

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

PEDRO HENRIQUE DA SILVA BISPO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE MODELOS DE TURBULÊNCIA E
QUALIDADE DE MALHA SOBRE O TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE
BIOMASSA.**

PEDRO HENRIQUE DA SILVA BISPO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE MODELOS DE TURBULÊNCIA E
QUALIDADE DE MALHA SOBRE O TRANSPORTE PNEMUÁTICO DE
BIOMASSA.**

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

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

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

B622a Bispo, Pedro Henrique da Silva.
 Avaliação numérica da influência de modelos de turbulência e qualidade de malha sobre o transporte pneumático de biomassa / Pedro Henrique da Silva Bispo. – 2024.
 76 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. 74-76.

 1. Transporte pneumático. 2. Leito pneumático. 3. Fluidodinâmica computacional. 4. SALOME (*Software*). I. Título.

CDU:66.0:531.3

Folha de Aprovação

PEDRO HENRIQUE DA SILVA BISPO

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE MODELOS DE TURBULÊNCIA E
QUALIDADE DE MALHA SOBRE O TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE
BIOMASSA.**

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

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RODOLFO JUNQUEIRA BRANDÃO**
Data: 12/11/2024 23:29:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientadora: Profa. Dr. Rodolfo Junqueira Brandão
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **THAIS LOGETTO CAETITÉ GOMES**
Data: 13/11/2024 15:27:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: Profa. Dra. Thaís Logetto Caetité Gomes
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **JOAO INACIO SOLETTI**
Data: 14/11/2024 14:11:07-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dr. João Inácio Solleti
(Universidade Federal de Alagoas)

Documento assinado digitalmente
 **WAGNER ROBERTO DE OLIVEIRA PIMENTEL**
Data: 13/11/2024 16:07:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Wagner Roberto de Oliveira Pimentel
(Universidade Federal de Alagoas)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo a Deus e a Nossa Senhora, por toda a graça e sabedoria concedidas ao longo dessa jornada, por terem guiado meus passos em cada etapa desse processo. Chegar até aqui, superando as inúmeras dificuldades desde o início da minha trajetória acadêmica, é uma bênção pela qual sou imensamente grato.

Expresso meu profundo agradecimento à minha família, especialmente à Maria Aparecida, Antônio e Arthur, por todo o suporte, carinho e confiança depositados em mim. Vocês foram a base sólida que me sustentou e permitiu que eu me tornasse quem sou hoje.

Meu reconhecimento também vai para minha namorada, Júlia Beatriz, que esteve ao meu lado desde o começo da faculdade. Em momentos de incerteza, quando pensei que não seria capaz ou considerarei desistir, suas palavras de encorajamento me deram forças e renovaram minha determinação para seguir em frente.

Agradeço, ainda, ao professor Rodolfo Brandão e ao amigo Walber Coêlho, que compartilharam comigo a experiência do Trabalho de Conclusão de Curso. O conhecimento e as vivências trocadas ao longo desse processo foram essenciais para a realização deste trabalho.

Muito obrigado a todos que, de alguma forma, contribuíram para que eu chegasse a esse momento tão especial.

RESUMO

O transporte pneumático, uma operação unitária amplamente aplicada na indústria, refere-se ao movimento de materiais particulados a granel através de tubulações por meio de um fluido gasoso, que pode ocorrer tanto em direções horizontais quanto verticais. O processo se baseia na criação de um gradiente de pressão gerado por equipamentos como ventiladores, sopradores ou compressores, que impulsionam a fase sólida ao longo da linha de transporte. Esse sistema é particularmente comum em indústrias químicas, energéticas e alimentícias, sendo utilizado para transportar biomassa e outros materiais a silos de armazenamento, reatores, gaseificadores ou caldeiras. A escolha do fluido de transporte geralmente recai sobre o ar atmosférico, devido à sua disponibilidade, custo reduzido e características de manipulação segura. O presente estudo tem como objetivo avaliar a influência de fatores topológicos da malha computacional e a performance de diferentes modelos de turbulência na precisão das simulações de transporte pneumático. A complexidade dos escoamentos, especialmente em regimes de fase densa e diluída, exige uma análise cuidadosa da independência e qualidade da malha, além de uma correta escolha dos modelos de turbulência. Para esse fim, foram realizadas simulações numéricas utilizando a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), implementada no software SALOME. A análise dos resultados foi conduzida com o auxílio do software Paraview, focando em parâmetros qualitativos e quantitativos, visando uma interpretação detalhada dos padrões de escoamento e das interações entre as fases fluido e particulada. No decorrer do trabalho, foram realizados testes de independência da malha, o que permitiu a definição de uma malha intermediária hexaédrica como a mais adequada, tanto em termos de precisão quanto de eficiência computacional. A escolha de uma malha de qualidade é crítica para capturar adequadamente os fenômenos físicos, sobretudo em escoamentos pneumáticos que apresentam transições complexas entre fases diluída e densa. Além disso, o estudo comparou dois modelos de turbulência amplamente utilizados, o $k-\epsilon$ e o $k-\omega$, cujas características intrínsecas os tornam adequados para diferentes regimes de escoamento. A análise revelou que o modelo $k-\omega$ apresentou melhor desempenho, especialmente na fase densa, devido à sua capacidade de lidar com escoamentos altamente não lineares e complexos, característica presente em sistemas de transporte pneumático. A relevância deste estudo reside na otimização dos parâmetros de malha e na escolha criteriosa de modelos de turbulência, contribuindo significativamente para o avanço da compreensão do comportamento dos escoamentos em transporte pneumático.

