

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**WALBER JOSÉ MESSIAS COELHO**

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS  
GRANULARES E FLUIDAS NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM TRECHOS  
HORIZONTAIS E VERTICAIS**

Maceió  
2024

WALBER JOSÉ MESSIAS COELHO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS  
GRANULARES E FLUIDAS NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM TRECHOS  
HORIZONTAIS E VERTICAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão

Coorientadora: Dra. Thais Logetto Caetité Gomes

Maceió  
2024

**Catálogo na Fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

- C672a Coêlho, Walber José Messias.  
Avaliação numérica da influência das propriedades físicas granulares e fluidas no transporte pneumático em trechos horizontais e verticais / Walber José Messias Coêlho. – 2024.  
55 f. il. : figs. ; tabs. color.
- Orientador: Rodolfo Junqueira Brandão.  
Co-orientadora: Thais Logetto Caetité Gomes.  
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química).  
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2024.
- Bibliografia: f. 51-53.  
Anexos: f. 54-55.
1. Transporte pneumático. 2. Leito pneumático. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. OpenFoam (*Software* livre). I. Título.

CDU:66.0:004

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pois nos momentos mais difíceis sempre esteve comigo me dando o suporte e a força necessária para cumprir a jornada. Sem a sua graça e a sua presença em minha vida nada disso seria possível.

Aos meus pais, Maria dos Prazeres Messias da Silva e Valdemir Coêlho, por sempre estarem ao meu lado, me criando com muita dedicação e amor. Tenho muito orgulho e sou eternamente grato por tudo que fizeram e faz por mim. A presença de vocês foi fundamental para que eu concretizasse essa etapa na minha vida.

Ao meu irmão, Waldenberg Messias Coêlho, que mesmo longe fisicamente em toda essa jornada, sempre me apoiou e me deu suporte para que eu continuasse e concluísse com êxito os meus objetivos.

Ao meu orientador, Rodolfo Junqueira Brandão, uma das pessoas mais competentes que já conheci ao longo da minha jornada. Um excelente profissional e um grande amigo. Sou muito grato pela paciência, direcionamento, pelo apoio e confiança que depositou em mim.

A todos os meus amigos que compartilhei grandes momentos. Nos alegamos e passamos momentos difíceis durante essa jornada da graduação, porém sempre nos apoiávamos e enfrentávamos juntos todos os obstáculos.

## RESUMO

O transporte pneumático é um método que envolve o deslocamento de materiais particulados a granel através de tubulações na posição horizontal ou vertical, a partir de uma corrente de gás gerada por um ventilador, soprador ou compressor pela diferença de pressão. Nas indústrias químicas e de energia, por exemplo, esse procedimento tem sido extensivamente empregado para transportar biomassa, viabilizando a transferência de material particulado de forma pneumática para silos de armazenamento, reatores, gaseificadores ou caldeiras. Na maioria dos casos, o fluido empregado normalmente é o ar atmosférico, em função do custo, da facilidade de manipulação e da não toxicidade. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo estudar o transporte pneumático, com ênfase na linha de transporte, por meio da análise de sensibilidade dos parâmetros físicos do sistema gás-fluido e investigando os parâmetros operacionais que garantem o transporte eficiente dos materiais. Para isto, simulações computacionais foram executadas e avaliadas, a partir do comportamento fluidodinâmico do sistema gás-sólido de acordo as classificações do modo de transporte e regime de escoamento, considerando as características do material particulado como massa específica e granulometria. As simulações do leito pneumático foram realizadas utilizando o método de CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) com o emprego do *software* livre e, de código aberto, OpenFoam, a partir da aplicação da abordagem Euleriana. A análise quantitativa e qualitativa mostrou a relevância significativa da velocidade do ar, da concentração da fase granular, condições operacionais e propriedades dos materiais no desempenho do sistema, a partir dos dados oriundos das simulações. O estudo contribuiu para o avanço do conhecimento sobre o transporte pneumático, fornecendo maior compreensão da influência das propriedades físicas granulares e fluidas no transporte pneumático em trechos horizontais e verticais, mediante as variações dos parâmetros gás-fluido, para a otimização de processos industriais que envolvem biomassas.

**Palavras-Chave:** Transporte Pneumático, Leito Pneumático, CFD, OpenFoam.

## ABSTRACT

Pneumatic transportation is a method involving the displacement of bulk particulate materials through pipelines in either horizontal or vertical orientation, propelled by a gas stream generated by a fan, blower, or compressor due to pressure difference. In industries such as chemicals and energy, for instance, this procedure has been extensively utilized to convey biomass, enabling the pneumatic transfer of particulate material to storage silos, reactors, gasifiers, or boilers. In most cases, atmospheric air is commonly used as the fluid due to its cost-effectiveness, ease of handling, and non-toxicity. Accordingly, this study aimed to investigate pneumatic transportation, focusing on the transport line, through sensitivity analysis of the physical parameters of the gas-fluid system and exploring operational parameters ensuring efficient material conveyance. Computational simulations were conducted and evaluated based on the fluid-dynamic behavior of the gas-solid system, considering transportation mode classifications and flow regime, alongside the characteristics of particulate material such as specific mass and particle size distribution. Pneumatic bed simulations were performed using Computational Fluid Dynamics (CFD) with the OpenFoam open-source software, employing the Eulerian approach. Quantitative and qualitative analysis demonstrated the significant relevance of air velocity, granular phase concentration, operational conditions, and material properties in system performance, derived from simulation data. The study contributed to advancing understanding of pneumatic transportation, providing insights into the influence of granular and fluid physical properties on pneumatic transport in both horizontal and vertical sections, considering variations in gas-fluid parameters for optimizing industrial processes involving biomass.

**Keywords:** Pneumatic Transportation, Pneumatic Bed, CFD, OpenFoam.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Sistema com Pressão Positiva.....	8
Figura 2. Sistema com Pressão Negativa .....	8
Figura 3. Regimes de fluxo para o transporte pneumático vertical .....	11
Figura 4. Regimes de fluxo para o transporte pneumático horizontal. ....	12
Figura 5. Região de Aceleração e Fluxo Totalmente Desenvolvido .....	14
Figura 6. Correlações para a estimativa da queda de pressão e do fator de atrito dos sólidos... 17	
Figura 7. Aparato do sistema de transporte pneumático .....	21
Figura 8. Aparato do sistema de transporte pneumático no Onshape.....	22
Figura 9. Estrutura de arquivos no OpenFoam.....	23
Figura 10. Materiais granulares do estudo .....	24
Figura 11. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do SMI. ....	27
Figura 12. Pressão no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do SMI.....	27
Figura 13. Pressão no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do SMI.....	29
Figura 14. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do SMI. ....	29
Figura 15. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do FTR. ....	31
Figura 16. Pressão no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do FTR. ....	31
Figura 17. Fração de partículas no trecho da tubulação na simulação 2 para SMI e FTR.....	32
Figura 18. Pressão no trecho da tubulação na simulação 2 para SMI e FTR.....	32
Figura 19. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 05, 06 e 09 do FTR. 33	
Figura 20. Pressão no sistema pneumático das simulações 05, 06 e 09 do FTR.....	34
Figura 21. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do FTR. ....	36
Figura 22. Pressão no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do FTR. ....	36
Figura 23. Perfil de queda de pressão na simulação 01 para SMI.....	39
Figura 24. Perfil de queda de pressão na simulação 02 para SMI.....	39
Figura 25. Perfil de queda de pressão na simulação 07 para SMI.....	40
Figura 26. Perfil de queda de pressão na simulação 09 para SMI.....	40
Figura 27. Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para SMI.....	41
Figura 28. Perfil de queda de pressão na simulação 01 para FTR.....	42
Figura 29. Perfil de queda de pressão na simulação 02 para FTR.....	43
Figura 30. Perfil de queda de pressão na simulação 06 para FTR.....	43
Figura 31. Perfil de queda de pressão na simulação 07 para FTR.....	44
Figura 32. Perfil de queda de pressão na simulação 09 para FTR.....	44

Figura 33. Pressões estáticas simulações 01, 02, 07 e 09 ao longo do comprimento horizontal para FTR.....	45
Figura 34. Pressões estáticas simulações 06 e 09 ao longo do comprimento horizontal para FTR. .....	45
Figura 35. Elementos com menor qualidade de malha no trecho da tubulação. ....	49
Figura 36. Perfil de queda de pressão na simulação 05 para FTR.....	55
Figura 37. Pressão estáticas da simulação 05 ao longo do comprimento horizontal para FTR. .....	55
Figura 38. Padrão similar de pressão no sistema pneumático das simulações 04 e 08.....	56
Figura 39. Padrão similar de pressão estática ao longo do trecho horizontal no sistema pneumático das simulações 04 e 08. ....	56

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Planejamento Composto Central .....	21
Tabela 2. Propriedades das biomassas .....	25
Tabela 3. Coordenadas correspondentes aos trechos da tubulação no software Paraview. ....	38

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	4
2. OBJETIVOS .....	5
2.1 Geral .....	5
2.2 Específicos .....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	6
3.1 Transporte Pneumático .....	6
3.2 Tipos de Transporte Pneumático .....	6
3.2.1 Transporte Pneumático em pressão positiva, negativa ou combinada. ....	7
3.3 Modo de Transporte Pneumático .....	9
3.4 Regimes de Escoamento no Transporte Pneumático .....	10
3.5 Região de Aceleração e de Fluxo Totalmente Desenvolvido .....	12
3.6 Predição da Queda de Pressão no Transporte Pneumático .....	14
3.7 CFD no Transporte Pneumático .....	18
4. METODOLOGIA .....	20
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	26
5.1 Análise Qualitativa .....	26
5.1.1 Avaliação do material particulado: sabugo de milho .....	26
5.1.2 Avaliação do material particulado: farelo de trigo .....	30
5.2 Análise Quantitativa .....	37
5.2.1 Avaliação Quantitativa do material particulado: sabugo de milho .....	38
5.2.2 Avaliação Quantitativa do material particulado: farelo de trigo .....	42
5.3 Avaliação das Problemáticas do Leito Pneumático .....	48
6. CONCLUSÃO .....	51
REFERÊNCIAS .....	52
ANEXO I .....	55

## 1. INTRODUÇÃO

O transporte de sólidos é uma operação amplamente utilizada em diversos setores industriais. Em particular, no transporte pneumático, em que se emprega gás (usualmente ar) como agente de arraste, é possível encontra-lo nas indústrias alimentícia, química, na mineração, em siderurgias e usinas termoelétricas. (CREMASCO, 2012).

O transporte pneumático é um método amplamente utilizado para mover diversos tipos de materiais particulados a granel com propriedades físicas e químicas distintas, variando em tamanho, forma, densidade, índice de fluidez, temperatura de ebulição e fusão. O mecanismo de funcionamento ocorre dentro de uma tubulação, podendo ser na vertical, horizontal ou inclinada, impulsionado por uma corrente de gás criada por ventilador, soprador ou compressor, por meio da diferença de pressão (SANTOS, 2009).

Atualmente, os pesquisadores têm dedicado consideráveis esforços para estudar o impacto da queda de pressão em trechos horizontais, verticais, curvas e na região de alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático (LOURENÇO, 2019). Além disso, a maioria dos estudos registrados na literatura sobre o manuseio de materiais particulados abrange pós ou partículas com formas regulares e distribuição de tamanho estreita. No entanto, há uma escassez de informações sobre o transporte e manuseio de materiais com formas irregulares e notáveis variações em suas propriedades físicas, como é o caso da biomassa (GOMES, 2022).

Nesse sentido, têm sido desenvolvidos modelos empíricos com o objetivo de progressivamente substituir a dependência experimental por um conjunto de equações que representem de forma precisa o comportamento de materiais diversos nesse tipo de sistema.

Desse modo, se faz necessário investigar a influência das propriedades físicas granulares aplicado ao sistema gás-sólido e parâmetros operacionais que garantem o transporte eficiente dos componentes no leito pneumático, mediante a realização de simulações numéricas através do *software* OpenFoam.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Com base no exposto, o objetivo geral desse trabalho é estudar o transporte pneumático de biomassas (farelo de trigo e sabugo de milho) com o auxílio da fluidodinâmica computacional (CFD), através da análise de sensibilidade dos parâmetros físicos envolvidos no sistema gás-sólido, como forma de verificar as condições operacionais mais relevantes para garantir um transporte mais eficiente dos materiais.

### **2.2 Específicos**

- Avaliar a classificação do tipo de transporte pneumático (fase diluída e/ou fase densa) a partir de um estudo de análise de sensibilidade de concentração de sólidos alimentados.
- Estudar a influência da velocidade do ar sobre a dinâmica de partículas no interior do sistema transportador;
- Investigar a partir da aplicação de um planejamento composto central (PCC) a influência da concentração de sólidos e velocidade do ar sobre a queda de pressão, região de aceleração e distribuição de sólidos;
- Verificar modelos disponíveis na literatura para previsão da queda de pressão em trechos horizontais e verticais na região de escoamento totalmente desenvolvido;
- Propor um modelo numérico para a predição da queda de pressão no transporte pneumático horizontal e vertical de biomassas utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD).

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Transporte Pneumático**

A busca por vantagem competitiva nas diversas indústrias é um importante estímulo para o desenvolvimento de novas soluções visando aprimorar procedimentos, simplificar sistemas e assegurar maior confiabilidade e disponibilidade de equipamentos. Nos mais variados setores industriais, uma das atividades essenciais é o transporte de materiais, o qual é objeto de análise para elevar a eficiência operacional. Dentre os métodos de transporte de materiais mais comumente empregados, destaca-se o sistema de transporte pneumático (CARVALHO, 2018).

O transporte pneumático é um mecanismo que realiza a movimentação do material suspenso numa corrente de gás, a distâncias horizontais ou verticais (PERRY, 1999). Nesse contexto, o transporte pneumático tem se destacado por sua capacidade de se adequar a espaços reduzidos e proporcionar elevadas taxas mássicas de sólidos durante o transporte (MAHURE et al., 2013).

Esse meio de transporte tem sido amplamente utilizado nas indústrias químicas, alimentícias, minerais, farmacêuticas, metalúrgicas, entre outras (YANG et al., 2020; 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 (GOMES, 2022).

Uma das principais vantagens é sua notável flexibilidade, permitindo a utilização de tubulações horizontais, verticais e curvas, combinadas de várias formas, o que torna o arranjo do sistema altamente adaptável ao projeto da planta quanto à operação. Além disso, o transporte fechado proporcionado pelo sistema permite que diversos tipos de materiais granulares, incluindo substâncias perigosas a granel, sejam deslocados sem causar problemas ambientais. Outro aspecto importante é a operação automatizada, o que resulta em redução dos custos de mão de obra, já que não exige uma supervisão e monitoramento constantes do processo (WANG et al., 2017; GOMES, 2022).

#### **3.2 Tipos de Transporte Pneumático**

Em uma planta de transporte pneumático, há diversos componentes essenciais projetados para atender condições operacionais específicas. Tipicamente, um sistema de transporte pneumático é dividido em diferentes zonas, onde operações distintas são executadas (GOMES, 2011). De acordo com Klinzing et al. (2010), um sistema de transporte pneumático

geralmente é composto por quatro zonas distintas, cada uma requerendo equipamentos específicos para otimizar o desempenho da planta.

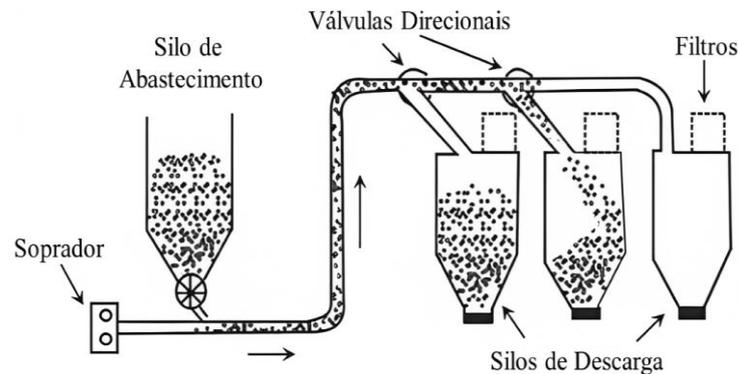
De acordo com Klinzing et al. (2010), as diferentes zonas de um sistema de transporte pneumático podem ser classificadas da seguinte forma:

- Fontes de fornecimento de gás: São responsáveis por fornecer a energia necessária para circular o gás através das tubulações. Diversos dispositivos, como compressores, ventiladores, sopradores e bombas de vácuo, atuam como motores principais no processo;
- Mecanismo de alimentação: Esta zona é encarregada de introduzir os sólidos na linha de transporte, utilizando dispositivos específicos de alimentação, como válvulas rotativas, alimentadores parafuso, entre outros;
- Linha de transporte: Essa zona é responsável por direcionar a mistura de gás e sólidos até o ponto de separação e descarga. Engloba todas as tubulações horizontais e verticais, curvas e outros componentes auxiliares que garantem o transporte eficiente dos materiais;
- Separação de sólidos: No final da linha de transporte, é necessário separar as partículas sólidas do fluxo de gás no qual foram transportadas. Para essa finalidade, podem ser utilizados ciclones, filtros de manga ou precipitadores eletrostáticos.

### **3.2.1 Transporte Pneumático em pressão positiva, negativa ou combinada.**

O sistema de pressão positiva é amplamente adotado como uma configuração predominante em transporte pneumático (MARCUS et al., 1990). Uma de suas principais vantagens é a capacidade de realizar descargas múltiplas, em que o material é alimentado de um ponto único e descarregado em diversos silos receptores, com a ajuda de válvulas direcionais, como ilustrado na Figura 1 (KLINZING et al., 2010).

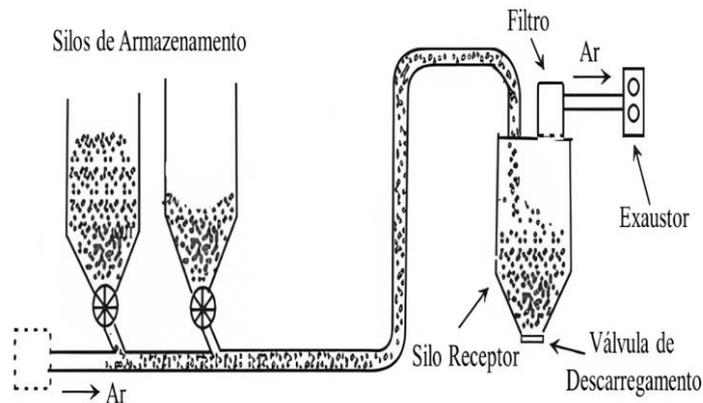
Figura 1 Sistema com Pressão Positiva



Fonte: Mills, Jones e Agarwal (2004).

Os sistemas de pressão negativa, ou vácuo, são amplamente utilizados para o transporte de materiais provenientes de várias fontes para um ponto central. Nesse tipo de sistema, a pressão ao longo do dispositivo de alimentação apresenta uma pequena variação, o que resulta em poucos problemas durante o processo. Como resultado dessa característica, o sistema de alimentação pode ser mais simples e econômico em comparação aos sistemas de pressão positiva (MILLS, 2016). A Figura 2 ilustra o funcionamento desse tipo de sistema:

Figura 2. Sistema com Pressão Negativa



Fonte: Mills (2016).

Os sistemas de pressão negativa são geralmente limitados a um vácuo de cerca de 0,4 bar, pelos tipos de sopradores e exaustores utilizados (RHODES, 2008). Em geral, sistemas de pressão negativa são usados para o transporte de material de diversos pontos de alimentação para apenas um ponto de descarga. Estes sistemas são largamente limitados em sua capacidade e distância (SANTOS, 2009).

Já os sistemas com pressão positiva e negativa combinados que compartilham um motor de ar comum representam um tipo muito versátil de transporte pneumático, que combina muitas das características vantajosas de ambos os sistemas. Pode ser utilizado para transportar o material de diferentes fontes para diversos locais de descarga, assim, é possível estender os sistemas de vácuo a distâncias muito mais longas (MILLS, 2016). Nesse tipo de sistema, a primeira seção da linha de transporte utiliza o sistema de sucção para aspirar o material e introduzi-lo na tubulação, enquanto a segunda seção emprega pressão positiva para transportar os sólidos a maiores distâncias (LOURENÇO, 2019).

