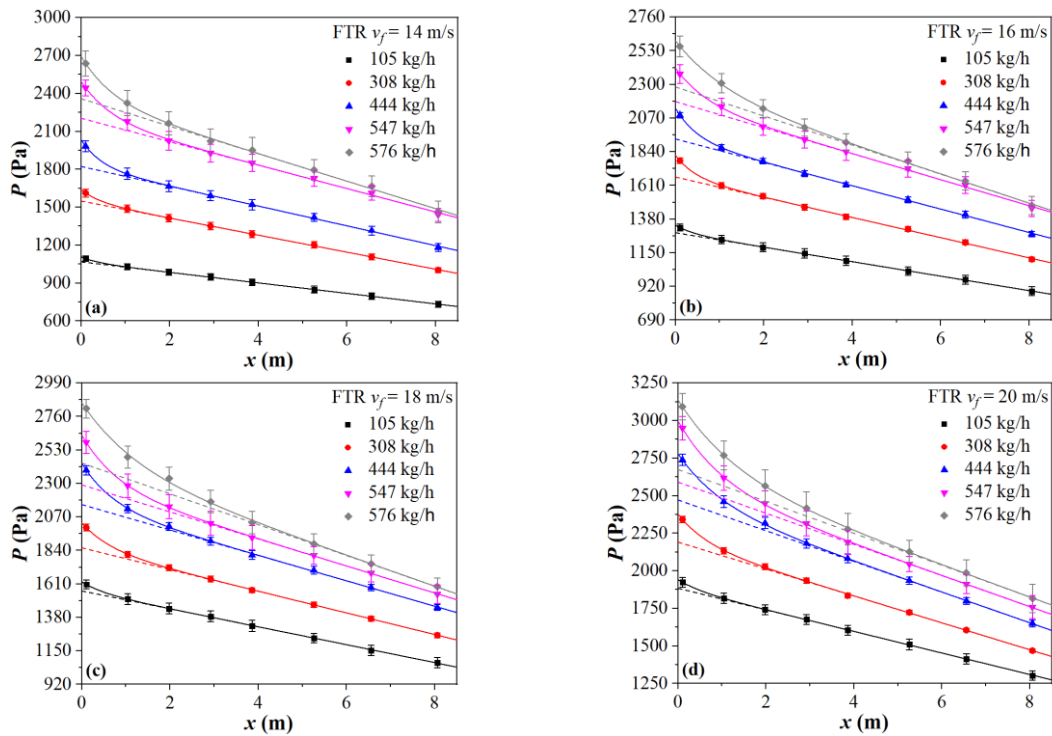


Figura 8: Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para o FTR em diferentes taxas mássicas de sólidos e condições de velocidade do ar de 14 m/s (a), 16 m/s (b), 18 m/s (c) e 20 m/s (d).

A força de arraste do gás sobre as partículas possibilita o seu transporte ao longo da tubulação. Portanto, a velocidade do ar é um importante parâmetro a ser avaliado em escoamentos gás-sólidos. Nota-se nas Figuras 4 a 8, que à medida que a velocidade do ar decresce, ocorre a diminuição da queda de pressão na linha, em razão da redução do atrito fluido-parede e do aumento da retenção de sólidos. Com isso, o material passa a ser transportado mais próximo à base do tubo, devido à sedimentação gravitacional das partículas.

A inércia das partículas aumenta com o aumento do seu diâmetro e densidade, principais responsáveis pela sedimentação de sólidos em fluxos horizontais. Com o aumento da inércia das partículas mais energia é necessária para transportá-las, aumentando, assim, a queda de pressão (Patro e Dash, 2014a). Este fato pode ter conferido ao milho moído maiores quedas de pressão no trecho horizontal em relação às demais biomassas avaliadas, uma vez que este material apresentou maior diâmetro e densidade durante o processo de caracterização.