Palavras-Chave: Transporte Pneumático, Leito Pneumático, CFD, SALOME.

ABSTRACT

Pneumatic conveying, a unitary operation widely applied in industry, refers to the movement of bulk particulate materials through pipes by means of a gaseous fluid, which can occur in both horizontal and vertical directions. The process is based on the creation of a pressure gradient generated by equipment such as fans, blowers or compressors, which drives the solid phase along the transport line. This system is particularly common in chemical, energy and food industries, being used to transport biomass and other materials to storage silos, reactors, gasifiers or boilers. The choice of transport fluid generally falls on atmospheric air, due to its availability, reduced cost and safe handling characteristics. The present study aims to evaluate the influence of topological factors of the computational mesh and the performance of different turbulence models on the accuracy of pneumatic transport simulations. The complexity of flows, especially in dense and dilute phase regimes, requires a careful analysis of the independence and quality of the mesh, in addition to a correct choice of turbulence models. To this end, numerical simulations were carried out using the Computational Fluid Dynamics (CFD) technique, implemented in the SALOME software. The analysis of the results was conducted with the aid of the Paraview software, focusing on qualitative and quantitative parameters, aiming for a detailed interpretation of flow patterns and interactions between the fluid and particulate phases. During the work, mesh independence tests were carried out, which allowed the definition of an intermediate hexahedral mesh as the most suitable, both in terms of precision and computational efficiency. Choosing a quality mesh is critical to adequately capture physical phenomena, especially in pneumatic flows that present complex transitions between dilute and dense phases. Furthermore, the study compared two widely used turbulence models, $k-\varepsilon$ and $k-\omega$, whose intrinsic characteristics make them suitable for different flow regimes. The analysis revealed that the $k-\omega$ model presented better performance, especially in the dense phase, due to its ability to deal with highly non-linear and complex flows, a characteristic present in pneumatic transport systems. The relevance of this study lies in the optimization of mesh parameters and the careful choice of turbulence models, contributing significantly to the advancement of understanding of the behavior of flows in pneumatic transport.