### **3.3 Modo de Transporte Pneumático**

Para Klinzing et al. (1990), o transporte pneumático também pode ser classificado a partir da concentração de sólido no sistema, sendo assim denominados como transporte pneumático em fase diluída e em fase densa.

O transporte pneumático em fase densa é caracterizado por baixas velocidades de gás, concentrações de sólidos altas (maior que 30% em volume), altas quedas de pressão por unidade de comprimento do tubo e uma alta relação de carregamento impulsionando o material através da tubulação. É usado um compressor de ar de alta pressão como fonte de energia (RHODES, 2008; SANTOS, 2009). Neste modo de fluxo, as partículas não se encontram totalmente suspensas e as interações partícula-partícula e partícula-parede são significativas (RHODES, 2008).

Em relação ao transporte em fase diluída no sistema pneumático, a concentração volumétrica de sólidos dentro dos tubos durante a operação é menor que 1%, e as velocidades do fluxo normalmente são maiores que 10 m/s (MORAES, 2012). Nesse modo de transporte, as quedas de pressão por unidade de comprimento da linha são tipicamente baixas, geralmente inferiores a 500 Pa/m. Além disso, o transporte pneumático em fase diluída é adequado para trajetos curtos e permite o transporte contínuo de sólidos a taxas inferiores a 10 t/h, sendo notável por ser o único sistema capaz de operar sob pressão negativa. Nessas condições de fluxo, as partículas são transportadas completamente suspensas no gás, e as forças fluido-partícula predominam (GOMES, 2022; RHODES, 2008).

A distinção entre os escoamentos em fase diluída e em fase densa não possui fronteira claramente definida e ainda não há definições universalmente aceitas. Konrad (1986) propõe quatro critérios alternativos para distinguir o transporte em fase densa do transporte em fase diluída:

- A relação da carga de sólidos entre as taxas mássicas de sólidos ( $\dot{m}_s$ ) e de ar ( $\dot{m}_{ar}$ );

$$\phi = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_{ar}} \quad (1)$$

- Com base na concentração de sólidos;
- Considerando que o transporte em fase densa ocorre quando os sólidos preenchem completamente a seção transversal do tubo em algum ponto;
- Considerando que o transporte em fase densa ocorre em escoamento horizontal quando a velocidade do gás é insuficiente para sustentar todas as partículas em suspensão, e em escoamento vertical quando ocorre fluxo reverso de sólidos.

Segundo Klinzing et al. (2010), a forma mais adequada para a classificação dos modos de transporte pneumático seja baseada na concentração média de partículas na tubulação, que pode ser avaliada a partir da carga de sólidos, representada pela Equação 1. Esta classificação sugere que para cargas de sólidos entre 0 e 15, o transporte será dado em fase diluída, caso contrário, será realizado em fase densa.

Já em relação a concentração de sólidos, o modo de transporte pode ser definido como fase diluída, se a concentração volumétrica de sólidos nos tubos durante a operação é inferior a 1%, enquanto que para se caracterizar o modo de transporte como fase densa, a concentração volumétrica de sólidos nos tubos durante a operação deve ser superior a 30% (MORARES, 2012; LOURENÇO, 2019).

### 3.4 Regimes de Escoamento no Transporte Pneumático

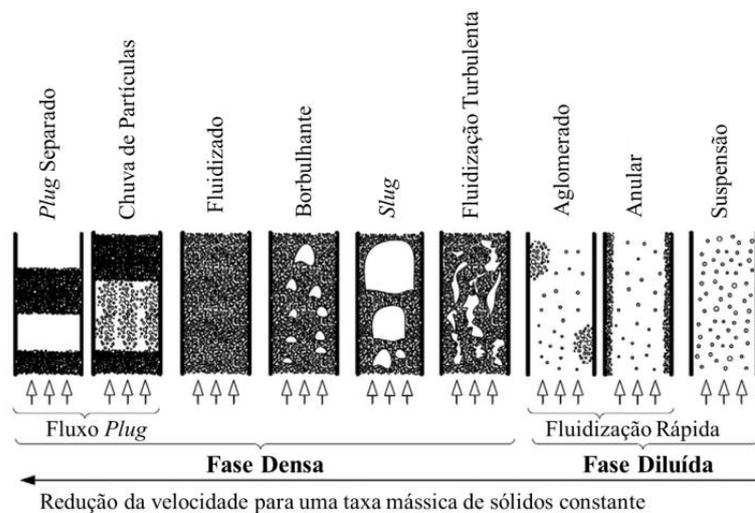
A redução da velocidade do gás, mantendo a mesma taxa de alimentação de sólidos, resulta em uma distribuição não uniforme na seção transversal da linha de transporte. Nesse cenário, é evidente que existe um limite pouco definido entre o escoamento em fase diluída e densa. Quando a vazão mássica de gás é reduzida para uma carga fixa de sólidos transportada, ocorre uma transição no padrão de escoamento da fase, passando de uma condição estável (fase diluída) para uma condição instável, conhecida como regime slug ou plug (pistonado). Ao diminuir ainda mais a vazão mássica do gás, o sistema passa para outra fase estável, que neste caso é denominada fase densa. No entanto, se a redução da velocidade não for suficiente para transportar adequadamente os sólidos, o sistema entra em um regime de bloqueio (FOKEER et al., 2004; LOURENÇO, 2019).

Portanto, na classificação do regime de transporte pneumático, é importante destacar que existem diferenças significativas entre o transporte em configuração vertical e horizontal, uma vez que as interações sólido-sólido, sólido-gás e sólido-parede são distintas em cada caso. Em

cada tipo de fase, diluída ou densa, observam-se diferentes padrões fluidodinâmicos, o que influencia diretamente o comportamento do transporte e sua dinâmica (LOURENÇO, 2019).

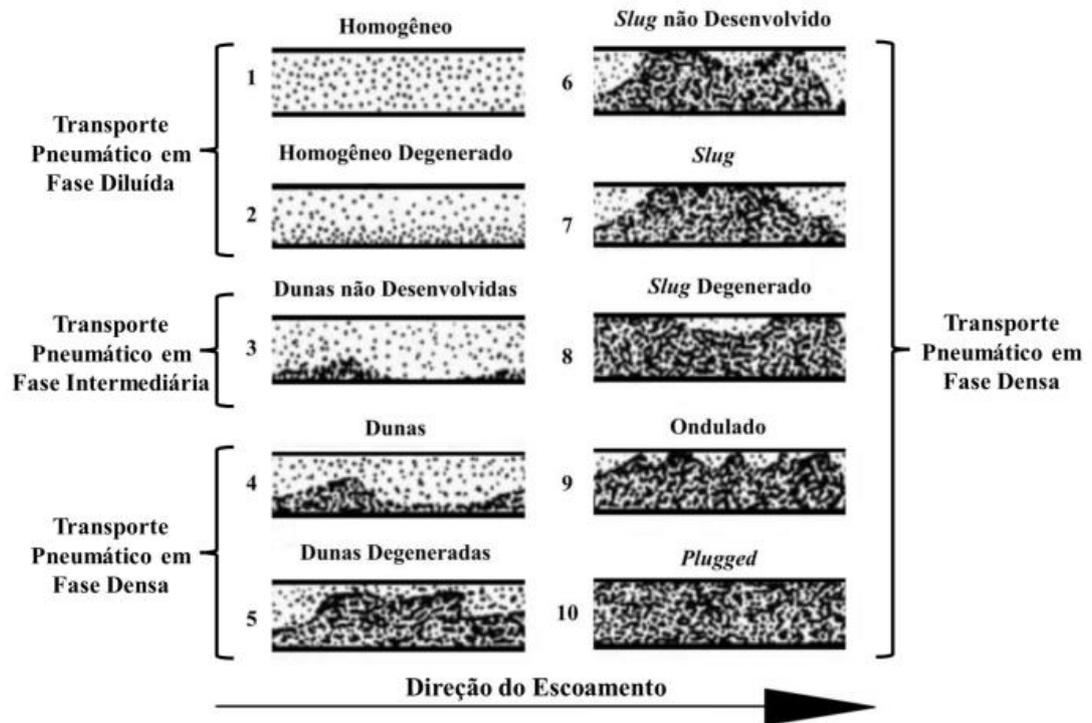
É muito importante diferenciar o modo de transporte do regime de escoamento no transporte pneumático (GOMES, 2022). O modo de transporte é definido como em fase densa ou diluída, conforme explanado anteriormente. Já o regime de escoamento, é estabelecido pelo perfil de distribuição de sólidos e gás no interior da tubulação durante o transporte (LOURENÇO, 2019), como pode ser observado nas Figuras 3 e 4, as quais representam os regimes de escoamento para o transporte pneumático vertical e horizontal, respectivamente, quando a velocidade do ar transportador é reduzida gradativamente, para uma taxa mássica de sólidos constante. O transporte horizontal tende a ser mais complexo que o vertical, por conta da assimetria no escoamento induzida pela gravidade agindo normal à direção do escoamento. Por conta desta força, a fase sólida tende a ocupar o fundo da tubulação (FOKEER et al., 2004).

Figura 3. Regimes de fluxo para o transporte pneumático vertical



Fonte: Rabinovich e Kalman (2011).

Figura 4. Regimes de fluxo para o transporte pneumático horizontal.



Fonte: Adaptado de Lourenço (2019).

### 3.5 Região de Aceleração e de Fluxo Totalmente Desenvolvido

A zona de aceleração de sistemas de transporte pneumático é caracterizada por uma intensa transferência de quantidade de movimento, já que as fases apresentam inicialmente perfis de velocidade muito discrepantes (MARCUS et al., 1990). O desenvolvimento do perfil de velocidade do escoamento de um fluido no interior de uma tubulação não ocorre instantaneamente. Na entrada, a distribuição da velocidade ao longo do diâmetro do tubo é aproximadamente uniforme. Depois de percorrer um determinado comprimento, um perfil de velocidade constante é estabelecido. A distância necessária para o desenvolvimento deste perfil é referida como comprimento de entrada. Da mesma forma, para um escoamento gás-sólido, um certo comprimento é necessário para as partículas atingirem sua velocidade final (ENICK; KLINZING, 1986).

Dessa forma, em um sistema de transporte pneumático, é possível identificar duas regiões, a zona de aceleração e a zona de fluxo totalmente desenvolvido. A região de aceleração é caracterizada pela aceleração das partículas ao serem introduzidas na linha ou ao mudarem a direção de escoamento após se chocarem em uma curva. As partículas que apresentavam velocidade nula ou muito baixa, passam a adquirir velocidades cada vez maiores ao serem carregadas pela corrente gasosa. Após uma determinada distância no duto, conhecida como

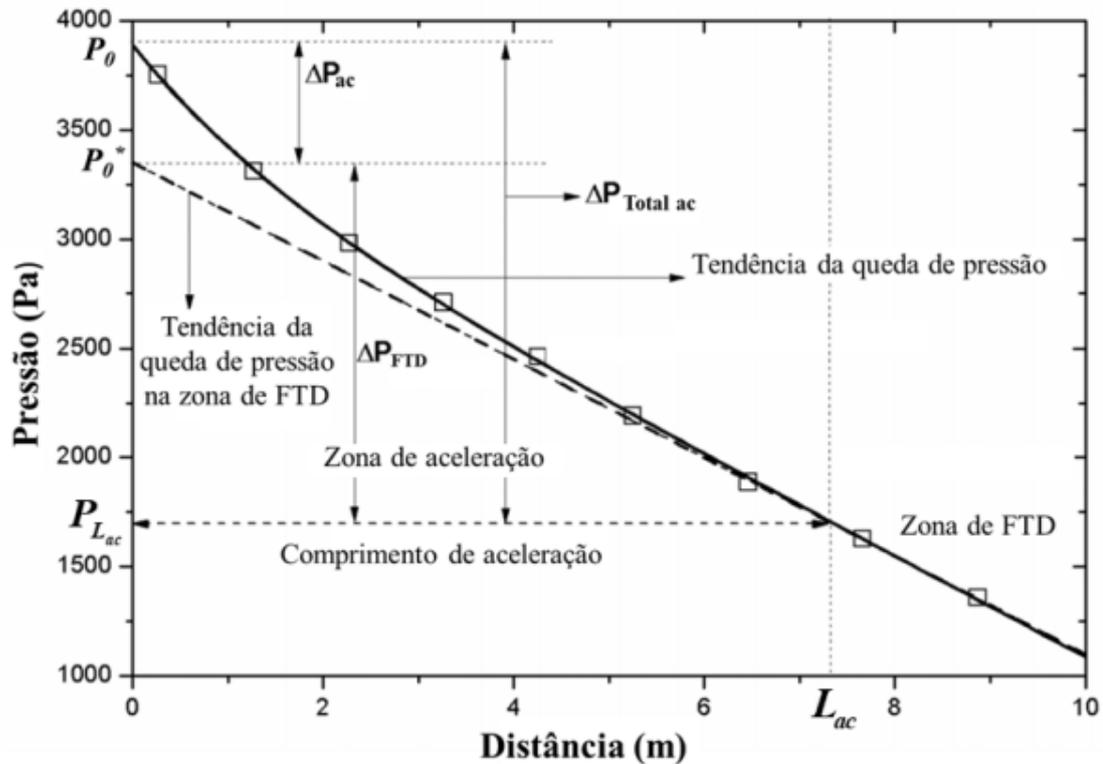
comprimento de aceleração, as partículas atingem uma velocidade média constante, indicando o início da região de fluxo totalmente desenvolvido (PATRO; DASH, 2014a; SANTO et al., 2018a; SANTO et al., 2018b; TRIPATHI; LEVY; KALMAN, 2018).

Ao projetar um sistema de transporte pneumático, o comprimento de aceleração não pode ser negligenciado, uma vez que a velocidade da partícula, a queda de pressão, as características de transferência de calor e massa e todas as interações partícula-partícula e partícula-parede variam muito ao longo dele. No momento em que a velocidade final das partículas é alcançada, essas quantidades permanecerão razoavelmente constantes. O comprimento de aceleração, portanto, deve ser determinado não apenas para garantir a validade de estudos anteriores que podem ter subestimado ou negligenciado seus efeitos, mas também para a obtenção de especificações de projeto adequadas (ENICK; KLINZING, 1986).

Esse comportamento fluidodinâmico é acompanhado ainda por mudanças nos perfis de concentração volumétrica, de turbulência (variação esta que favorece a mistura das fases) e outros parâmetros relacionados (LITTMAN et al., 1993). O comprimento dessa região é dependente ainda de diversos fatores do sistema, entre eles o número de Reynolds do escoamento, o diâmetro e a rugosidade do tubo de transporte, propriedades dos sólidos e concentração da fase particulada (BOVO e FERREIRA, 2004), além das configurações do alimentador de sólidos e do ponto de mistura das fases (SILVA, 1997; LOPES, 2007).

A princípio, identificar o comprimento de entrada parece muito simples, já que este ponto corresponde ao local do tubo de transporte onde o gradiente de velocidade é nulo. Entretanto, a realização de medidas precisas da velocidade local de um conjunto de partículas dispersas num meio fluido com escoamento turbulento é complexa (LOPES, 2011). Como alternativa, a aplicação das equações de continuidade e de quantidade de movimento para a mistura mostra que na região de fluxo totalmente desenvolvido (não acelerado) o perfil de pressão estática ao longo do trecho da tubulação tem comportamento linear (MARCUS et. al, 1990), isto é, a queda de pressão por unidade de comprimento é constante (PATRO; DASH, 2014a; SANTO et al., 2018a; SANTO et al., 2018b; TRIPATHI; LEVY; KALMAN, 2018).

Figura 5. Região de Aceleração e Fluxo Totalmente Desenvolvido



Fonte: Adaptado de Tripathi, Levy e Kalman (2018).

### 3.6 Predição da Queda de Pressão no Transporte Pneumático

A queda de pressão em um sistema de transporte pneumático é de suma importância na análise dos escoamentos, pois está diretamente relacionada aos requisitos de potência para os equipamentos como ventiladores, sopradores e bombas utilizados no processo (ÇENGEL; CIMBALA, 2007; CARVALHO, 2018).

Os pesquisadores que estudam sistemas de transporte pneumático têm dedicado consideráveis esforços para compreender o efeito de parâmetros fluidodinâmicos nesse contexto, e a queda de pressão é uma variável crucial para o correto dimensionamento do compressor utilizado na operação (MANJULA et al., 2016; LOURENÇO, 2019).

Existem diversas abordagens para estimar a queda de pressão, sendo a mais comum aquela que considera as contribuições individuais relacionadas à queda de pressão do ar e à queda de pressão dos sólidos (RAHEMAN; JINDAL, 2001). Essa abordagem foi observada e utilizada nos estudos de Vogli e White (1948), Hariu e Molstad (1949), Mehta, Smith e Comings (1957), Barth (1960a; 1960b), Capes e Nakamura (1973), Yang (1978 e 1974), Klinzing (1979), Weber (1981), Michaelides e Roy (1987), Barbosa e Pinho (2006), Patro e Dash (2014), Henthorn, Park e Curtis (2005), El-Behery, El-Haroun e Abuhegazy (2017), Naveh, Tripathi e Kalman

(2017), entre outros, para a predição da queda de pressão em trechos horizontais, verticais e em curvas.

De acordo com Henthorn, Park e Curtis (2005) e Rhodes (2008), ao considerar o fluido incompressível e desconsiderar os efeitos eletrostáticos, a queda de pressão total ao longo de um trecho reto, seja na direção vertical ou horizontal, pode ser calculada como a soma de seis termos: a contribuição da aceleração do gás ( $\Delta P_{ag}$ ), a contribuição da aceleração dos sólidos ( $\Delta P_{as}$ ), a perda de pressão devido ao atrito entre o gás e a parede ( $\Delta P_{fg}$ ), a perda de pressão devido ao atrito entre os sólidos e a parede ( $\Delta P_{fs}$ ), o peso do gás ( $\Delta P_{pg}$ ) e o peso dos sólidos ( $\Delta P_{ps}$ ). Esses termos podem ser expressos através da Equação (2) (GOMES, 2022).

$$\Delta P = \Delta P_{ag} + \Delta P_{as} + \Delta P_{fg} + \Delta P_{fs} + \Delta P_{pg} + \Delta P_{ps} \quad (2)$$

Geralmente, as partículas são aceleradas após serem alimentadas no sistema ou após passarem por curvas. A queda de pressão na região de aceleração pode ser estimada por meio da soma dos termos de queda de pressão associada à aceleração dos sólidos e do gás, conforme a Equação 3 (GOMES, 2022). No entanto, quando se trata de sistemas industriais com transporte de longas distâncias, os efeitos da aceleração se tornam menos significativos, conforme observado no estudo de Levy e Kalman (2018), que para uma tubulação de 10 m de comprimento, a queda de pressão de aceleração foi cerca de 25% da queda de pressão total da tubulação, enquanto que para uma tubulação com 100 m essa porcentagem foi reduzida para 4%.

$$\Delta P_{ac} = \Delta P_{ag} + \Delta P_{as} \quad (3)$$

É constatado que a depender das circunstâncias que o sistema pneumático é avaliado, pode-se desprezar alguns termos representados pela Equação 2. Nos casos em que o transporte é realizado na direção horizontal, os termos  $\Delta P_{pg}$  e  $\Delta P_{ps}$  podem ser desconsiderados, uma vez que a queda de pressão devido à gravidade não é tão significativa em comparação ao transporte vertical (RHODES, 2008; KLINZING et al., 2010). Dessa forma, a queda de pressão em sistemas de transporte pneumático horizontal pode ser representada pela Equação 4. (GOMES, 2022).

$$\Delta P = \Delta P_{ag} + \Delta P_{as} + \Delta P_{fg} + \Delta P_{fs} \quad (4)$$

Se o gás e os sólidos já foram acelerados na linha e se encontram em um escoamento completamente desenvolvido ou se a linha apresenta uma grande extensão, os dois primeiros termos da Equação 4 ( $\Delta P_{ag}$  e  $\Delta P_{as}$ ) podem ser desprezados. Dessa forma, ao restringir o estudo para um trecho horizontal na região de fluxo totalmente desenvolvido ( $\Delta P_{FTD}$ ), é possível representar apenas pela soma dos termos associados ao atrito do gás e ao atrito dos sólidos, conforme a Equação 5 (GOMES, 2022).

$$\Delta P_{FTD} = \Delta P_{fs} + \Delta P_{fg} \quad (5)$$

O escoamento monofásico de gás está bem estabelecido com modelos matemáticos confiáveis (RATNAYAKE, 2005). Klinzing et al. (2010) apresenta o modelo desenvolvido por Fanning, que corrobora para a parcela referente ao atrito do gás ( $f_g$ ), na qual geralmente é considerado independente da presença de sólidos (GOMES, 2022). Sendo, assim o termo  $\Delta P_{fg}$  pode ser calculado conforme apresentado na Equação 6:

$$\Delta P_{fg} = \frac{2 f_g \rho_g v_g^2 L}{D} \quad (6)$$

sendo:  $\rho_g$  e  $v_g$  a densidade e a velocidade do gás. L e D, são definidos como o comprimento e o diâmetro da tubulação, respectivamente.