Estudo Numérico

A partir da simulação numérica referente ao transporte do sabugo de milho, à velocidade

do ar de 16 m/s e taxa mássica de sólidos de 437 kg/h, dados de pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal foram coletados durante um tempo de 100 s. Ao comparar os resultados experimentais e os simulados, Figura 9, verifica-se que o modelo numérico (CFD) teve uma boa concordância com os dados experimentais, apresentando desvio médio de 0,71%, sendo, portanto, uma alternativa viável para a previsão da queda de pressão no sistema de transporte pneumático horizontal de biomassas em fase diluída.

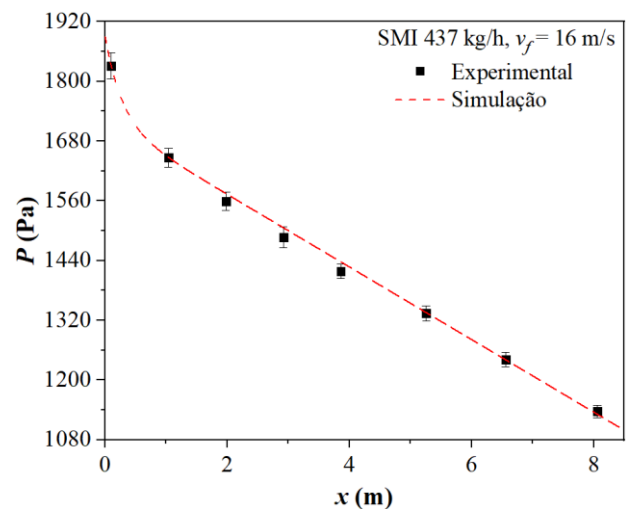


Figura 9: Comparação dos resultados numéricos e experimentais do perfil de pressão estática ao longo do comprimento.

Analisando a fração volumétrica de sólidos (Figuras 10 e 11), observa-se que após a curva existe uma região de maior concentração de sólidos na parte superior da tubulação com a brusca mudança de direção do escoamento gás-sólido da direção vertical para

a horizontal. Posteriormente, o material particulado passa a ser transportado mais próximo a base da tubulação e permanece com esse comportamento ao longo de todo o comprimento.

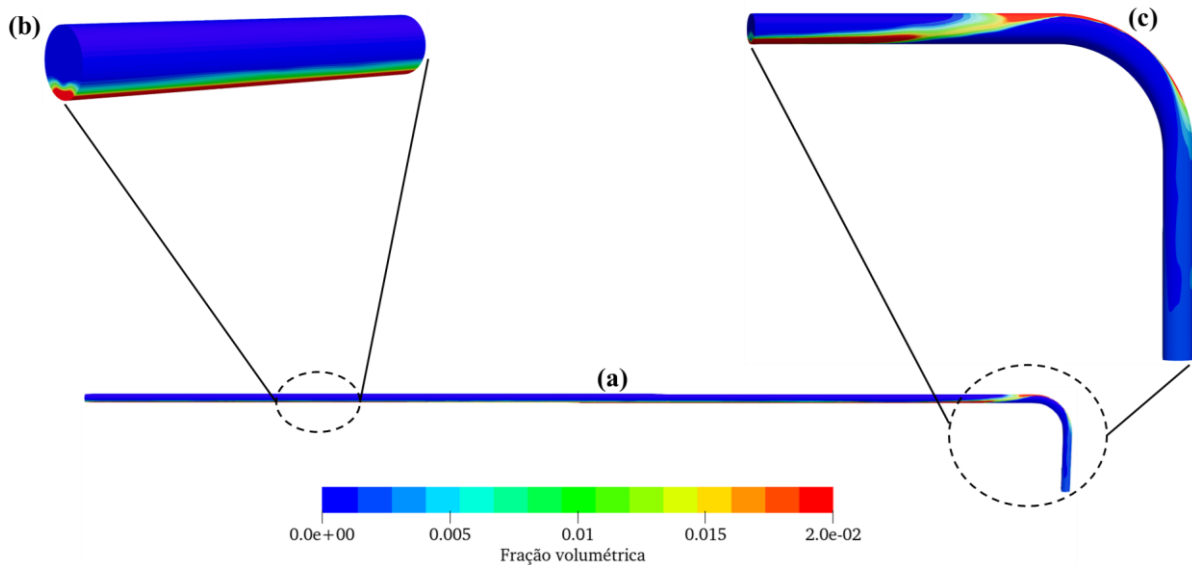


Figura 10: Distribuição de fração volumétrica do sabugo de milho ao longo da linha de transporte pneumático, para taxa mássica de sólidos de 437 kg/h e velocidade do ar de 16 m/s, em toda geometria (a), em um trecho do duto horizontal (b) e na curva (c).