Keywords: Pneumatic Transport, Pneumatic Bed, CFD, SALOME.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de transporte pneumático.	12
Figura 2 - Modos de transporte pneumático: (a) Fase Diluída e (b) Fase Densa.....	13
Figura 3 - Regime de fluxos para transporte pneumático vertical.....	16
Figura 4 - Regime de fluxos para transporte pneumático horizontal.....	17
Figura 5 - Tipos de modelos de turbulência RANS.....	18
Figura 6 - Aparato experimental do sistema de transporte pneumático.....	33
Figura 7 - Geometria do sistema de transporte pneumático no SALOME.....	33
Figura 8 - Material particulado (farelo de trigo) do estudo experimental.....	36
Figura 9 - Comparativo do refinamento da malha.....	40
Figura 10 - Comparativo das pressões para o teste de malha.....	45
Figura 11 - Fração de partículas em fase diluída.....	48
Figura 12 - Pressão em fase diluída.....	50
Figura 13 - Velocidade em fase diluída.....	52
Figura 14 - Velocidade na curva em fase diluída.....	54
Figura 15 - Fração de partículas em fase densa.....	56
Figura 16 - Pressão em fase densa.....	58
Figura 17 - Velocidade em fase densa.....	59
Figura 18 - Velocidade na curva em fase densa.....	62
Figura 19 - Coordenadas para avaliação quantitativa.....	63
Figura 20 - Perfil de queda de pressão utilizando k- ϵ em fase diluída.....	64
Figura 21 - Perfil de queda de pressão utilizando k- ω em fase diluída.....	65
Figura 22 - Perfil de queda de pressão utilizando k- ϵ em fase densa.....	65
Figura 23 - Perfil de queda de pressão utilizando k- ω em fase densa.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características do transporte pneumático nas fases diluída e densa.	15
Tabela 2 - Relação entre assimetria e qualidade da célula.	28
Tabela 3 - Intervalos de qualidade ortogonal da malha.	29
Tabela 4 – Especificação do computador utilizado nas simulações.	34
Tabela 5 - Métodos de discretização: Simulação $k-\epsilon$	35
Tabela 6 - Métodos de solução numérica: Simulação $k-\epsilon$	35
Tabela 7 - Métodos de discretização: Simulação $k-\omega$	35
Tabela 8 - Métodos de solução numérica: Simulação $k-\omega$	36
Tabela 9 - Propriedades da biomassa estudada.	37
Tabela 10 - Coordenadas ao longo da tubulação no software Paraview.	42
Tabela 11 - Teste de independência de malha com elementos grosseiros hexaédricos.	43
Tabela 12 - Teste de independência de malha com elementos intermediários hexaédricos.	43
Tabela 13 - Teste de independência de malha com elementos refinados hexaédricos.	44
Tabela 14 - Teste de independência de malha com elementos intermediários tetraédricos.	44
Tabela 15 - Parâmetros de qualidade para avaliação das malhas.	46
Tabela 16 - Queda de pressão no sistema monofásico.	69
Tabela 17 - Queda de pressão no sistema multifásico.	69

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	8
2.	OBJETIVOS	10
2.1.	GERAL	10
2.2.	ESPECÍFICOS	10
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1.	TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	11
3.2.	TIPOS DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO	11
3.3.	MODO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO	13
3.4.	REGIMES DE ESCOAMENTO NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	15
3.5.	MODELOS DE TURBULÊNCIA.....	17
3.5.1.	Modelo <i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i> (RANS)	18
3.5.1.1.	Modelo $k-\varepsilon$	19
3.5.1.2.	Modelo $k-\omega$	20
3.5.2.	Modelo <i>Large Eddy Simulation</i> (LES)	21
3.5.3.	Modelo Linear.....	24
3.6.	MALHA COMPUTACIONAL	25
3.6.1.	Teste de Independência de Malha.....	26
3.6.1.1.	Parâmetro y^+	27
3.6.2.	Qualidade de Malha	27
3.6.2.1.	Razão de Aspecto.....	28
3.6.2.2.	Assimetria	28
3.6.2.3.	Ortogonalidade.....	29
3.7.	CFD NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO	29
4.	METODOLOGIA.....	32
4.1	ETAPA PRIMÁRIA	32
4.2	PRÉ-PROCESSAMENTO	32
4.2.1.	Geometria.....	32
4.2.2.	Criação da Malha.....	33
4.2.3.	Criação da Simulação.....	34
4.2.4.	Obtenção da Caracterização da Biomassa.....	36
4.3.	PROCESSAMENTO	37
4.4.	PÓS-PROCESSAMENTO	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA	39
5.1.1.	Análise Qualitativa.....	39
5.1.2.	Análise Quantitativa.....	42
5.2	MODELOS DE TURBULÊNCIA.....	47
5.2.1.	Análise qualitativa	47
5.2.2.	Análise quantitativa	62
6.	CONCLUSÃO	72
7.	REFERÊNCIA.....	74

1. INTRODUÇÃO

A transformação de matérias-primas em produtos comerciais implica em diversas operações unitárias, sendo o transporte de material particulado uma delas. Este transporte deve ser economicamente viável, não comprometer a qualidade dos produtos e evitar gargalos na produção. Além disso, a crescente preocupação ambiental motiva empresas a buscar sistemas de transporte limpos, sem emissão de partículas no ambiente. Nesse cenário, o transporte pneumático surge como uma alternativa de baixo custo em comparação aos transportadores como correias, canecas e helicoidais (LOURENÇO, 2019).

O transporte pneumático é uma técnica altamente versátil e amplamente empregada na indústria para movimentar uma ampla gama de materiais particulados a granel, caracterizados por propriedades físicas e químicas diversas. Estes materiais podem variar em tamanho, forma, densidade, índice de fluidez e pontos de fusão e ebulição. Neste método, gás, normalmente ar, é utilizado como agente de arraste para impulsionar os materiais através de um sistema de tubulação. Essa tubulação pode ser disposta em diferentes configurações, incluindo vertical, horizontal ou inclinada, dependendo das necessidades específicas do processo industrial. O funcionamento do transporte pneumático se baseia na criação de uma corrente de gás, gerada por dispositivos como ventiladores, sopradores ou compressores. Esses dispositivos aproveitam as diferenças de pressão para impulsionar o gás através da tubulação, arrastando consigo os materiais particulados (SANTOS, 2009).