Conforme o estudo de Klinzing et al. (2010), existem vários métodos para a obtenção do fator de atrito do gás. Em suma, para tubos lisos é recomendada a utilização da equação de Koo para a sua determinação (Equação 7).

$$f_g = 0,0014 + \frac{0,125}{Re^{0,32}}; 10^5 < Re < 3 \times 10^6 \quad (7)$$

Pesquisadores como Mehta, Smith e Comings (1957), Weber (1981, 1991), Barbosa e Pinho (2006), Pinho (1999, 2001), entre outros, analisaram a queda de pressão devido ao atrito dos sólidos com a parede de forma análoga à Equação 6 para fluxo monofásico, só que levando em consideração o fator de atrito dos sólidos,  $\lambda_s$ , como mostrado na Equação 8.

$$\Delta P_{fs} = \frac{2 \lambda_s \rho_s v_s^2 L}{D} \quad (8)$$

Sendo:  $\rho_s$  a densidade e  $v_s$  a velocidade do sólido.

Muitos esforços têm sido realizados para o desenvolvimento de correlações empíricas para a estimativa do fator de atrito dos sólidos e algumas delas se encontram apresentadas na Figura 6 (GOMES, 2022). Conforme pode ser verificado, Weber (1991) propôs uma correlação independente da velocidade do sólido. Já Capes e Nakamura (1973) indicaram que  $\lambda_s$  é inversamente proporcional à velocidade do sólido. No trabalho de Yousfi e Gau (1974), foram obtidos fatores de atrito praticamente constantes, cujos valores foram de 0,0015 para partículas de poliestireno e 0,003 para partículas de vidro. Outros pesquisadores sugeriram que  $\lambda_s$  é dado em função da velocidade relativa entre o gás e a partícula ( $v_{rl}$ , *slip velocity*), diâmetro da partícula, diâmetro do tubo, velocidade do gás e densidade do gás e do sólido (HINKLE, 1953; MEHTA; SMITH; COMINGS, 1957; YANG, 1974; BARBOSA; PINHO, 2006; PINHO, 2001). De acordo com Klinzing et al. (2010), a velocidade relativa é a velocidade resultante entre o fluido e o sólido, proveniente das interações partícula-partícula e partícula-parede. Sua determinação é essencial para a modelagem e compreensão do fluxo gás-sólido. Apesar de sua relativa importância, existe uma grande dificuldade para a obtenção de medidas precisas dessa grandeza.

Figura 6. Correlações para a estimativa da queda de pressão e do fator de atrito dos sólidos.

Referência	Direção	$\Delta P_{fs}$	$\lambda_s$
Hinkle (1953)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	$\frac{3C_D \rho_g D (v_g - v_z)^2}{8\rho_z d_p v_z^2}$
	Vertical	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	
Mehta et al. (1957)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z v_z^2 L}{D}$	$\frac{3C_D \rho_g D (v_g - v_z)^2}{8\rho_z d_p v_z}$
	Vertical	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	
Capes e Nakamura (1973)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	$0,048 v_z^{-1,22}$
	Vertical	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	
Yang (1974)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	$0,0293 \frac{1 - \varepsilon_z}{\varepsilon_z^3} \left( (1 - \varepsilon_z) \frac{v_z}{v_g - v_z} \frac{v_g}{(gD)^{1/2}} \right)^{-1,15}$
Klinzing e Mathur (1981)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	$\frac{55,5 D^{1,1}}{v_z^{0,64} d_p^{0,26} \rho_z^{0,91}}$
	Vertical	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	
Webber (1991)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z v_z^2 L}{D}$	$1,315 \phi^{0,711} \left( \frac{v_z^2}{gD} \right)^{-1,047}$
	Vertical	$\frac{2\lambda_z \rho_z (1 - \varepsilon_z) v_z^2 L}{D}$	
Pinho (2001)	Horizontal	$\frac{2\lambda_z \rho_z v_z^2 L}{D}$	$\lambda_z = a \phi^b Fr^c \left( \frac{d_p}{D} \right)^e \left( \frac{\rho_z}{\rho_g} \right)^f$

*a, b, c, e e f* são parâmetros empíricos

No trabalho de Patro e Dash (2014b), foram realizadas simulações numéricas para analisar o efeito das propriedades das partículas, da velocidade do gás, do diâmetro da tubulação e da carga de sólidos, na previsão de queda de pressão em escoamentos gás-sólidos. A partir dos dados obtidos, os autores desenvolveram uma correlação simplificada para a queda de pressão na região de escoamento totalmente desenvolvido em trecho horizontal, utilizando um multiplicador de duas fases. Ao contrário das correlações existentes, o modelo sugerido apresenta validade para uma ampla variedade de tamanhos de partículas, diâmetros de tubo e cargas de sólidos (GOMES, 2022). Na Equação 9 é apresentada a correlação para partículas com diâmetro maior ou igual a 50  $\mu\text{m}$ .

$$\frac{\Delta P_{FTD}}{L} = \frac{\Delta P_{fg}}{L} (0,000345\phi + 0,652)^{1,3637} [0,063\left(\frac{d_p}{D}\right)^3 - 0,572\left(\frac{d_p}{D}\right)^2 + 1,15\left(\frac{d_p}{D}\right) + 2,513] \quad (9)$$

### 3.7 CFD no Transporte Pneumático

Uma das principais dificuldades para uma previsão precisa do desempenho do sistema de transporte pneumático reside na insuficiente compreensão das influências das propriedades dos materiais no regime de escoamento dentro das tubulações. Portanto, torna-se crucial o aprofundamento do conhecimento acerca da complexidade física subjacente ao escoamento gás-sólido. Para alcançar esse entendimento, torna-se necessário desenvolver abordagens experimentais para medição, equações que abranjam o comportamento multifásico confirmadas por meio de experimentos e também ferramentas de simulação numérica, como a fluidodinâmica computacional (CFD) (MANJULA et al., 2016).

A técnica de CFD (do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) permite a solução de um conjunto de equações diferenciais acopladas, que expressam a conservação da massa, energia e movimento em um sistema (NASCIMENTO, 2014).

Dentre as pesquisas documentadas na literatura que empregaram a análise CFD com o intuito de auxiliar na compreensão e previsão do escoamentos gás-sólido em sistemas de transporte pneumático, destaca-se o estudo conduzido por Patro e Dash (2014). Nesse estudo, a metodologia Euler-Euler foi empregada, incorporando a teoria cinética referente ao escoamento granular, para investigar os atributos relacionados à queda de pressão e a fluidodinâmica associada aos escoamentos gás-sólido em tubos horizontais. O modelo concebido foi validado por meio de resultados experimentais previamente documentados na literatura. Através das simulações realizadas, os pesquisadores propuseram uma correlação para prever a queda de pressão na zona de fluxo completamente desenvolvido. O conjunto de dados

possibilitou a formulação de uma relação que facilita a estimativa da queda de pressão nessa região de escoamento (GOMES, 2022).

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 ETAPA PRIMÁRIA

Na etapa primária do trabalho foi realizada a revisão bibliográfica sobre o transporte pneumático, abordando diferentes aspectos, como os modos e tipos de transporte pneumático, os parâmetros físicos das partículas e do fluido envolvido, bem como os regimes de escoamento relevantes. Além disso, a revisão incluiu a compreensão e aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD), assim como a verificação de modelos disponíveis na literatura para previsão da queda de pressão em trechos horizontais e verticais na região de escoamento totalmente desenvolvido.

### 4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

Na etapa de pré-processamento (tratamento dos dados), foi realizado inicialmente a partir do *software* Statistica, o Planejamento Composto Central (PCC), para uma investigação preliminar a respeito do efeito de algumas variáveis na linha de transporte no sistema pneumático. Posteriormente foi obtida a caracterização das biomassas do estudo de Gomes (2022), bem como a confecção da geometria do corpo de estudo (leito pneumático) e sua malha. Nesse intuito, foi adotado o *software* Onshape para geração da geometria, e o OpenFoam, para a criação da malha.

#### 4.2.1. Planejamento Composto Central

O Planejamento Composto Central (PCC) é uma metodologia para estudo de superfícies de respostas, mediante  $k$  variáveis de entradas, analisando sua influência na variável de saída. Nesse contexto, o PCC é amplamente utilizado por utilizar poucos ensaios – se comparado a outras técnicas. O método é formado por 3 partes:  $k^2$  pontos fatoriais,  $2k$  pontos axiais e o ponto central (MENDONÇA, 2012).

Para uma investigação preliminar a respeito do efeito de algumas variáveis na eficiência de alimentação das biomassas no sistema de transporte pneumático, um planejamento composto central (PCC) foi realizado para cada material. As variáveis independentes adotadas foram a velocidade do ar transportador e a concentração da fase granular.

Por possuir 2 fatores, o PCC foi composto por quatro pontos fatoriais, quatro pontos axiais e dois pontos centrais, resultando em 10 experimentos. Entretanto, como os dois pontos centrais possuíam condições totalmente iguais, replica no ponto central, e por se tratar de um estudo numérico foram avaliados apenas 9 condições conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Planejamento Composto Central

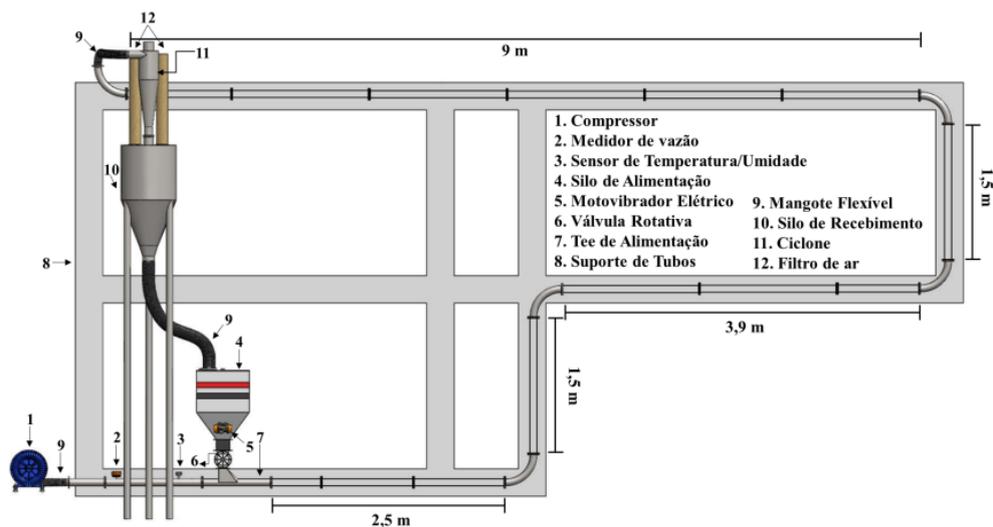
Simulação	Velocidade do Ar (m/s)	Concentração de Sólidos (% v)
1	6,0	5,0
2	6,0	25,0
3	14,0	5,0
4	14,0	25,0
5	4,3	15,0
6	15,6	15,0
7	10,0	0,86
8	10,0	29,1
9 (C)	10,0	15,0

Fonte: Autor, 2023.

#### 4.2.2. Geometria

A geometria desenvolvida tem como referência o aparato experimental desenvolvido por Gomes (2022). A unidade de transporte pneumático apresenta em sua composição um compressor radial duplo IBRAM de 10 CV, 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 apresentado na Figura 7.

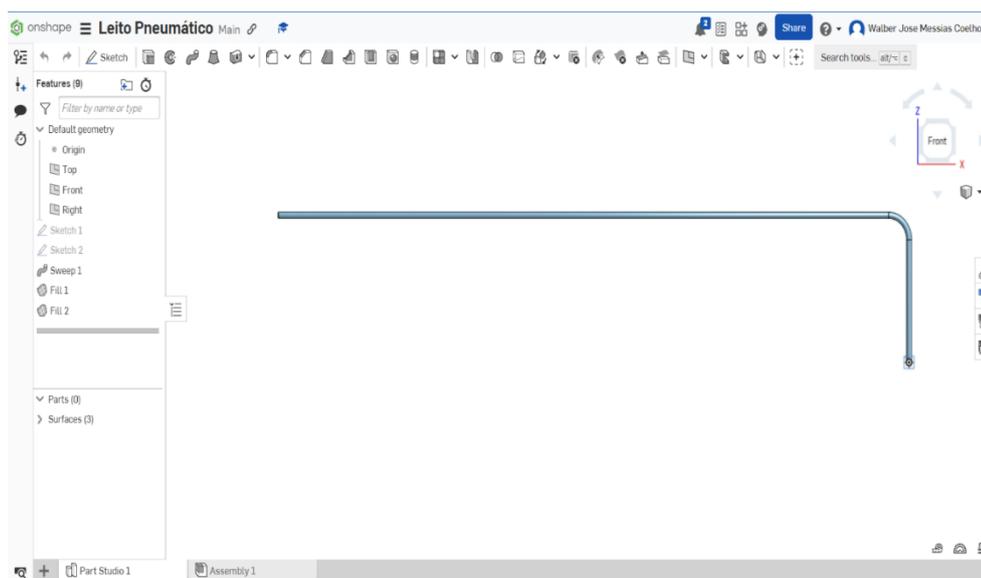
Figura 7. Aparato do sistema de transporte pneumático



Fonte: GOMES (2022)

A partir do aparato geométrico construído por Gomes (2022) na Figura 7, foi feita a construção da geometria no *software* Onshape, onde apenas a parte final do trecho da tubulação foi considerada, englobando trecho vertical, curva e horizontal no estudo como demonstrado na Figura 8.

Figura 8. Aparato do sistema de transporte pneumático no Onshape.



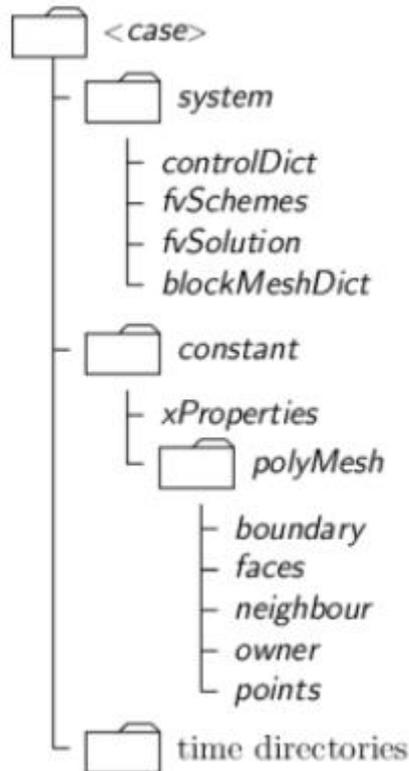
Fonte: Autor, 2023

### 4.2.3. Criação da Malha

Como a unidade piloto de transporte pneumático utilizada neste estudo possui uma grande extensão e o foco do trabalho está na avaliação do transporte vertical, horizontal e curva de biomassas em fase diluída e densa, apenas uma região da unidade foi adotada para a realização do estudo numérico. Sendo assim, o objeto de estudo corresponde a um trecho vertical de 1,5 m, uma curva com raio de curvatura de 0,3 m e um trecho horizontal de 9 m. A curva foi avaliada com o intuito de descrever melhor o comportamento das partículas, uma vez que ela é responsável pela mudança de direção da trajetória do escoamento gás-sólido.

O OpenFoam (do inglês, Open Source Field Operation and Manipulation) é um *software* gratuito e de código aberto desenvolvido em 2004 pela OpenCFD Ltd sendo utilizado para fins comerciais e acadêmicos nas mais diversas áreas da engenharia. É essencialmente construído e desenvolvido na linguagem de programação C++ e apresenta uma estrutura de arquivos padronizada que se divide nas pastas: system, constante e times (FATTI, 2021).

Figura 9. Estrutura de arquivos no OpenFoam



Fonte: OpenFoam

A seguir temos a definição abordada em cada pasta presente no OpenFoam:

- *system*: Contém os parâmetros relativos ao procedimento do solucionador que será executado. São três os arquivos essenciais (*ControlDict*, *fvSolution* e *fvScheme*) que tal pasta deve conter.
- *controlDict*: Contém parâmetros da execução da simulação tais como, o tempo que a simulação irá ocorrer, número de Courant, *timestep* da simulação, tempo para escrita dos dados simulados, entre outras atribuições.
- *fvSolution*: Define os solucionadores para cada variável que será calculada – pressão, velocidade, massa específica, fração da fase particular - junto com a tolerância aceitável e a quantidade mínima de iterações.
- *fvScheme*: Define os métodos discretizadores que serão utilizados para cada operação matemática: derivada total, gradiente, divergente, laplaciano, interpolação, dentre outros.
- *constant*: Tem a descrição das constantes do problema a ser simulado. Contém uma subpasta denominada *polyMesh* que contém a malha da geometria definida. Alguns exemplos de constantes são: gravidade, propriedades físicas das fases (massa específica, calor específico) e definição do modelo de turbulência a ser utilizado.

- *times*: Contém as variáveis que serão simuladas. Tal pasta inicia com a subpasta '0', que apresenta as condições iniciais e de contorno para todas as variáveis da simulação. No andamento da simulação, mais pastas serão criadas, com o resultado da simulação, no tempo de escrita que foi definido pelo parâmetro escolhido na pasta system.

O OpenFOAM contém uma variedade de *solvers* que são adequados para simulações de uma ampla variedade de casos em dinâmica de fluidos computacional (CFD). Esses *solvers* são programas específicos projetados para resolver equações matemáticas que descrevem o comportamento dos fluidos, enquanto a compressibilidade, transferência de calor, reações químicas e escoamento multifásico. Além disso, apresenta utilidades, que são comandos para realizar alguma manipulação dentro do OpenFoam. Alguns exemplos são: blockMesh (construção da malha a partir de uma geometria); setFields (definição de propriedades físicas dentro de limites geométricos).

#### 4.2.4. Obtenção da Caracterização da Biomassa

As biomassas utilizadas e todo estudo de caracterização, tem como referência o trabalho desenvolvido por Gomes (2022). O sabugo de milho (SMI) foi fornecido pela empresa JC Rações e Insumos Siderúrgicos LTD da cidade de Uberlândia, já processado, enquanto que o farelo de trigo (FTR), foi utilizado conforme fornecido comercialmente, sem processamentos adicionais conforme apresentado na Figura 10 (GOMES,2022).

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 no estudo de Gomes (2022).

Figura 10. Materiais granulares do estudo



Fonte: Gomes (2022)

Já na Tabela 3 estão apresentados os valores médios de todas as propriedades avaliadas para cada material, com os seus respectivos desvios padrão.