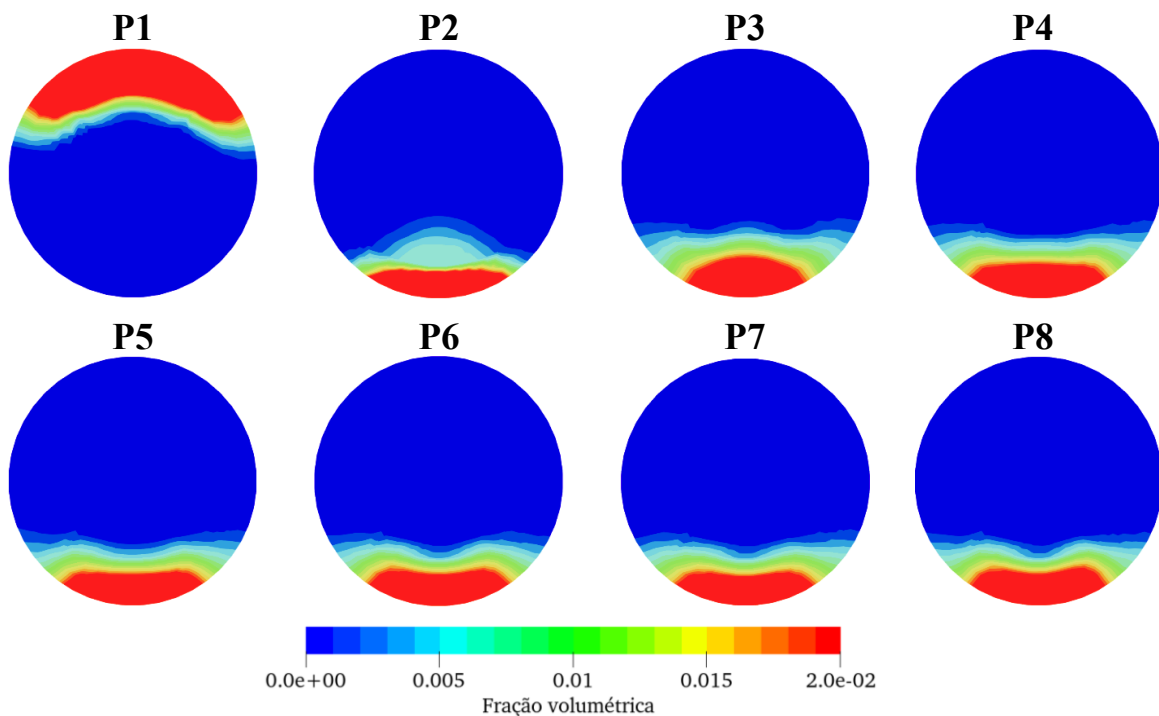


Figura 11: Distribuição de fração volumétrica do sabugo de milho nas seções transversais do tubo horizontal, para taxa mássica de sólidos de 437 kg/h e velocidade do ar de 16 m/s.

Ao escoar através de uma curva, o material particulado se estratifica numa pequena porção da tubulação junto à parede, sendo este fenômeno denominado *rope* (Lopes,

2011), como apresentado na Figura 10 (c). Esse movimento de separação das fases ocorre devido ao balanço de forças presente, composto pelas forças centrífuga, viscosa e gravitacional

(Akilli *et al.*, 2001). Uma vez formado, o *rope* gradativamente se dispersa, sendo as partículas novamente misturadas ao fluido devido à turbulência do escoamento (Schallert e Levy, 2000).