Uma vantagem significativa desse método é sua capacidade de transporte eficiente e delicado, especialmente para materiais sensíveis ao manuseio, como pós finos ou frágeis. Além disso, o transporte pneumático é adequado para uma variedade de aplicações industriais, desde a indústria alimentícia até a química e farmacêutica, devido à sua flexibilidade e adaptabilidade às diferentes características dos materiais a serem transportados (CRESMASCO, 2012).

O transporte pneumático é comumente subdividido em duas classificações: em fase diluída ou densa, sendo estas diretamente ligadas à distribuição de concentração de sólidos, fração mássica de alimentação de particulados e velocidade do ar de alimentação (SANTOS, 2009). Na fase diluída, as partículas permanecem suspensas durante o percurso, caracterizando-se por baixa concentração volumétrica de sólidos e alta velocidade do ar, assim, tem-se uma grande importância na previsão das quedas de pressão e da distribuição da velocidade do ar. Na fase densa, a concentração de partículas na linha aumenta, enquanto a velocidade do ar diminui, portanto, torna-se importante para prever a distribuição de velocidade dos sólidos.

Atualmente, pesquisadores estão intensificando seus esforços para examinar os efeitos da queda de pressão em trechos horizontais, verticais, curvos e na região de alimentação de

sólidos (LOURENÇO, 2019; MILLS, 2016; GOMES, 2022). Modelos empíricos e numéricos estão em constante desenvolvimento, visando substituir gradualmente a necessidade de dependência experimental. Portanto, torna-se essencial realizar uma investigação minuciosa sobre o desempenho do transporte pneumático em fases diluída e densa em tubulações horizontais e verticais, empregando simulações de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), bem como a influência dos modelos de turbulência na precisão dos resultados.

Nos últimos anos, o transporte pneumático de materiais particulados, especialmente biomassa, tem sido foco de diversos estudos devido à sua relevância em processos industriais e ao seu impacto na eficiência energética e operacional. A tese de Gomes (2022) investiga o transporte pneumático horizontal de biomassas a partir de experimentos em uma unidade piloto, bem como através de simulações numéricas utilizando CFD. Este trabalho oferece um panorama detalhado sobre o comportamento das partículas de biomassa em escoamentos horizontais, destacando os desafios encontrados ao reproduzir experimentalmente esses sistemas e identificar parâmetros de simulação que melhor representem a realidade observada.

Por outro lado, Coêlho (2023) aborda a avaliação numérica do transporte pneumático em trechos tanto horizontais quanto verticais, focando nas propriedades físicas granulares e nas características fluídicas do sistema. Ao explorar como essas propriedades afetam o escoamento, Coêlho contribui para um entendimento mais aprofundado de como variações nos parâmetros físicos e nas condições operacionais podem alterar significativamente o desempenho do transporte pneumático, especialmente no que diz respeito à eficiência de movimentação e à minimização de perdas de pressão.

Em comparação, o presente estudo visa aprofundar a análise do transporte pneumático de biomassa, colocando ênfase na avaliação numérica de diferentes modelos de turbulência e na qualidade da malha computacional aplicada. Ao focar na análise da malha e na escolha de modelos de turbulência adequados, esta pesquisa busca complementar e expandir os trabalhos de Gomes (2022) e Coêlho (2023). Enquanto essas pesquisas fornecem uma base experimental e exploram a influência de parâmetros físicos, o atual estudo contribui com um olhar mais detalhado sobre a simulação CFD, buscando otimizar a precisão dos resultados por meio de técnicas como independência de malha e comparação entre modelos de turbulência. Com isso, espera-se que os resultados obtidos ofereçam uma abordagem mais robusta, melhorando a representação do escoamento de biomassa em simulações numéricas e promovendo avanços nas práticas de modelagem para o transporte pneumático.

2. OBJETIVOS

2.1. GERAL

Considerando as informações apresentadas, o propósito central deste estudo é analisar a malha computacional e os modelos de turbulência aplicados ao transporte pneumático com foco especialmente nas fases diluída e densa, utilizando abordagens estatísticas e métodos de Fluidodinâmica Computacional (CFD).