Tabela 2. Propriedades das biomassas

Material	Grupo Geldart	$d_s$ ( $\mu\text{m}$ )	$\rho_{ba}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_{bc}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_s$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$\rho_{real}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$U_{bs}$ (%)	$\alpha$ ( $^\circ$ )	HR (-)	$\Psi$ (-)
<b>SMI</b>	B	650,21	252,16	307,19	865,20	1368,6 $\pm$	9,56	34,41	1,22	0,65
		$\pm$ 24,69	$\pm$ 3,41	$\pm$ 5,04	$\pm$ 15,48	$\pm$ 10,5	$\pm$ 0,08	$\pm$ 1,55	$\pm$ 0,01	$\pm$ 0,03
<b>FTR</b>	B	338,92	318,19	455,04	1069,36	1392,4	12,68	41,03	1,43	0,62
		$\pm$ 18,35	$\pm$ 3,53	$\pm$ 3,49	$\pm$ 3,22	$\pm$ 5,3	$\pm$ 0,21	$\pm$ 1,24	$\pm$ 0,02	$\pm$ 0,03

Fonte: GOMES (2022)

### 4.3. PROCESSAMENTO

Na etapa de processamento, foi feito o estudo da simulação numérica no OpenFoam, um *software* amplamente utilizado para simulações computacionais. Os materiais granulares utilizados neste estudo foram o sabugo de milho processado e farelo de trigo, utilizando o ar atmosférico como fluido no processo (GOMES, 2022). A partir dessa etapa, foram obtidos dados e informações relevantes sobre os fenômenos envolvidos no transporte pneumático.

### 4.4. PÓS-PROCESSAMENTO

Posteriormente foi utilizado o *software* Paraview 5.12 para análise qualitativa, a qual permitiu compreender os fenômenos envolvidos no transporte pneumático, fornecendo informações importantes, como: perfil de concentração de sólidos e perfil de pressão estática para a interpretação dos resultados obtidos qualitativa e quantitativamente.

Por fim, no estágio de pós processamento, foi obtido uma análise acerca dos resultados obtidos durante a simulação. Para isso, será utilizado o planejamento estatístico para analisar a relação entre as variáveis dependentes (queda de pressão e região de aceleração) e independentes (concentração de sólidos e velocidade do fluido). Os resultados obtidos nas etapas anteriores serão então analisados e interpretados em conjunto, avaliando o desempenho do transporte pneumático em diferentes condições e parâmetros. A partir dessa avaliação, foi realizada a comparação e validação com dados experimentais disponíveis na literatura. Essa comparação foi essencial para verificar a precisão das simulações e a validade dos resultados obtidos, garantindo a confiabilidade das conclusões.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações utilizando o OpenFoam geraram 500 passos de tempo. Os passos de tempo referem-se à discretização do tempo em intervalos finitos durante os quais as equações que determinam o comportamento do sistema pneumático são resolvidas numericamente. Além disso é importante ressaltar que mais de 500 *Gigabytes* de dados foram gerados em todo o estudo, e que o tempo médio de algumas simulações chegaram a totalizar mais 310 horas (aproximadamente 13 dias).

A partir disso, todos os arquivos foram carregados no *software* Paraview para pós-processamentos das simulações referente aos dois materiais de estudos (farelo de trigo e sabugo de milho). Essa ferramenta computacional permitiu gerar diversas configurações gráficas para verificar os fenômenos físicos envolvendo o sistema pneumático no que se refere aos aspectos quantitativos e qualitativos.

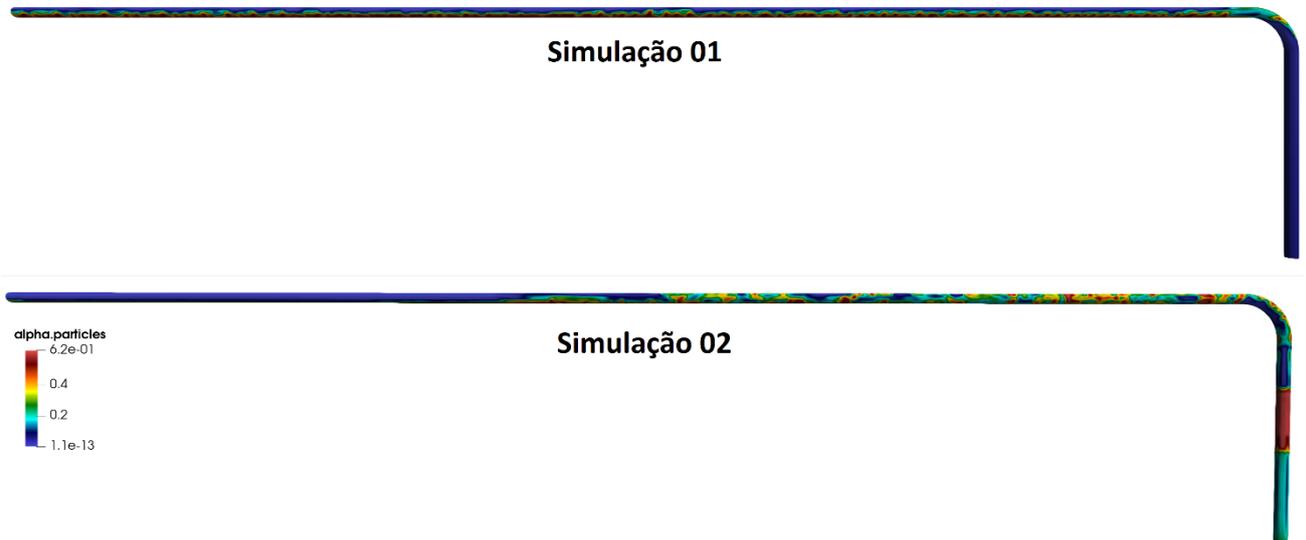
### 5.1 Análise Qualitativa

Utilizando os resultados gerados pelo *software* Paraview foi feita a análise qualitativa separadamente das biomassas do estudo (sabugo de milho e farelo de trigo). A seguir é apresentado avaliações comparativas entre as simulações, verificando a influência significativa das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes, assim como a identificação do modo de transporte (fase diluída e fase densa) em determinados trechos da tubulação.

#### 5.1.1 Avaliação do material particulado: sabugo de milho

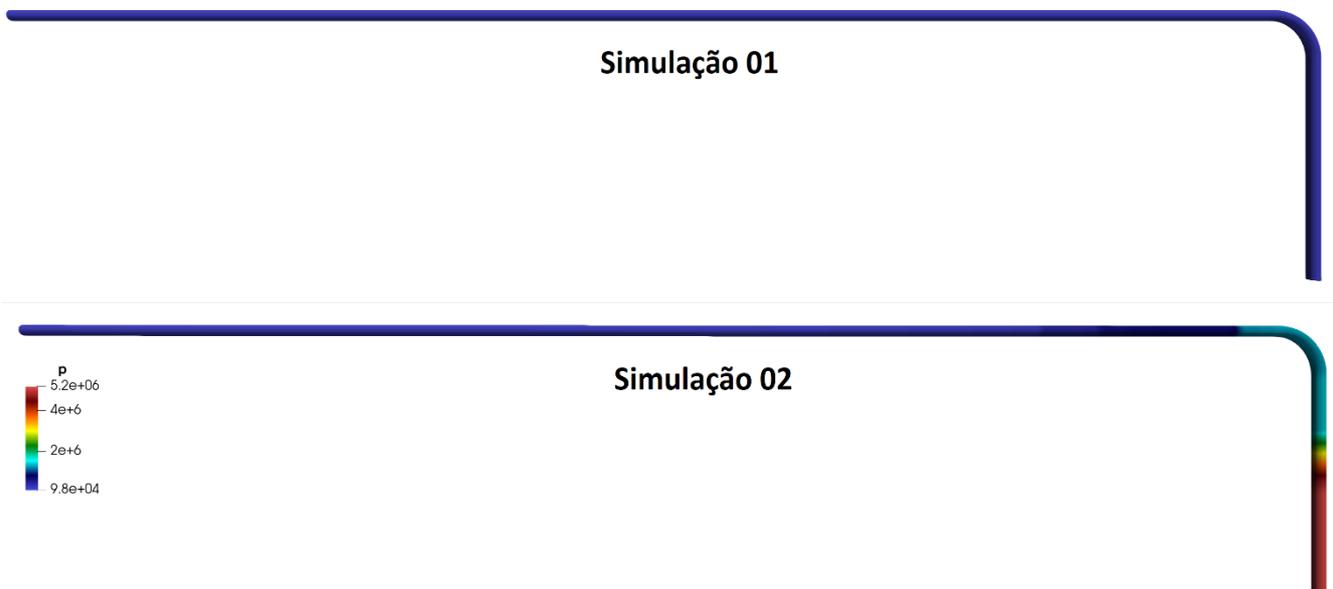
A seguir, a partir das Figuras 11 a 14, temos a representação da fração de partículas e pressão ao longo de todo o sistema pneumático para a biomassa do sabugo de milho nas respectivas simulações

Figura 11. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do SMI.



Fonte: Autor (2024).

Figura 12. Pressão no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do SMI.



Fonte: Autor (2024)

Pode-se observar, a partir fração de partículas e pressão ao longo da tubulação de cada uma das simulações, que de fato há um aumento brusco da queda de pressão na simulação 02 ao analisar a Figura 12, em razão do efeito significativo do aumento da concentração de sólidos

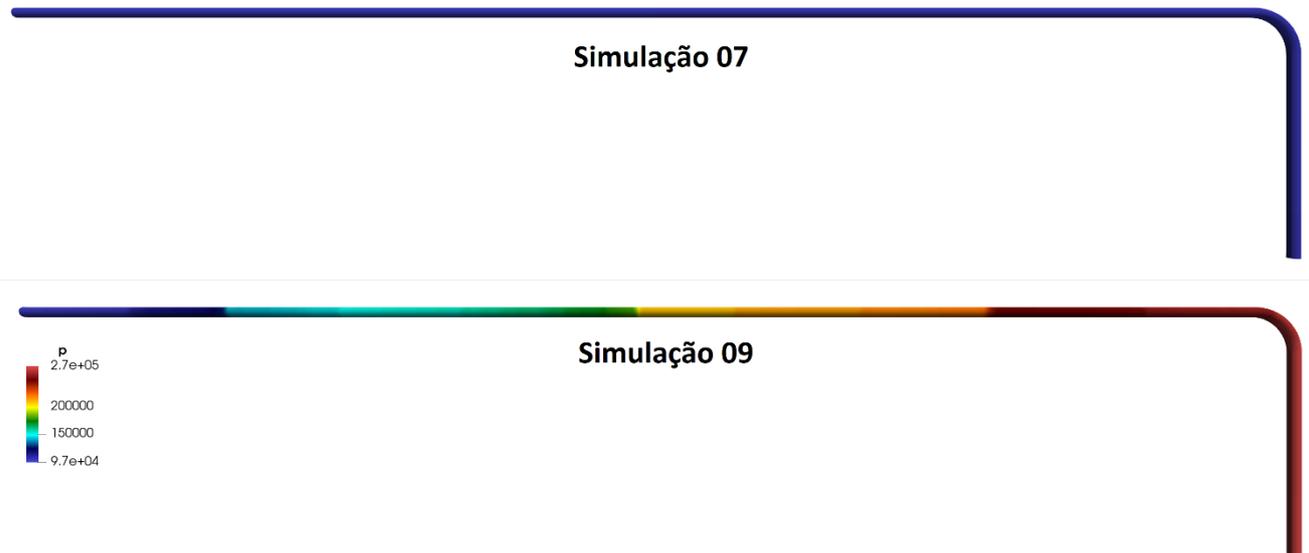
presentes. Entretanto, a simulação 01 manteve-se com variações mínimas ao longo de toda a tubulação em relação a queda de pressão.

Sabe-se que o aumento do número de partículas na linha 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; MURUGAN, 2014). Além disso, à medida que a concentração de sólidos aumenta, a resistência ao fluxo de partículas aumenta, o que também resulta em uma queda de pressão mais expressiva (ARIYARATNE, 2018).

A fase diluída é definida como um regime de fluxo, no qual as partículas são transportadas em um fluxo de ar em baixa concentração. Nesse regime, as partículas são transportadas em um fluxo de ar ou gás em que a densidade das partículas é significativamente menor do que a densidade do fluido transportador, sendo caracterizado por uma distribuição uniforme de partículas em todo o trecho vertical e uma velocidade de transporte relativamente alta (N.M. TRIPATHI et al., 2018). Sendo assim, é observado através das imagens da simulação 01 (Figuras 11 e 12), que a fase diluída é predominante e evidente no trecho vertical da tubulação, na qual a concentração de sólidos teve influência significativa para a formação desse regime de fluxo.

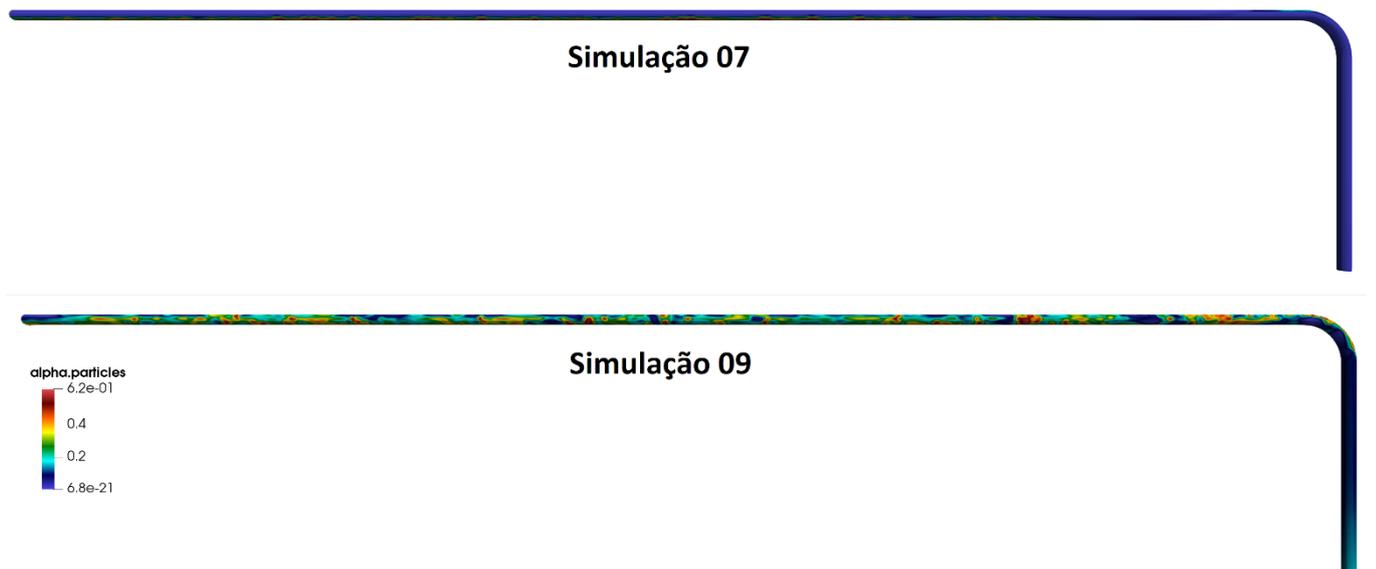
Entretanto, observa-se que não há a formação característica do regime de fluxo da fase diluída na simulação 02 (Figura 11). Desta forma, pode-se inferir que a concentração de sólidos pode afetar a formação da fase diluída em um sistema de transporte pneumático vertical. Em sistemas com concentrações de sólidos mais elevadas, é mais provável que ocorram regimes de fluxo diferentes, como a fase densa, em que a densidade de partículas é significativamente maior do que a do fluido transportador (ar). Isso pode resultar em um comportamento de fluxo diferente, com características distintas em comparação com a fase diluída, sabendo que o regime em fase densa pode ser definido como o regime de transporte de partículas pelo gás ao longo de um tubo que está cheio de partículas em uma ou mais seções transversais (KONRAD, 1986). Nesse caso, as partículas não estão totalmente suspensas e as colisões entre partículas dominam o movimento dos sólidos (FOOKEER et al., 2004).

Figura 13. Pressão no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do SMI.



Fonte: Autor (2024)

Figura 14. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do SMI.



Fonte: Autor (2024)

Assim como foi estabelecida a comparação que diferencia em termos de concentrações de sólidos nas simulações 01 e 02, as discussões e explicações físicas são similares ao que se apresenta nas simulações 07 e 09 através das Figuras 13 e 14.

Pode-se observar a partir da pressão ao longo da tubulação de cada uma das simulações, que de fato há um aumento brusco da queda de pressão na simulação 09, em razão da expressiva concentração de partículas presente, uma vez que as velocidades do ar são iguais para ambas as

simulações conforme apresentado no planejamento composto central na Tabela 1. Em termos comparativos, a simulação 07 manteve-se com variações mínimas ao longo de toda a tubulação em relação a queda de pressão, não apresentando efeitos significativos em razão da baixa concentração de sólidos.

Conforme já previamente justificado, segundo Patro e Murugan (2014), é notório que o incremento na taxa de sólidos no transporte pneumático acarreta em um aumento no número de partículas ao longo da linha, o que por sua vez intensifica as interações e colisões entre as próprias partículas, assim como a paredes do sistema pneumático. Este fenômeno resulta em um maior consumo de energia e em uma elevação significativa da queda de pressão no sistema. Adicionalmente, conforme a concentração de sólidos aumenta, é observado um aumento na resistência ao fluxo das partículas, contribuindo acentuadamente para uma queda de pressão mais expressiva (ARIYARATNE, 2018).

Em relação ao modo de transporte pneumático, observa-se que há a predominância do regime em fase diluída nos trechos verticais em ambas as simulações. No entanto, ao verificar as curvas e os trechos horizontais percebe-se um perfil antagônico na distribuição e concentração de partículas nessas regiões, pois a distribuição da biomassa ao longo da tubulação permanece uniforme na simulação 07, caracterizando a permanência do regime em fase diluída, enquanto que na simulação 09 observa-se a transição para o regime em fase densa.

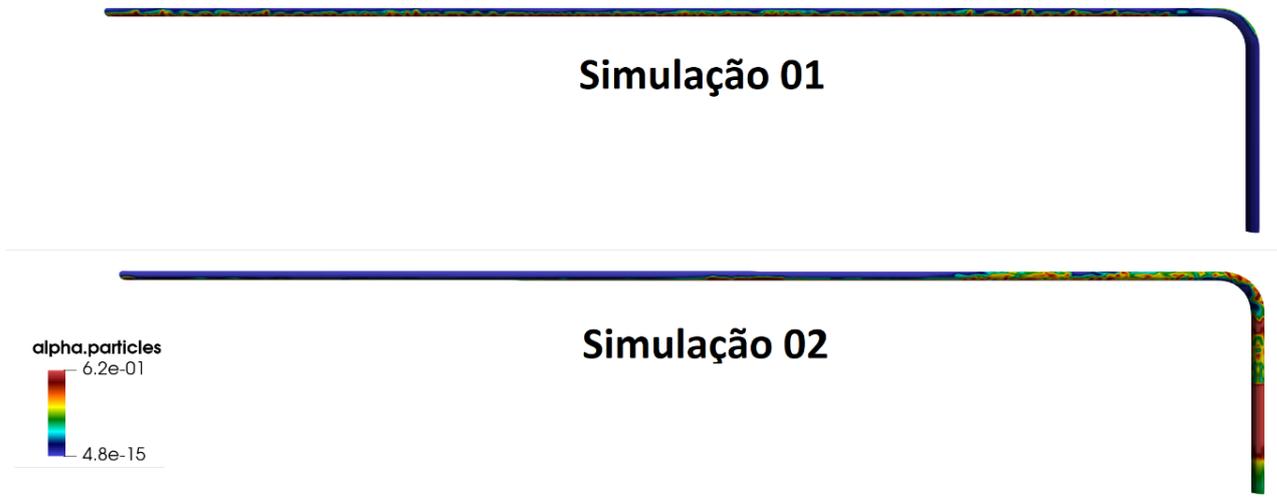
Segundo Moraes (2012), em relação ao transporte em fase diluída, a concentração volumétrica de sólidos nos tubos durante a operação é inferior a 1% e as velocidades normalmente são maiores que  $10 \text{ m.s}^{-1}$ , constatando-se que segundo a literatura o comportamento avaliado na simulação 07 corresponde e é respaldado pelas evidências científicas.

Em sistemas onde a concentração de sólidos é mais alta, como verificado na simulação 09, fica evidenciado a ocorrência do regime de escoamento em fase densa, na qual a concentração de sólidos é muito expressiva ao longo de todo o trecho horizontal do sistema pneumático conforme verificado na Figura 14.