A Figura 12 apresenta as distribuições de sólidos para uma mesma seção transversal da tubulação, correspondente à posição P6 do trecho horizontal, nas diferentes condições de velocidade do ar. Nota-se que o aumento da velocidade do ar proporcionou a diminuição da fração volumétrica de sólidos na linha. Portanto, nas condições de menor velocidade é possível identificar uma maior retenção de

partículas próximo à base da tubulação, o que já era esperado.

Para uma taxa mássica de sólidos constante, a velocidade do gás será a principal responsável pelo estabelecimento do regime de escoamento gás-sólido, influenciando de forma significativa na distribuição de sólidos e na queda de pressão total da linha de transporte pneumático. Dessa forma, o aumento da concentração de sólidos devido à redução da velocidade do ar proporciona o aumento das forças resistivas e, conseqüentemente, a mudança nos padrões de fluxo.

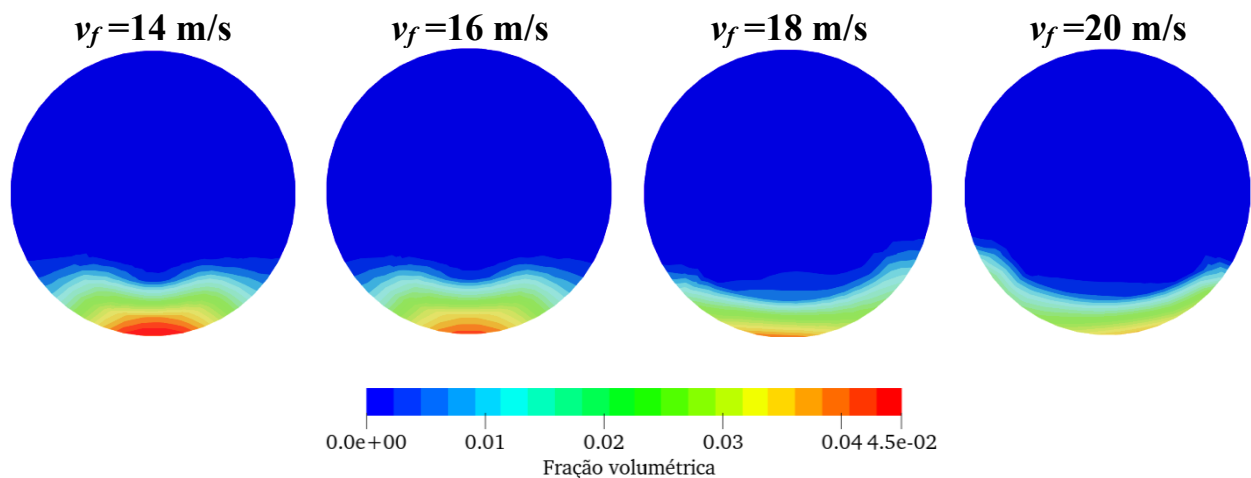


Figura 12: Distribuição de fração volumétrica do sabugo de milho na seção transversal da posição P6 do trecho horizontal, para taxa mássica de sólidos de 437 kg/h e velocidades do ar de 14, 16, 18 e 20 m/s.

CONCLUSÃO

A partir do estudo da queda de pressão no trecho horizontal, foi possível observar que o aumento da taxa mássica de sólidos, assim como da velocidade do ar, proporcionou o aumento da queda de pressão na linha e do comprimento de aceleração do escoamento gás-sólidos. Através dos perfis de pressão estática ao longo do trecho horizontal, foi possível identificar as regiões de aceleração e de fluxo totalmente desenvolvido.

Paralelo aos estudos experimentais, simulações numéricas em CFD foram realizadas, utilizando a abordagem Euleriana Granular, aplicando o modelo de turbulência RGN ($k-\varepsilon$) – *Dispersed*, para descrever o transporte pneumático horizontal do sabugo de milho em fase diluída. O modelo numérico empregado demonstrou ter boa sensibilidade na previsão do transporte do material. O uso de ferramentas numéricas tem sido cada vez mais

expandido no auxílio à compreensão do escoamento e para minimizar custos e esforços experimentais.