### **5.1.2 Avaliação do material particulado: farelo de trigo**

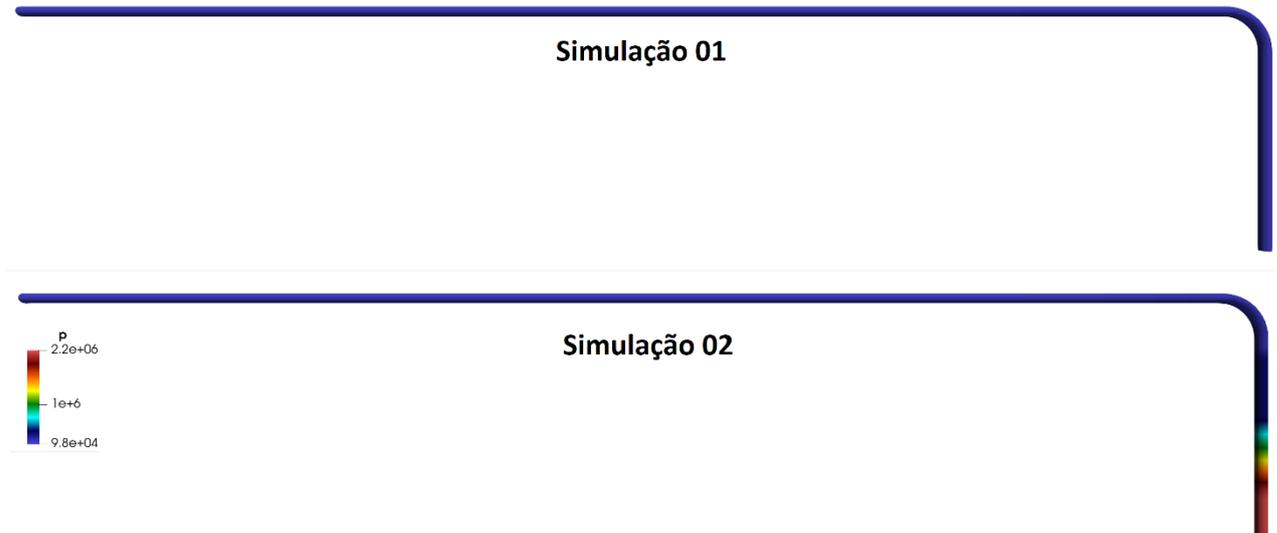
A seguir, a partir das Figuras 15 a 22, temos a representação da fração de partículas e pressão ao longo de todo o sistema pneumático para a biomassa do farelo de trigo.

Figura 15. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 16. Pressão no sistema pneumático das simulações 01 e 02 do FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar a partir fração de partículas e pressão ao longo da tubulação de cada uma das simulações, que de fato há um aumento sútil da queda de pressão na simulação 02 no trecho vertical da tubulação, em razão da grande concentração de partículas presentes. Entretanto, a simulação 01 manteve variações mínimas ao longo de toda a tubulação em relação a queda de pressão.

Uma observação importante a ser destacada é que quando há a comparação das mesmas simulações (Figura 17 e 18) com as diferentes biomassas (sabugo de milho e farelo de trigo), há uma diferença discrepante na queda de pressão, principalmente na simulação 02, onde a

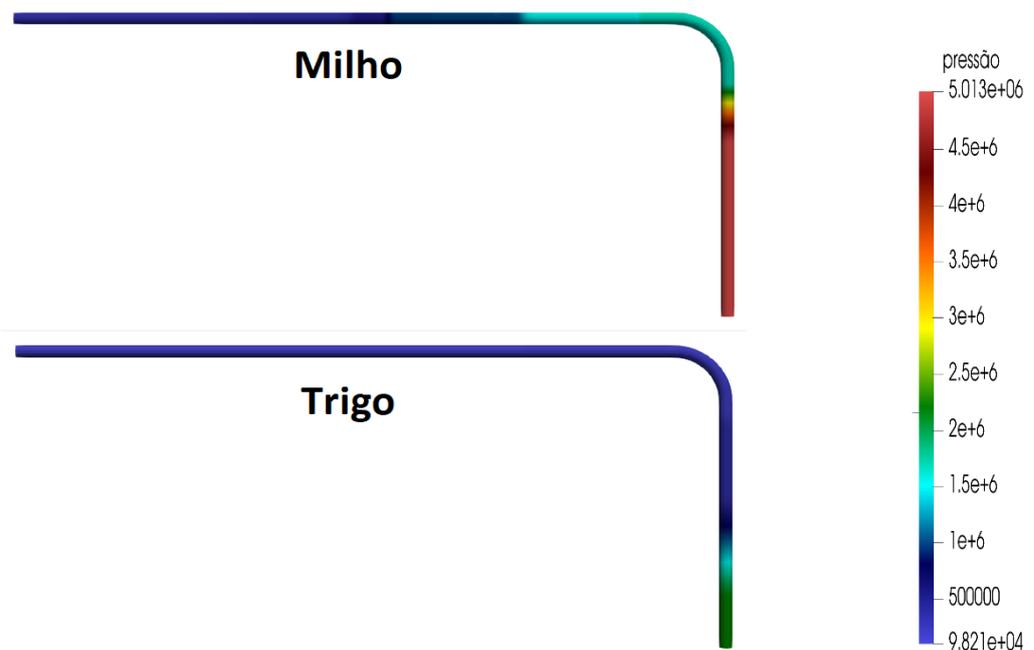
concentração de sólidos é mais expressiva. Logo, pode-se inferir que de fato as propriedades físicas das partículas foram determinantes para se obter comportamentos diferentes ao longo da tubulação.

Figura 17. Fração de partículas no trecho da tubulação na simulação 2 para SMI e FTR



Fonte: Autor (2024)

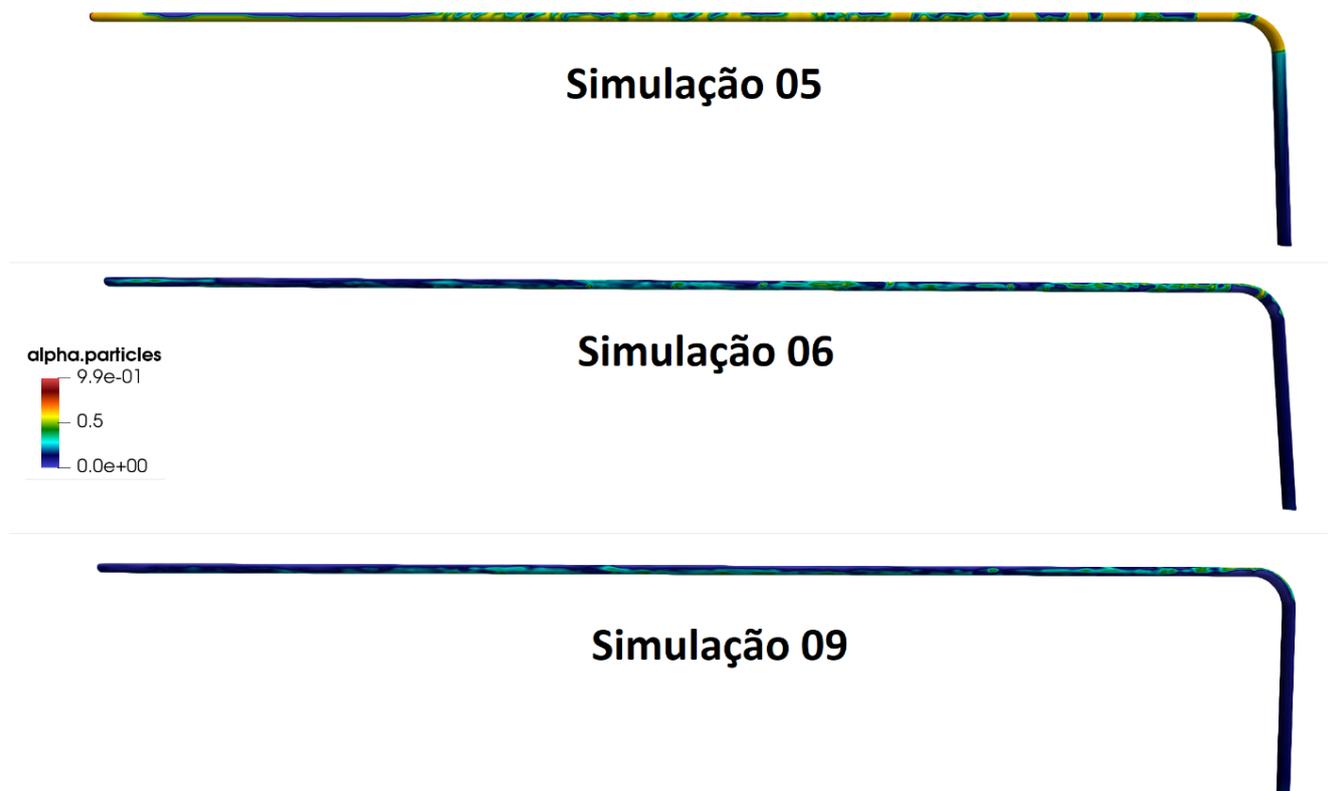
Figura 18. Pressão no trecho da tubulação na simulação 2 para SMI e FTR



Fonte: Autor (2024)

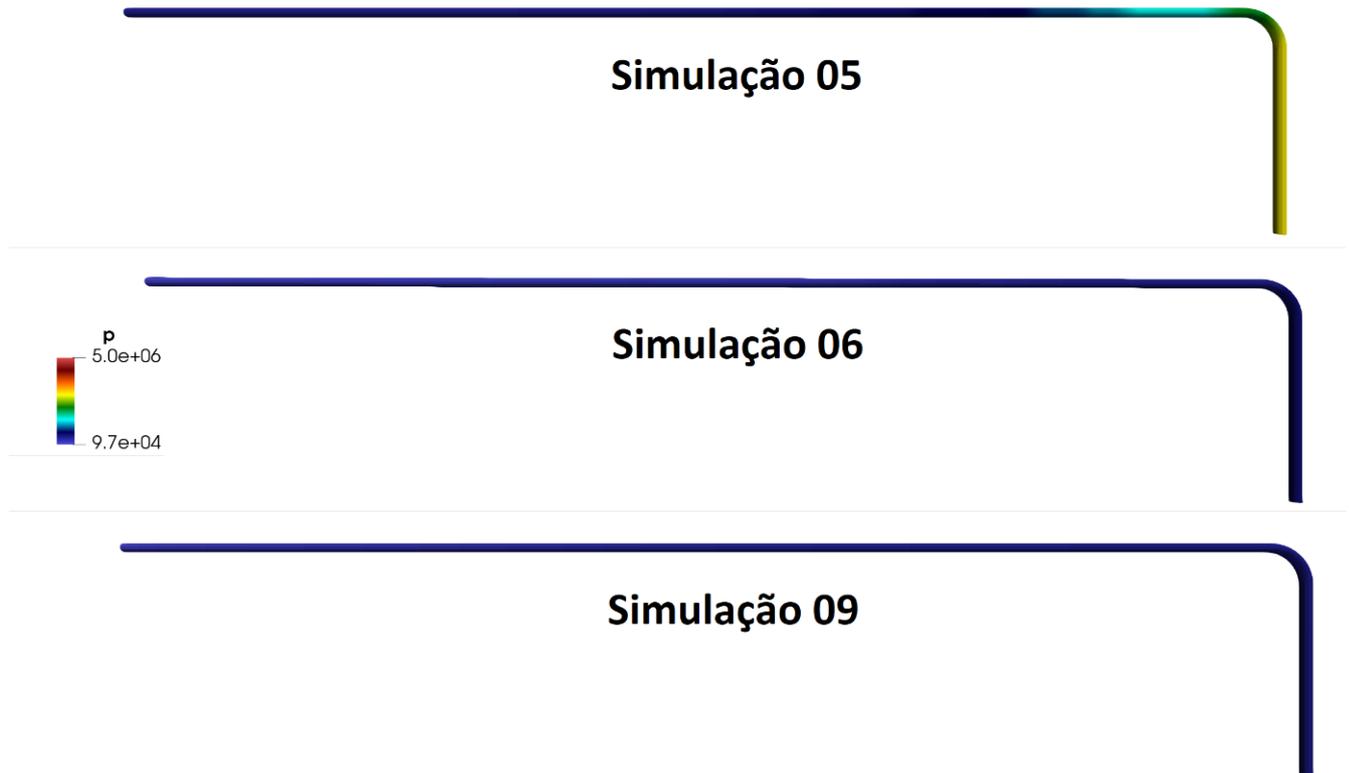
A explicação física para esse fato é que a inércia das partículas aumenta com o aumento do seu diâmetro e densidade, principais responsáveis pela sedimentação de sólidos. Com o aumento da inércia das partículas, mais energia é necessária para transportá-las, aumentando, assim, a queda de pressão (PATRO; DASH, 2014a). Este fato pode ter conferido ao sabugo de milho maiores quedas de pressão nos trechos analisados em relação ao farelo de trigo.

Figura 19. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 05, 06 e 09 do FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 20. Pressão no sistema pneumático das simulações 05, 06 e 09 do FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar a partir fração de partículas e pressão ao longo da tubulação de cada uma das simulações o efeito da velocidade do ar sobre o comportamento apresentado ao longo da tubulação. Pode-se inferir a partir das Figuras 19 e 20 que para uma velocidade menor do gás há o aumento da queda pressão muito expressivo, conforme apresentado na simulação 05, na qual o efeito significativo da velocidade do ar se mostrou mais relevante. Esse fato é muito importante, pois segundo a equação de Darcy (Equação 10), para um escoamento monofásico o aumento da velocidade, aumenta a queda de pressão no sistema. Desse modo, observa-se que a complexidade para escoamento multifásico necessita de uma abordagem diferente, pois as interações dos sólidos, gás e parede nos revelam efeitos significativos diferentes do que é regido pelo escoamento monofásico.

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (10)$$

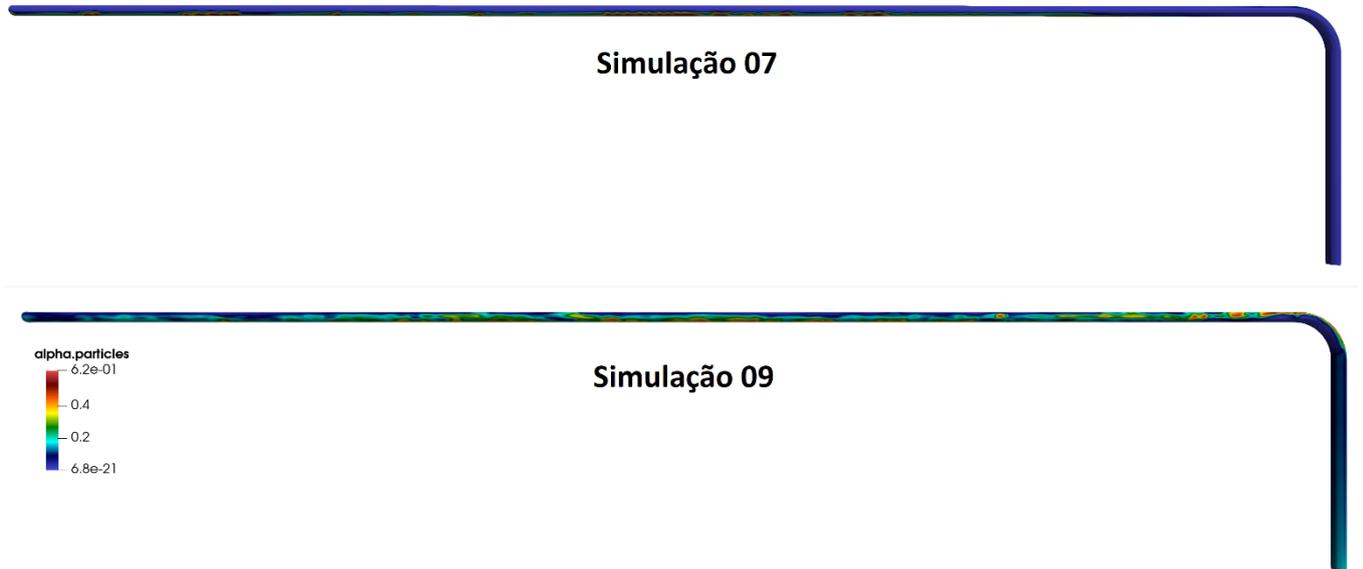
Onde,  $h_f$  é a perda de carga (mca),  $f$  é o fator de atrito de Darcy-Weisbach (adimensional),  $L$  o comprimento do tubo (m),  $V$  a velocidade do fluido (m/s),  $D$  o diâmetro interno do tubo (m), e  $g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ ).

Uma diminuição adicional na velocidade do gás resulta em um rápido aumento da queda de pressão, uma vez que a área disponível para fluxo de gás estará restrita por conta da deposição de sólidos no duto (RHODES, 2008). Desse modo, pode-se inferir que a medida que a velocidade do ar cresce ocorre a diminuição da queda de pressão na linha para as condições previstas nas simulações.

Além disso, estabelecendo o comparativo entre as três simulações, verifica-se que à medida que há a redução da velocidade do gás, torna-se cada vez mais insuficiente para manter os sólidos em suspensão e esses começam a se depositar no fundo da tubulação, ocasionando na transição do regime de fluxo em fase diluída para a fase densa ao decorrer do sistema pneumático conforme apresentado na Figura 19, sabendo que o transporte em fase densa existe quando, para escoamento horizontal, a velocidade do gás é insuficiente para suportar todas as partículas em suspensão, e, para escoamento vertical onde ocorre o fluxo inverso de sólidos. (KONRAD, 1986).

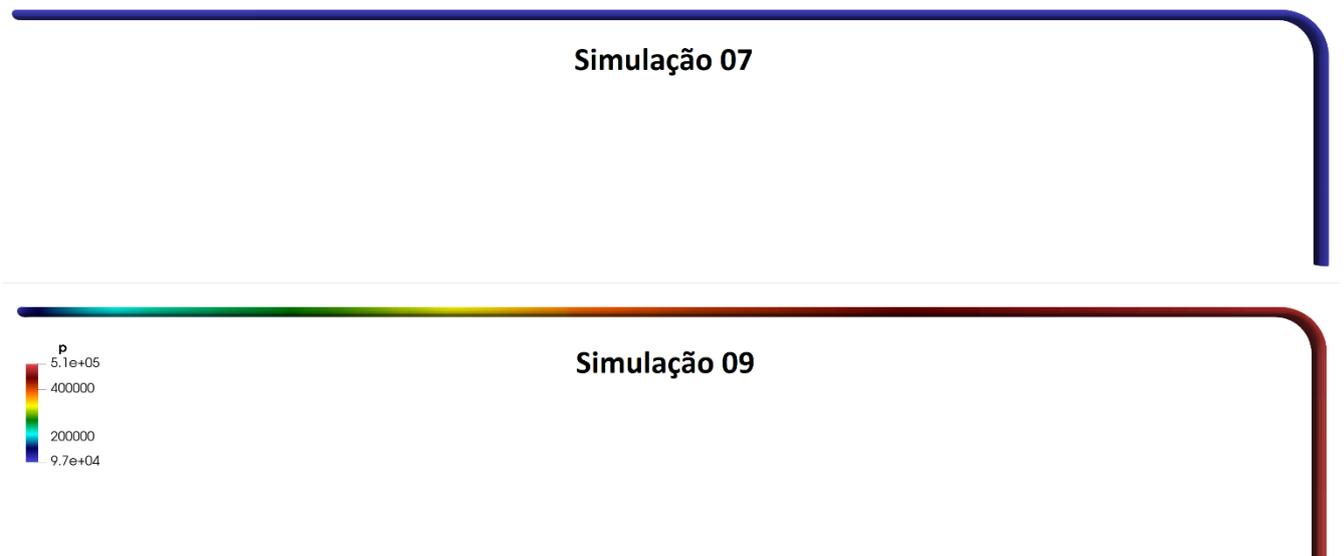
A redução na velocidade do gás, para a mesma taxa de alimentação de sólido, resulta em uma distribuição não uniforme na seção transversal da linha de transporte, e fica evidente que existe um limite que não está bem definido entre o modo de transporte diluído e denso. Assim, a redução da vazão mássica de gás para uma carga fixa de sólido transportada, provoca uma mudança no padrão de escoamento da fase, passando de uma condição estável (fase diluída) para uma condição instável, que pode ser denominado de slug ou plug (pistonado). Diminuindo ainda mais a vazão mássica do gás, o sistema passa para uma outra fase instável, que neste caso é denominada fase densa. No entanto, se a redução da velocidade atingir valores que não são suficientes para transportar os sólidos, configura-se um sistema em regime de bloqueio (FOKEER et al., 2004).

Figura 21. Fração de partículas no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 22. Pressão no sistema pneumático das simulações 07 e 09 do FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar que assim como nas simulações 01 e 02, é necessário verificar o efeito da concentração de sólidos sobre o perfil de distribuição, avaliação do modo de transporte pneumático e queda de pressão ao longo da tubulação em cada uma das simulações apresentadas nas Figuras 21 e 22. Logo, verifica-se que de fato há um aumento mais acentuado da queda de pressão na simulação 09, em razão da grande concentração de sólidos quando comparado com

a simulação 07 que apresenta uma concentração muito menor, apresentando variações mínimas ao longo de toda a tubulação em relação a queda de pressão.

Uma observação importante a ser destacada é que quando há a comparação das mesmas simulações com os diferentes materiais de estudo (sabugo de milho e farelo de trigo), há uma diferença razoável na queda de pressão, principalmente na simulação 09 de ambas as biomassas, onde a concentração de sólidos é mais expressiva. A queda de pressão no sabugo de milho se mostrou mais acentuada durante toda a tubulação, confirmando que o aumento da inércia das partículas, o qual está diretamente relacionado ao aumento do diâmetro e da densidade das biomassas influenciam a sedimentação dos sólidos, pois com o aumento da inércia das partículas, é necessária uma quantidade maior de energia para transportá-las, o que resulta em um aumento na queda de pressão (PATRO; DASH, 2014a).

Além disso, conforme mostrado nas outras análises o fato de haver uma maior concentração de partículas ao longo da tubulação, contribui para que haja colisões entre as próprias partículas, e entre as partículas e a parede, resultando em maior consumo de energia e em uma elevação significativa da queda de pressão no sistema.

Já em relação ao modo de transporte pneumático, há a predominância do regime em fase diluída nos trechos verticais em ambas as simulações, pois a Figura 21 revela que não há mudanças significativas da fração de partículas nesses trechos. Entretanto, ao analisar o trecho horizontal e a curva da tubulação percebe-se perfis de distribuição de partículas distintos nas duas simulações, pois a distribuição dos sólidos ao longo da tubulação na simulação 07 permanece uniforme, caracterizando a permanência do regime em fase diluída, enquanto que na simulação 09 observa-se a transição para o regime em fase densa.

## 5.2 Análise Quantitativa

As variáveis resposta analisadas quantitativamente neste trabalho foram: a queda de pressão e região de aceleração. Para avaliar essas variáveis dependentes, foram dispostos pontos (denominados de probes no *software* Paraview) ao longo do trecho vertical e horizontal na linha de transporte pneumático, a partir do sistema de coordenadas no *software* Paraview conforme apresentado na Tabela 4. É importante ressaltar que os pontos estabelecidos nos trechos horizontais obedeceram a critérios realizados no estudo de Gomes (2022), onde quatro pontos foram dispostos com distanciamento de 94 cm entre eles, no intuito de alcançar uma melhor representação da região de aceleração, enquanto os três últimos foram posicionados com um maior distanciamento.

Tabela 3. Coordenadas correspondentes aos trechos da tubulação no software Paraview.

<b>Pontos</b>	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>z</b>
1	0	0	0
2	0	0	0.9
3	0	0	1.5
4	-0.1	0	1.75
5	-0.4	0	1.8
6	-1.34	0	1.8
7	-2.28	0	1.8
8	-3.22	0	1.8
9	-4.16	0	1.8
10	-5.56	0	1.8
11	-6.86	0	1.8
12	-8.36	0	1.8

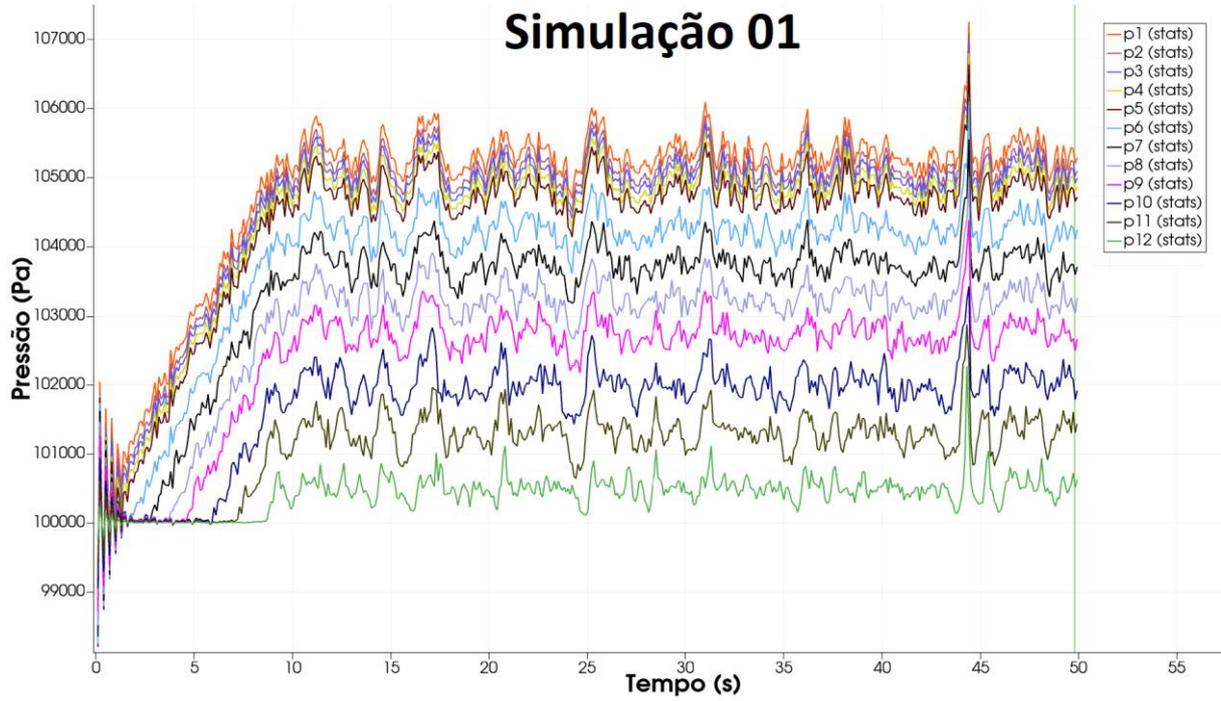
Fonte: Autor (2024).

A partir desses pontos pré-definidos foi realizado através do *software* Paraview configurações gráficas das pressões estáticas nessas coordenadas em função do tempo e da distância (no trecho horizontal) para os materiais de estudo conforme apresentado nas Figuras 23 a 34.

### **5.2.1 Avaliação Quantitativa do material particulado: sabugo de milho**

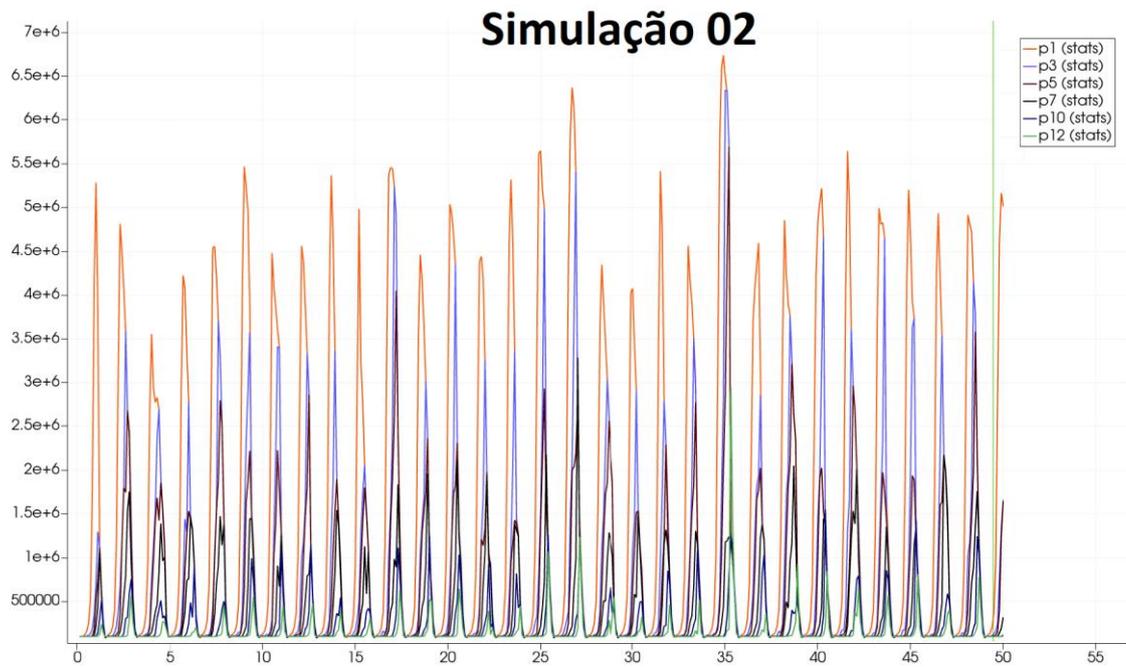
Nas Figuras 23 a 27, tem-se a representação da fração de partículas e pressão função do tempo e da distância ao longo de todo o sistema pneumático para a biomassa do sabugo de milho.

Figura 23. Perfil de queda de pressão na simulação 01 para SMI.



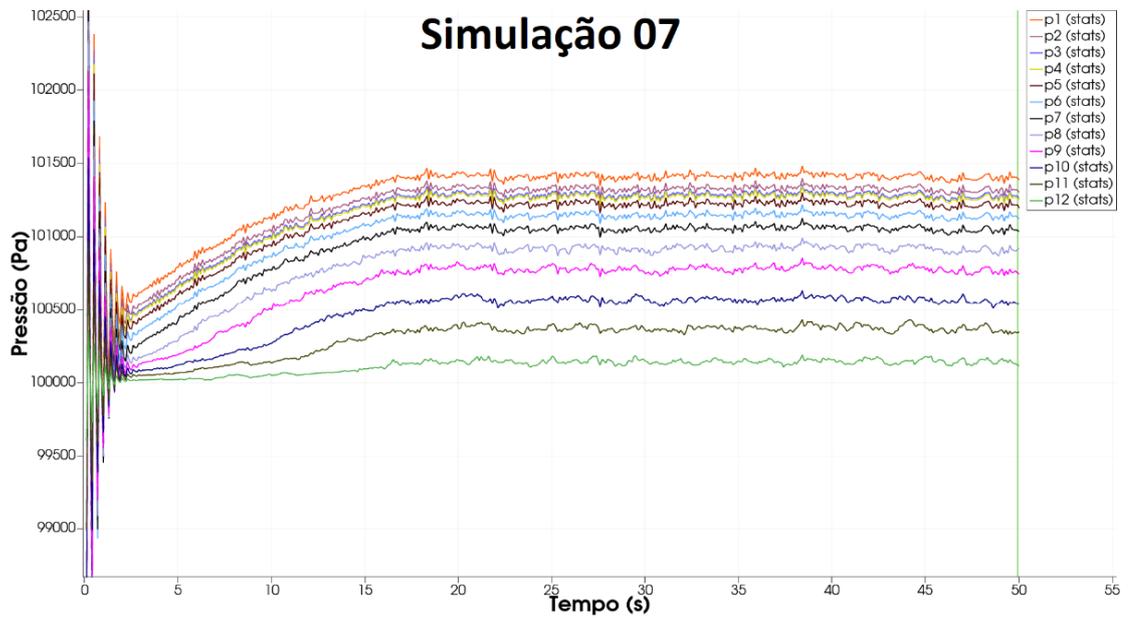
Fonte: Autor, 2024

Figura 24. Perfil de queda de pressão na simulação 02 para SMI.



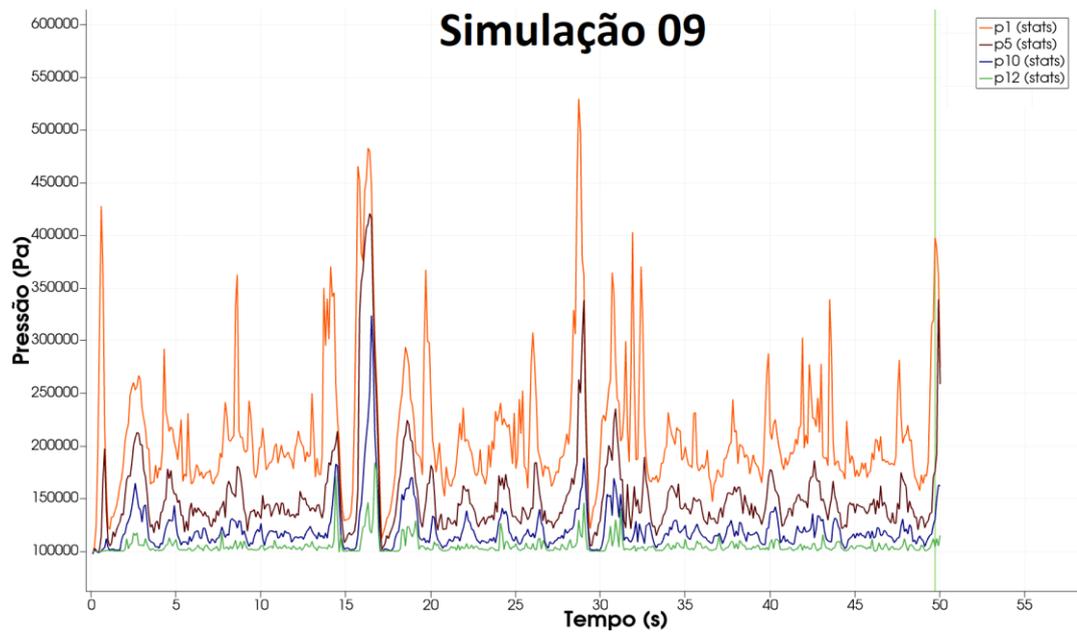
Fonte: Autor (2024).

Figura 25. Perfil de queda de pressão na simulação 07 para SMI.



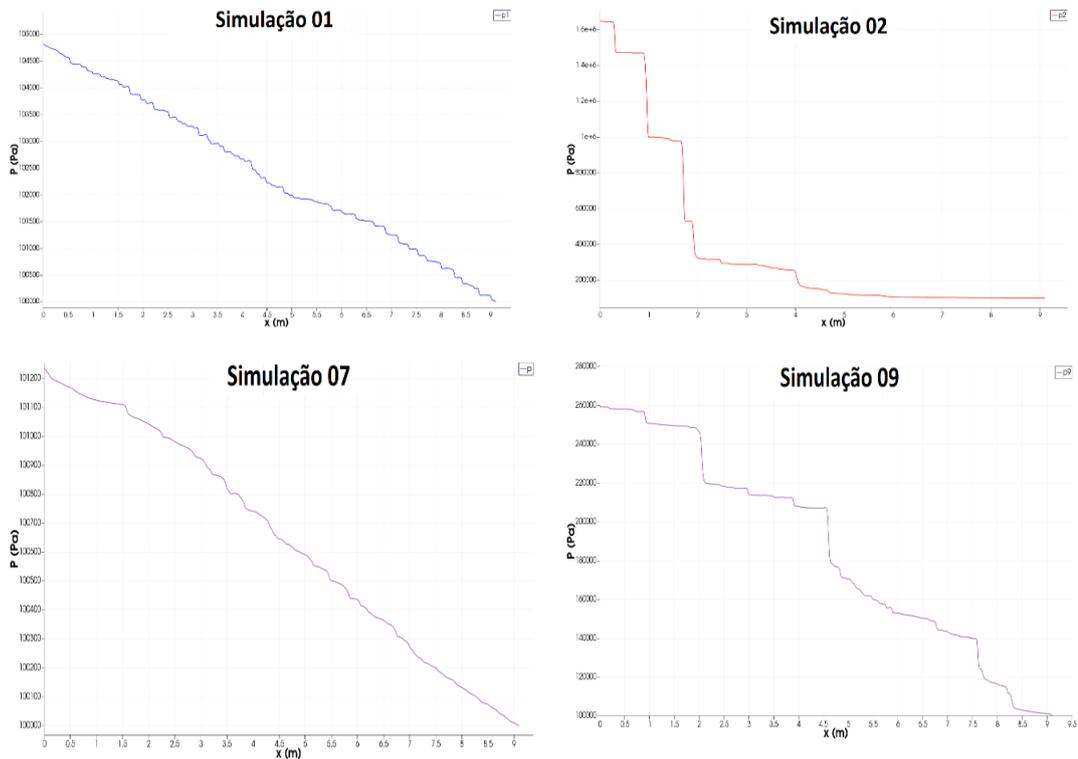
Fonte: Autor, 2024

Figura 26. Perfil de queda de pressão na simulação 09 para SMI.



Fonte: Autor, 2024

Figura 27. Pressões estáticas ao longo do comprimento horizontal para SMI



Fonte: Autor, 2024.

Nas Figuras 23 a 27, é possível notar que de modo geral, o aumento da concentração de sólidos na seção transversal da tubulação proporcionou o aumento da queda de pressão na linha, dificultando o escoamento do ar pela tubulação e aumentando o atrito das partículas com a parede. Além disso, é possível observar através da Figura 27 que as quedas de pressão se tornam mais acentuadas para as condições de maiores concentração de sólidos, indicando que para essas configurações, o regime de escoamento completamente desenvolvido é extremamente complexo de ser alcançado.

De acordo com Santo et al. (2018), após a alimentação ou curva de um sistema de transporte pneumático, observa-se que as partículas aceleram até atingirem uma velocidade constante. Esta região de aceleração pode ser determinada avaliando-se a queda de pressão por unidade de comprimento, sendo o comprimento da região de aceleração dependente do diâmetro da tubulação, propriedades do material, carga de sólidos e velocidade de transporte. Além disso, 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

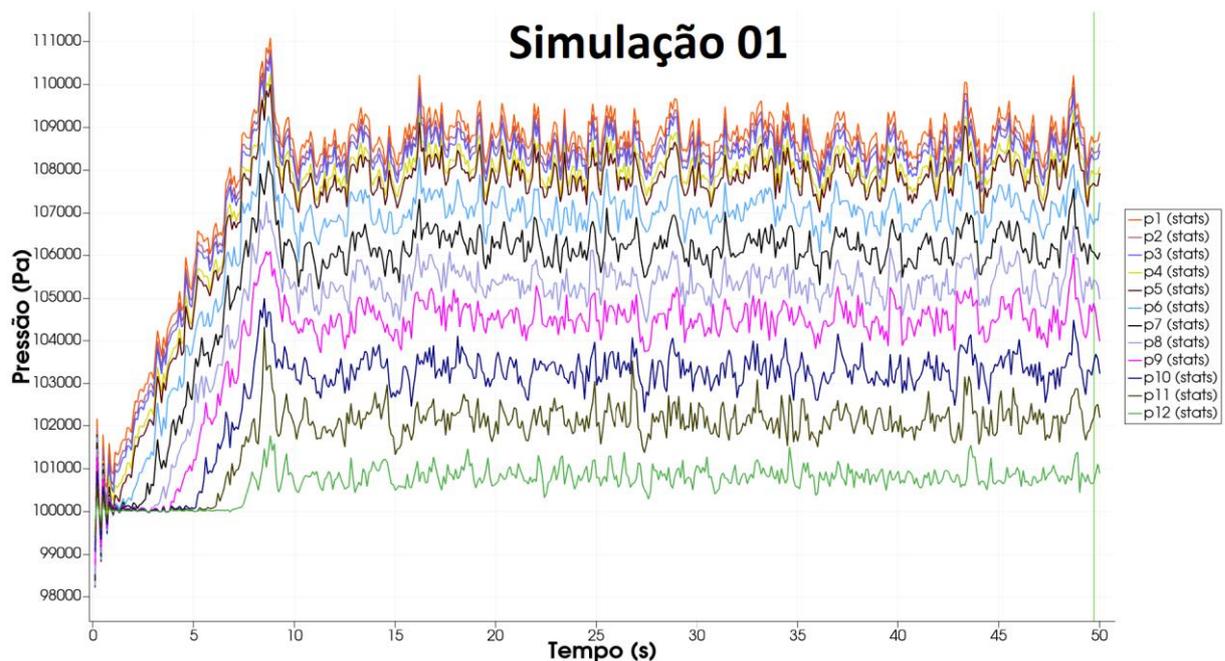
linearmente e a queda de pressão por unidade de comprimento se torna constante, indicando o início da zona de fluxo totalmente desenvolvido (SANTO et al.; 2018).