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	Pressão estática	$[\text{Pa}]$

Pe	Perímetro de projeção da partícula	[μm]	PATRO, P.; DASH, S. K. (2014a.), Prediction of acceleration length in turbulent gas-solid flows, <i>Advanced Powder Technology</i> , Vol 25, p. 1643-1652.
t	Tempo gasto pela válvula rotativa para alimentar o material na linha	[h]	PATRO, P.; DASH, S. K. (2014b), Numerical simulation for hydrodynamic analysis and pressure drop prediction in horizontal gas-solid flows, <i>Particulate Science and Technology</i> , Vol 32, n. 1, p. 94-103.
U_{bs}	Teor de umidade em base seca	[-]	PATRO, P.; PATRO, B.; MURUGAN S. (2014), Prediction of two-phase heat transfer and pressure drop in dilute gas-solid flows: A numerical investigation, <i>Drying Technology: An International Journal</i> , Vol 32, p. 1167-1178.
v_f	Velocidade do fluido	[m.s^{-2}]	SANTO, N.; Portnikov, D.; Tripathi, N. M.; Kalman, A. (2018). Experimental study on the particle velocity development profile and acceleration length in horizontal dilute phase pneumatic conveying systems. <i>Powder Technology</i> , Vol 339, p. 368-376.
α	Ângulo de repouso estático	[-]	SCHALLERT, R.; LEVY, E. (2000), Effect of a combination of two elbows on particle roping in pneumatic conveying, <i>Powder Technology</i> , Vol 107, p. 226-233.
ρ_{ba}	Densidade <i>bulk</i> aerada	[kg.m^{-3}]	TRIPATHI, N. M.; LEVY, A.; KALMAN, H. (2018), Acceleration pressure drop analysis in horizontal dilute phase pneumatic conveying system, <i>Powder Technology</i> , Vol 327, p. 43-56.
ρ_{bc}	Densidade <i>bulk</i> compactada	[kg.m^{-3}]	WANG, Y.; WILLIAMS, K.; JONES, M.; CHEN, B. (2017), CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass, <i>Applied Thermal Engineering</i> , Vol 125, p. 185-208.
ρ_f	Densidade da fase fluida	[kg.m^{-3}]	
ρ_{real}	Densidade real	[kg.m^{-3}]	
ρ_s	Densidade da fase sólida	[kg.m^{-3}]	
ψ	Esfericidade de partícula	[-]	

REFERÊNCIAS

- AKILLI, H.; LEVY, E. K.; SAHIN, B. (2001), Gas-solid flow behavior in a horizontal pipe after a 90° vertical-to-horizontal elbow, *Powder Technology*, Vol 116, p. 43-52.
- CUI, H.; GRACE, J. R. (2006), Pneumatic conveying of biomass particles: A review, *China Particuology*, Vol 4, p. 183-188.
- DAI, J.; CUI, H.; GRACE, J. R. (2012), Biomass feeding for thermochemical reactors, *Energy and Combustion Science*, Vol 38, p. 716-736.
- HASSAN, S.; BJÖRN, K. (2000), Pneumatic conveying of wood powder by using a steam-jet ejector, *Biomass and Bioenergy*, v. 19, n. 2, p. 103-117.
- HE, C.; XIANMEI, C.; JIANHAO, W.; HONGLIANG, N.; YUPENG, X.; HAIJUN, Z.; YUANQUAN, X.; XIANGLIN, S. (2012), Conveying characteristics and resistance characteristics in dense phase pneumatic conveying of rice husk and blendings of rice husk and coal at high pressure, *Powder Technology*, Vol 227, p. 51-60.
- LAM, P. S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.; LIM, C. J. (2008), Effect of particle size and shape on physical Properties of biomass grinds, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, Vol 24, p. 351-358.
- LOPES, C. S. (2011), Estudo da alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático. UFSCar/PPGEQ – São Carlos - SP (tese de doutorado).