Desse modo pode-se inferir que as simulações que apresentaram um comportamento linear e alcançaram o fluxo totalmente desenvolvido no sistema pneumático, foram as simulações 01 e 07, confirmando o que a literatura apresenta para concentração de sólidos baixa. Enquanto que para a simulação 02 houve identificação da região de aceleração e a transição para a zona de fluxo totalmente desenvolvido. Já para a simulação 09, verifica-se que não foi alcançado o estado estacionário no sistema em razão da influência significativa da alta concentração de sólidos.

### 5.2.2 Avaliação Quantitativa do material particulado: farelo de trigo

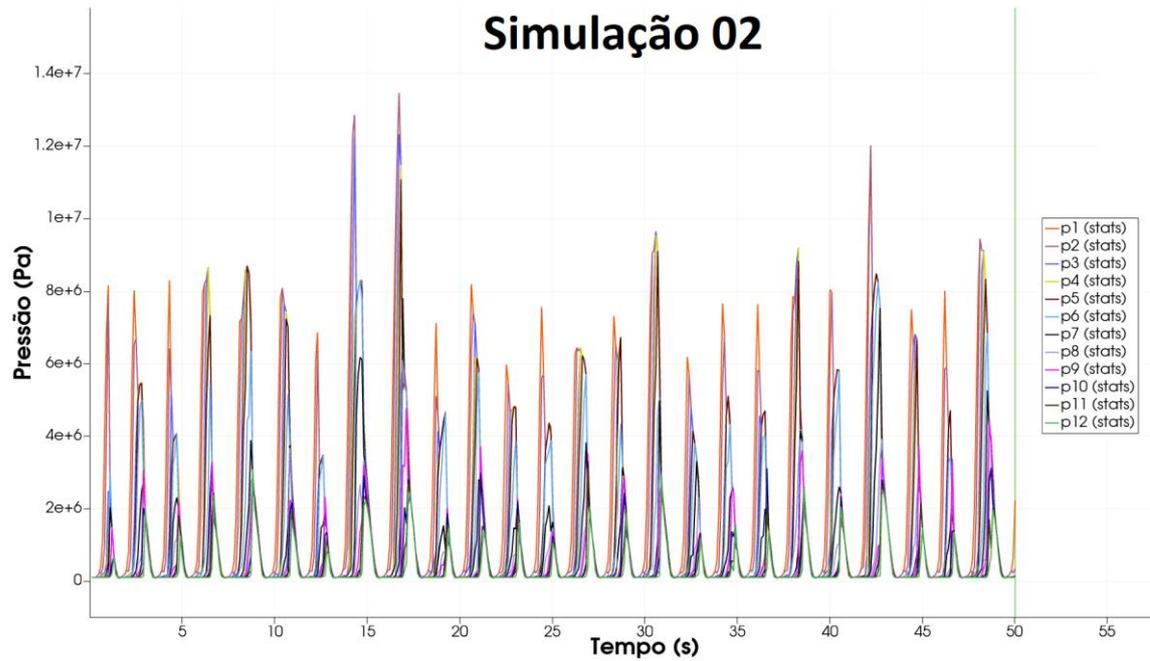
A seguir, a partir das Figuras 28 a 34, temos a representação da fração de partículas e pressão função do tempo e da distância ao longo de todo o sistema pneumático para a biomassa do farelo de trigo.

Figura 28. Perfil de queda de pressão na simulação 01 para FTR.



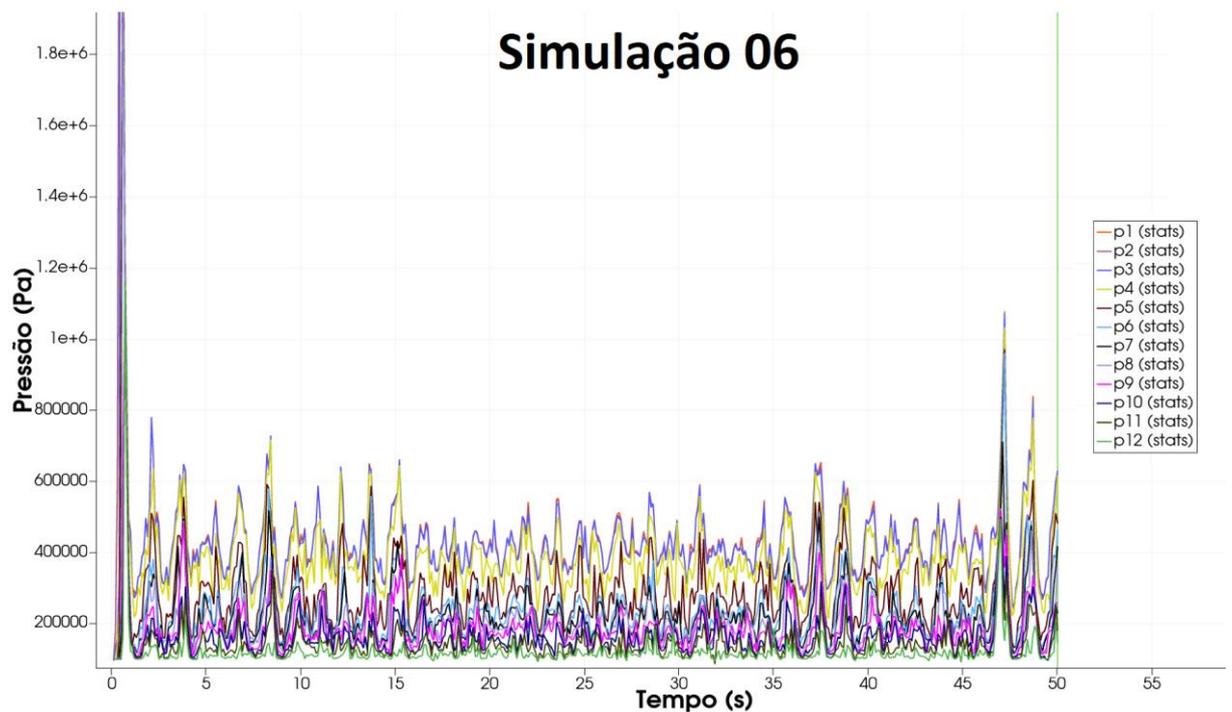
Fonte: Autor, 2024.

Figura 29. Perfil de queda de pressão na simulação 02 para FTR.



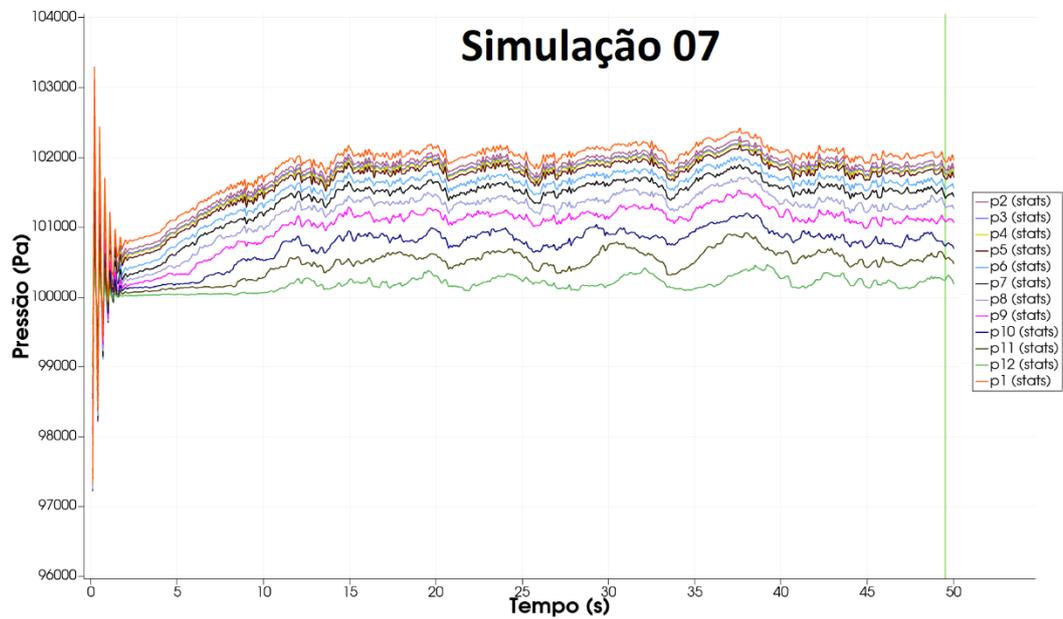
Fonte: Autor, 2024

Figura 30. Perfil de queda de pressão na simulação 06 para FTR.



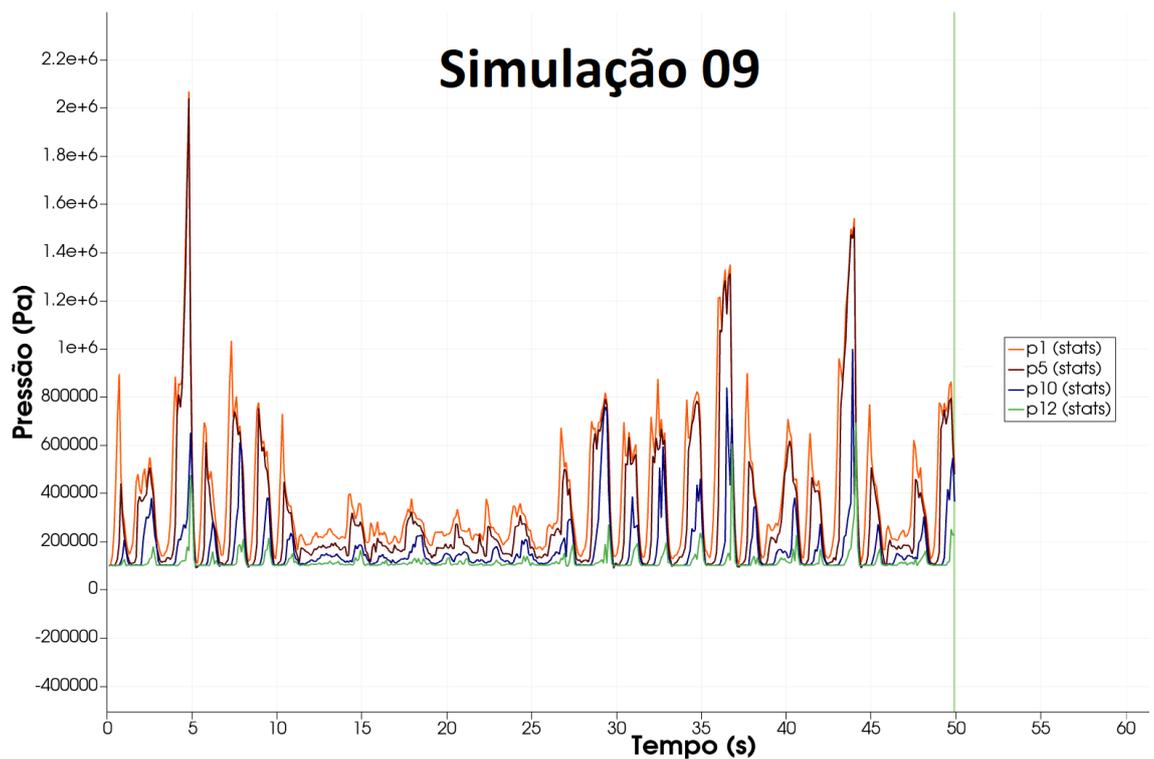
Fonte: Autor, 2024.

Figura 31. Perfil de queda de pressão na simulação 07 para FTR.



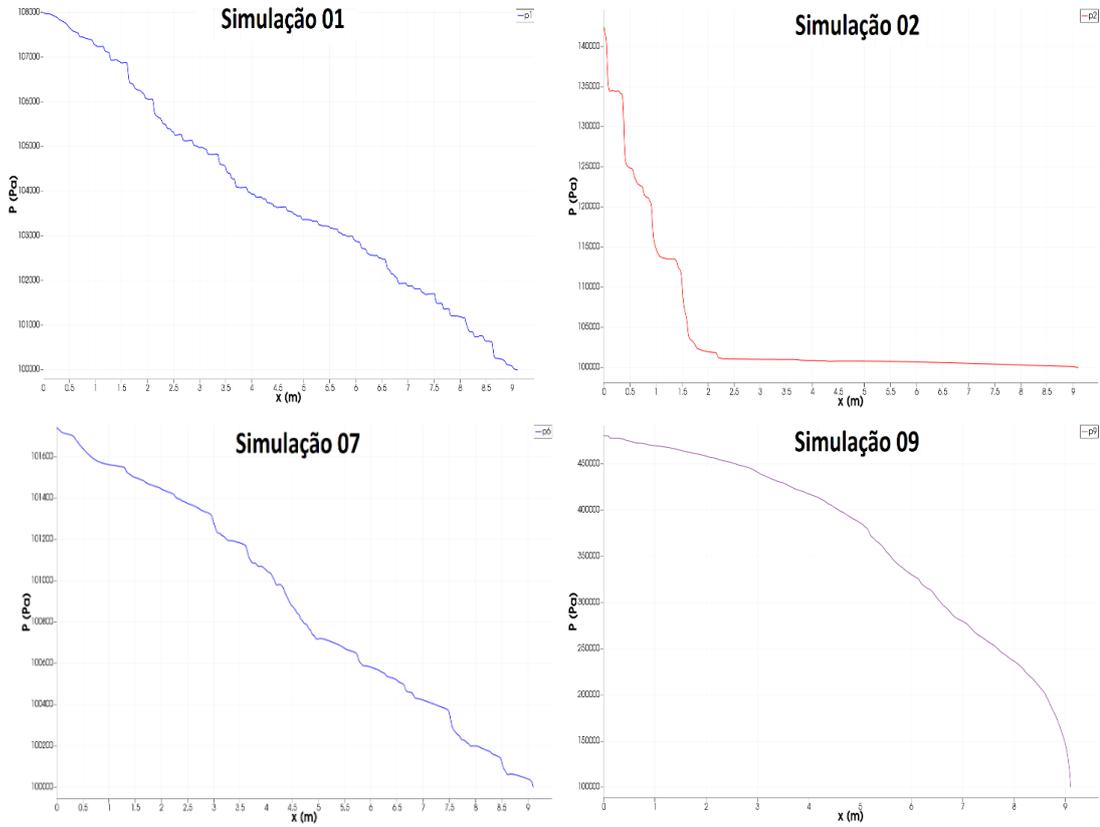
Fonte: Autor, 2024.

Figura 32. Perfil de queda de pressão na simulação 09 para FTR.



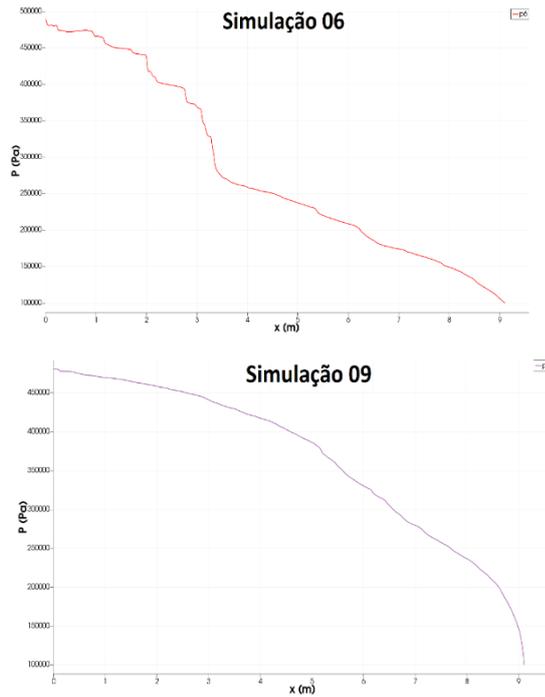
Fonte: Autor, 2024.

Figura 33. Pressões estáticas simulações 01, 02, 07 e 09 ao longo do comprimento horizontal para FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 34. Pressões estáticas simulações 06 e 09 ao longo do comprimento horizontal para FTR.



Fonte: Autor, 2024.

Pode-se observar que nas Figuras 28, 29, 31, 32 e 34, apresenta de modo geral comportamento similares ao que foi percorrido sobre o sabugo de milho nas análises anteriores, corroborando que mesmo sendo biomassas distintas, o aumento da concentração de sólidos na seção transversal da tubulação proporcionou o aumento da queda de pressão na linha.

Sendo assim, pode-se inferir que as simulações que apresentaram um comportamento linear e alcançaram estado estacionário no sistema pneumático, foram as simulações 01, 02 (observe-se a zona de região de aceleração e zona de fluxo totalmente desenvolvido) e 07, confirmando o que a literatura apresenta para baixas concentrações de sólidos. Enquanto que para a simulação 09, indica-se que não foi alcançado o estado estacionário no sistema em razão da influência significativa da alta concentração de sólidos.

Os comportamentos apresentados pelas configurações gráficas nos mostram que apesar das diferenças das propriedades dos materiais, como por exemplo, as partículas do sabugo de milho possuir o dobro do diâmetro das partículas do farelo de trigo as similaridades são notáveis. No entanto, ao compararmos a Figura 27 e a Figura 33 de ambas as biomassas, percebe-se a influência das propriedades dos materiais expostos as mesmas condições, pois as simulações 02 e 09 do milho apresentaram quedas mais bruscas de pressão, bem como preciso de um trecho maior da tubulação para a estabilidade dessa queda de pressão conforme apresentado na simulação 02.

De fato, a inércia das partículas aumentou com o aumento do diâmetro e densidade, pois a queda de pressão foi mais acentuada, já que com o aumento da inércia das partículas, mais energia é necessária para transportar os sólidos (PATRO; DASH, 2014a). Esse fato pode ter conferido ao sabugo de milho maiores quedas de pressão no trecho horizontal em relação ao farelo de trigo.

Nota-se que para efeitos comparativos das simulações 05, 06 e 09 do farelo de trigo, as justificativas e abordagem científica são um pouco distintas do que já foi analisado, pois para esse caso a velocidade do ar que sofre variações.

Sob condições de baixas vazões do gás transportador e elevadas concentrações de sólidos, o fluxo gás-sólidos se torna instável e com caráter heterogêneo, apresentando uma distribuição não uniforme de sólidos na seção transversal da tubulação (KLINZING et al., 2010), sendo possível observar aglomerados ou recirculação de partículas.

Partindo dessa premissa, nota-se a partir das Figuras 30, 32 e 34, as pressões estáticas em função do tempo e distância (trecho horizontal) indicam que a queda de pressão é expressiva para a condição de menor velocidade do gás (simulação 09), já que uma diminuição adicional na velocidade do gás resulta em um rápido aumento da queda de pressão, uma vez que a área

disponível para fluxo de gás estará restrita por conta da deposição de sólidos no duto (RHODES, 2008).

Sendo assim, a velocidade do ar se configura como uma variável significativa, já que a variável resposta (queda de pressão) revelou mudanças expressivas e maior instabilidade no sistema à medida que a velocidade foi sendo diminuída, revelando que a simulação 09 obteve quedas mais abruptas de pressão, enquanto a simulação 06 obteve quedas de pressão mais amenas.

Além disso, quando se trata da região de aceleração (outra variável resposta), observa-se através da Figura 34 que de fato para uma maior velocidade do gás o gráfico apresenta indícios de se ter uma tendência mais linear, na qual indica atingir a região de escoamento completamente desenvolvido em um trecho menor da tubulação, pois de acordo com Tripathi, Levy e Kalman (2017), o balanço de forças que atuam na partícula garante na região de aceleração uma tendência exponencial, ou seja, o padrão linear não é constatado na simulação 09 que apresenta velocidade menor do gás,. Logo, isso apresenta indícios de que o sistema pneumático composto por essa simulação não atingiu a região de escoamento completamente desenvolvido para o tempo de simulação e distância do trecho horizontal pré-determinados.

De modo geral, as propriedades de ambas as biomassas que foram transportadas têm uma grande influência sobre a capacidade de transporte de um sistema pneumático. São as propriedades do material que ditam se o material pode ser transportado em fase densa em um sistema de transporte convencional, e o valor mínimo da velocidade do ar de transporte necessária (MILLS; JONES; AGARWAL, 2004).

Em relação ao modo de transporte, é identificado abrangendo toda a avaliação numérica feita com ambas as biomassas que de fato o aumento gradativo da concentração de sólidos e a diminuição gradativa da velocidade do ar, permitiu verificar a fases de instabilidade no sistema pneumático e a constatação da formação da fase densa, corroborando com análises qualitativas para ambos os materiais que também permitiram definir a partir da distribuição de sólidos.

É importante estar atento ao desempenho de um sistema de transporte pneumático em fase diluída, que é afetado significativamente pela queda de pressão na linha, que, por sua vez, depende de diversos parâmetros, tais como: as propriedades dos materiais, dimensões de tubos e vazão de ar (SANTOS et al., 2011).

### 5.3 Avaliação das Problemáticas do Leito Pneumático

Uma simulação bem-sucedida é caracterizada por um aspecto fundamental, que é a convergência da solução. A convergência de uma solução é monitorada pelos chamados resíduos (medidas da conservação geral das propriedades de fluxo), que devem apresentar valores inferiores ao limite estipulado pelo usuário (GOMES, 2022).

Observa-se ao final do estudo que nem todas as simulações (êxito para ambas as biomassas) obtiveram êxito. O fato é que a previsão numérica e a justificativas para tais acontecimentos podem diferir a partir da configuração das variáveis independentes, propriedades físicas dos materiais, a confecção da malha e dos erros operacionais envolvidos ao estabelecer as configurações no software OpenFoam. Todas as imagens e representações gráficas estão expostas no Anexo I.

Primeiramente, as simulações que apresentaram erros quanto a biomassa do farelo de trigo foram as simulações 04, 05 e 08, enquanto que em relação ao sabugo de milho foram as simulações 04, 05, 06 e 08. Logo, verifica-se que há 3 simulações em comum, na qual apresentaram erros em ambas as biomassas.

Estabelecendo uma verificação mais aprofundada acerca da simulação 05, percebe-se a partir das configurações das variáveis independentes, que o principal motivo para a problemática está na baixa velocidade do gás para uma carga fixa de concentração de sólidos, no qual pode ocasionar obstrução do leito pneumático.

A redução na velocidade do gás, para a mesma taxa de alimentação de sólido, resulta em uma distribuição não uniforme na seção transversal da linha de transporte, assim, a redução da vazão mássica de gás para uma carga fixa de sólido transportada, provoca uma mudança no padrão de escoamento, passando de uma condição estável para uma condição instável (FOKEER et al., 2004), o que pode ocasionar maior retenção de partículas próximas a base da tubulação no trecho horizontal, além de proporcionar o aumento das forças resistivas no sistema em razão da concentração de sólidos (GOMES, 2022).

Sendo assim, devido a expressiva diminuição da velocidade do gás, não foi suficiente para transportar as biomassas até o final do trecho pneumático em razão das condições instáveis apresentadas, ocasionando a obstrução do leito pneumático pela expressiva concentração de sólidos em determinada região da tubulação, o fluxo inverso de sólidos no trecho vertical, bem como a insuficiência de suportar a partículas em suspensão no trecho horizontal. Se a redução da velocidade atingir valores que não são suficientes para transportar os sólidos, configura-se um sistema em regime de bloqueio (FOKEER et al., 2004).

Já para a avaliação da simulação 08, percebe-se a partir das configurações das variáveis independentes, que o principal motivo para a problemática está na alta concentração de sólidos para um valor constante de velocidade do gás, ocasionando obstrução da linha e consequentemente fazendo com que essa simulação apresente erro, pois sob condições de elevadas concentrações de sólidos, o fluxo gás-sólidos se torna instável e com caráter heterogêneo, apresentando uma distribuição não uniforme de sólidos na seção transversal da tubulação (KLINZING et al., 2010), sendo possível observar aglomerados ou recirculação de partículas.

Já para a avaliação das simulações 04 e 06 (apenas do sabugo de milho) há fatos e explicações mais desafiadores. A razão pontual para as falhas apresentadas, podem estar atreladas ao erro operacional ao configurar os parâmetros no OpenFoam, como as condições de contorno, o modelo de turbulência, bem como a qualidade da malha no leito pneumático.

Foi identificado que os piores elementos de malha estão na curva conforme representado na Figura 35, no qual se configura como um trecho crucial ao longo do estudo, pois foi analisado mudanças do modo de transporte (fase densa, fase diluída), transição de regiões estáveis para regiões instáveis do sistema pneumático. Sendo assim, uma divergência numérica seria muito provável nessa região, uma vez que a disposição e forma dos elementos de uma malha afetam diretamente a acurácia da solução, a taxa de convergência numérica e o tempo computacional necessário (GOMES, 2022).

Figura 35. Elementos com menor qualidade de malha no trecho da tubulação.



Fonte: Autor (2024).

De modo geral, outro fator de suma importância está atrelada a propriedades dos materiais, pois segundo Pan (1999) e Santos (2009), inúmeros materiais sólidos a granel com propriedades diferentes entre as partículas, como, por exemplo, tamanho, distribuição de tamanhos, forma, densidade e dureza superficial, podem influenciar nos regimes de transporte. Identificou-se que apesar de não convergir numericamente, foi concretizado o tempo total de simulação (50 segundos) para as simulações (04 e 08) do farelo de trigo, enquanto para o sabugo de milho não foi concluído até o tempo final para as mesmas configurações.

Esse fato indica a influência significativa das propriedades da biomassa, já que conforme a Tabela 2 e 3 que apresentam diversas propriedades dos materiais (diâmetro, densidade, entre outros), observa-se que as partículas do sabugo de milho apresentam mais que o dobro do diâmetro e são mais densas que as partículas de farelo de trigo. É importante perceber que diferentes propriedades do mesmo material, como por exemplo o tamanho, podem apresentar diferenças muito significativas quanto às condições de transporte (MILLS, 2016).

Sendo assim, os efeitos significativos da alta concentração de sólidos e velocidade do gás se tornam muito mais expressivos. Além disso, somando o fato das configurações operacionais e problemas já anteriormente citados a convergência numérica se torna mais desafiante para esses casos.

Portanto, dependendo do material, é necessário conhecer a influência das partículas nos regimes de transporte ou no desempenho do sistema (PAN, 1999). Um dos desafios no transporte pneumático é tornar o projeto de um sistema possível, sem a necessidade da realização de testes de transporte em escala real com um material (LOURENÇO, 2019).

## 6. CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado sobre a influência das propriedades físicas granulares e fluidas no transporte pneumático em trechos horizontais e verticais, é possível concluir que a compreensão aprofundada desses fatores é fundamental para o projeto e operação eficientes de sistemas de transporte pneumático.

A análise quantitativa e qualitativa realizada permitiu identificar a influência significativa da velocidade do ar transportador e da concentração da fase granular na eficiência do transporte, pois para velocidades menores do gás e maiores concentrações de sólidos no leito pneumático, verificou-se um regime mais instável, quedas de pressão mais abruptas e a caracterização da fase densa principalmente na região do trecho horizontal, enquanto que para condições de aumento de velocidade do gás, e baixas concentrações de sólidos ficou evidente a presença do escoamento em fase diluída e distribuições de partículas mais uniformes principalmente no trecho vertical.

Através dos perfis de pressão estática ao longo do trecho horizontal, foi possível identificar as regiões de aceleração e de fluxo totalmente desenvolvido, possibilitando discorrer sobre o comprimento de aceleração para cada material transportado e condição operacional avaliada.

Além disso, a utilização de ferramentas de simulação numérica, como a fluidodinâmica computacional (CFD), mostrou-se valiosa para prever o comportamento do sistema pneumático e verificar seu desempenho. A realização de simulações e a validação dos resultados obtidos por meio de equações multifásicas contribuem para um melhor entendimento da complexa física subjacente ao escoamento gás-sólido.

Portanto, a partir deste estudo, foi possível avançar no conhecimento sobre o transporte pneumático e sua aplicação em diferentes biomassas que englobam parte do setor industrial, evidenciando que as propriedades dos materiais, parâmetros operacionais, e configurações distintas para as variáveis independentes podem influenciar significativamente sobre as variáveis respostas na linhagem de produção.

## REFERÊNCIAS

CARVALHO, M. **Projeto conceitual de um transportador pneumático para fins de bauxita**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.

ÇENGEL, Y. A; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: McGrawHill, Bookman, AMGH, 2007, 816p.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

FATTI, V. F. L. **CFD modeling of gas-solid fluidized beds in openfoam: a comparison between the eulerian-eulerian and eulerian lagrangian methods**. MILANO: ING - Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, 2021.

FOKEER, S. et al. Characterisation of the cross sectional particle concentration distribution in horizontal dilute flow conveying - a review. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 43, n. 6, p. 677–691, 2004. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(03\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(03)00096-5)

GOMES, Luiz Moreira. **Contribuição à análise do transporte pneumático em fase diluída**. 2011. 225 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Naturais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

GOMES, Thais Logetto Caetité. **Transporte pneumático horizontal de biomassas: experimentos em unidade piloto e simulações numéricas em cfd**. 2022. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

GOMIDE, Reynaldo. **OPERAÇÕES UNITÁRIAS: operações com sistemas sólidos granulares**. São Paulo: Edição do Autor, 1983.

KLINZING, G. E. et al. **Pneumatic conveying of solids: A theoretical and practical approach**. New York: Springer, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3609-4>

KLINZING, G. E. **A review of pneumatic conveying status, advances and projections**. **Powder Technology**, v. 333, p. 78–90, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.04.012>

KONRAD, K. **Dense-phase pneumatic conveying: A review** **Powder Technology**, v. 49, n. 1, p. 1– 35, 1986. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(86\)85001-X](https://doi.org/10.1016/0032-5910(86)85001-X)

LAÍN, S.; SOMMERFELD, M. Characterisation of pneumatic conveying systems using the Euler / Lagrange approach. **Powder Technology**, v. 235, p. 764–782, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.11.029>

LOPES, Cibele Souza. **Influência do alimentador de sólidos na fluidodinâmica do transporte pneumático**. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

LOPES, Cibele Souza. **Estudo da alimentação de sólidos em sistemas de transporte pneumático**. 2011. 147 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

LOURENÇO, Giovani Aud. **Transporte pneumático horizontal de partículas de baixa densidade: proposta de um sistema de alimentação e estudos de fluidodinâmica**. 2019. 155 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

MAHURE, J. M. et al. **Design and development of pneumatic conveying system for chilli handling and experimentation**. Science Park, v. I, n. X, p. 1–5, 2013. <https://doi.org/10.9780/23218045/1102013/30>

MENDONÇA, L. A. **Desempenho do delineamento composto central em experimentos com alto coeficiente de variação**. Dissertação de Mestrado. 2012.

MANJULA, E. V. P. J. et al. A Review of CFD Modelling Studies on Pneumatic Conveying and NU SC Challenges in Modelling Offshore Drill Cuttings Transport. **Powder Technology**, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.10.026>

MARCUS, R.D., LEUNG, L.S., KLINZING, G.E., RIZK, F. **Pneumatic conveying of solid: A theoretical and practical approach**. Great Britain: St. Edmundsbury Press, 1990. 575 p.

MILLS, D. **Pneumatic conveying design guide**. Elsevier Ltd, 2016.

MORAES, M. S. **Convecção forçada de partículas poliméricas em fase diluída : Curvas de pressão e distribuição de partículas**. [s.l.] UNICAMP, 2012.

NASCIMENTO, S. M. **Estudo experimental e de simulação da dinâmica de material particulado em tambor rotatório com suspensores**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2014.

N.M. Tripathi et al. "Experimental analysis of particle velocity and acceleration in vertical dilute phase pneumatic conveying," **Powder Technology**, 2018.

PATRO, P.; DASH, S. K. Numerical simulation for hydrodynamic analysis and pressure drop prediction in horizontal gas-solid flows. **Particulate Science and Technology**, v. 32, n. 1, p. 94–103, 2014. <https://doi.org/10.1080/02726351.2013.829543>

PERRY, R. H. **Chemical Engineers' Handbook**, 7. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

PERRY, R. H. **Chemical Engineers' Handbook**, 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

RAHEMAN, H.; JINDAL, V. K. Pressure drop gradient and solid friction factor in horizontal pneumatic conveying of agricultural grains. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 17, n. 5, p. 649– 656, 2001. <https://doi.org/10.13031/2013.6903>

RHODES, M. **Introduction to particle technology**. Monash: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

SANTO, N. et al. **Experimental study on particle steady state velocity distribution in horizontal dilute phase pneumatic conveying**. *Chemical Engineering Science*, v. 187, p. 354–366, 2018a. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.04.058>

SANTOS, S. M. **Projeto e montagem de unidade piloto de transporte pneumático em fase diluída para estudo da relação entre a perda de carga e a distribuição de partículas granulares na seção transversal de dutos industriais**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, 2009.

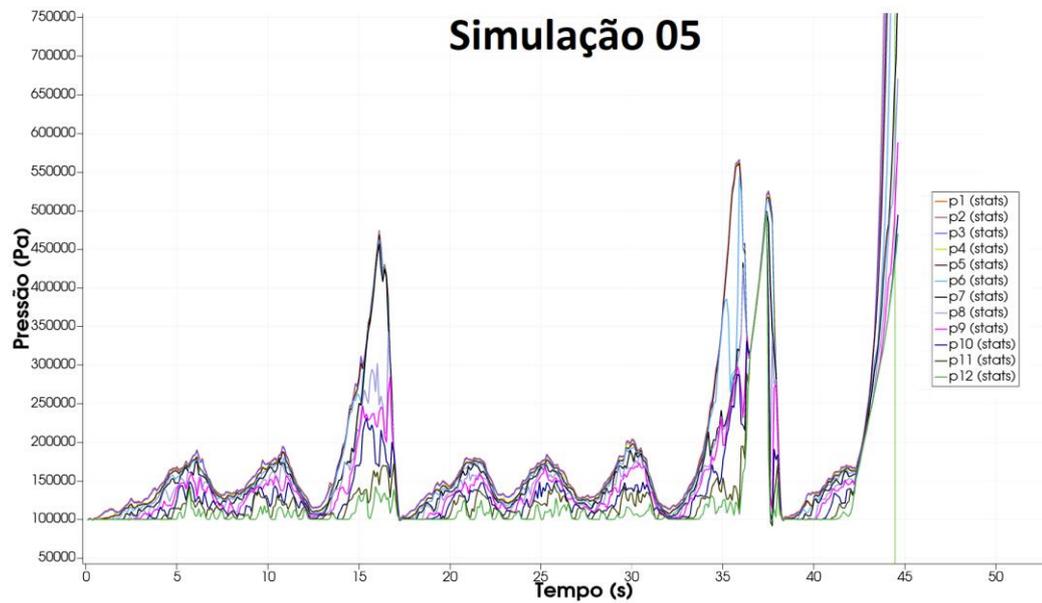
SANTOS, S. M. et al. **Dilute-phase pneumatic conveying of polystyrene particles: pressure drop curve and particle distribution over the pipe cross-section**. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 28, n. 1, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322011000100010>

WANG, Y. et al. **CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass**. *Applied Thermal Engineering*, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.063>

YANG, D. et al. **Prediction of horizontal pneumatic conveying of large coal particles using discrete phase model**. *Advances in Materials Science and Engineering*, p. 1–15, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1967052>

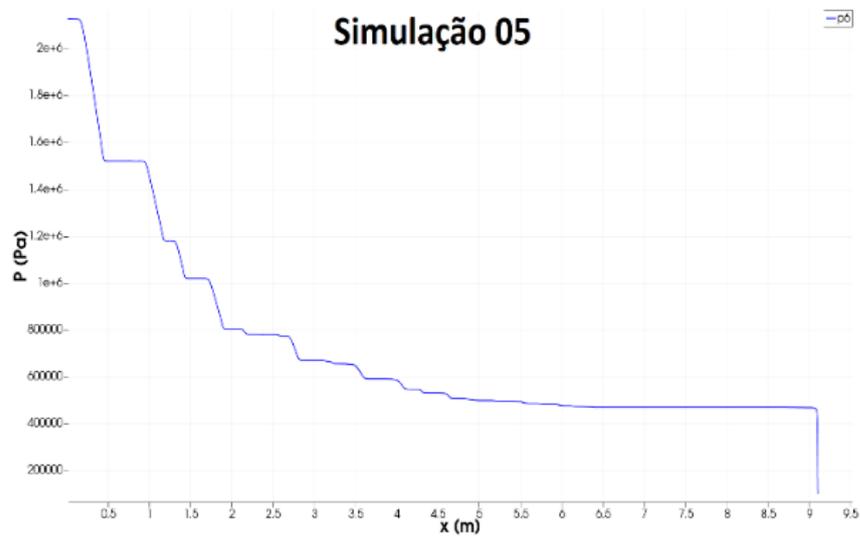
## ANEXO I

Figura 36. Perfil de queda de pressão na simulação 05 para FTR.



Fonte: Autor (2024).

Figura 37. Pressão estáticas da simulação 05 ao longo do comprimento horizontal para FTR.



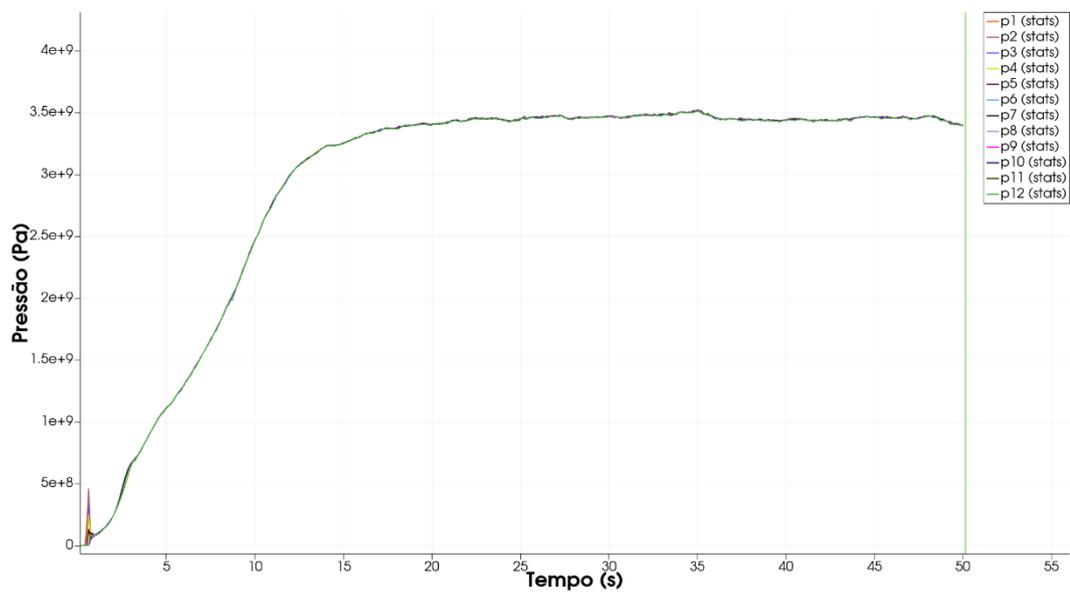
Fonte: Autor (2024).

Figura 38. Padrão similar de pressão no sistema pneumático das simulações 04 e 08.



Fonte: Autor (2024).

Figura 39. Padrão similar de pressão estática ao longo do trecho horizontal no sistema pneumático das simulações 04 e 08.



Fonte: Autor (2024).