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 as condições em que o material particulado se encontra nas fases diluída e densa;
- Comparar a influência dos diferentes modelos de turbulência nas fases diluída e densa;
- Analisar a malha computacional, dando ênfase na independência da malha e seus parâmetros de qualidade.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TRANSPORTE PNEUMÁTICO

A incessante busca por vantagem competitiva em diversas indústrias impulsiona o constante desenvolvimento de novas soluções, visando a otimização de procedimentos, simplificação de sistemas e garantia de maior confiabilidade e disponibilidade de equipamentos. Uma área crítica em muitos setores industriais é o transporte de materiais, onde aprimoramentos são continuamente explorados para elevar a eficiência operacional. Entre os métodos de transporte de materiais mais amplamente adotados, destaca-se o sistema de transporte pneumático. Este sistema é objeto de análise e aprimoramento constante, uma vez que desempenha um papel essencial na eficiência geral dos processos industriais (CARVALHO, 2018).

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

As principais variáveis para a seleção e o dimensionamento de um sistema de transporte são: a capacidade de sólidos transportados; as distâncias e o desnível entre a carga e a descarga; a natureza do material, como as características físicas e mecânicas dos sólidos e os fatores econômicos, como os custos de aquisição, operação e manutenção (GOMIDE, 1983). Sendo assim, 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

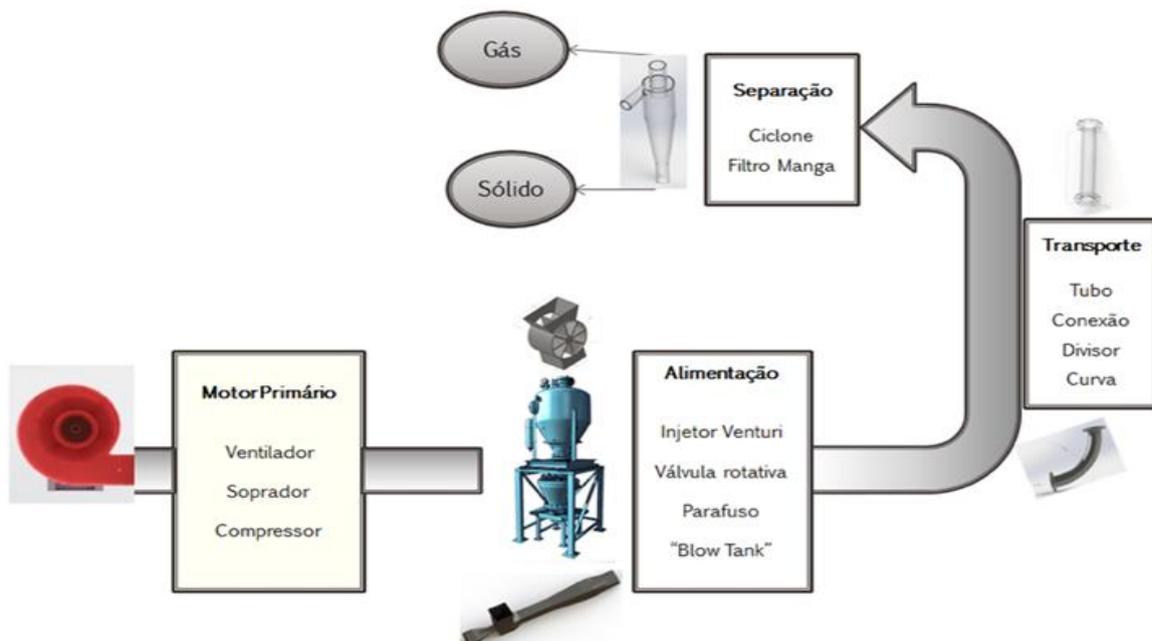
Em uma instalação de transporte pneumático, uma série de componentes vitais é cuidadosamente projetada para atender a condições operacionais específicas. O sistema de

transporte pneumático é frequentemente dividido em várias zonas, onde diferentes operações são realizadas (GOMES, 2011).

De acordo com Klinzing et al. (2010), um sistema de transporte pneumático geralmente é composto por quatro zonas distintas, cada uma exigindo equipamentos específicos para otimizar o desempenho da planta. 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, equipamentos como silos, funis ou dispositivos específicos de alimentação, como válvulas rotativas, alimentadores parafuso, entre outros são comumente utilizados para armazenar e alimentar os materiais na tubulação;
- **Linha de transporte:** Esta é a área onde ocorre o transporte efetivo dos materiais através da tubulação pneumática. 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.

Figura 1 - Sistema de transporte pneumático.



Fonte: GOMES, 2022.

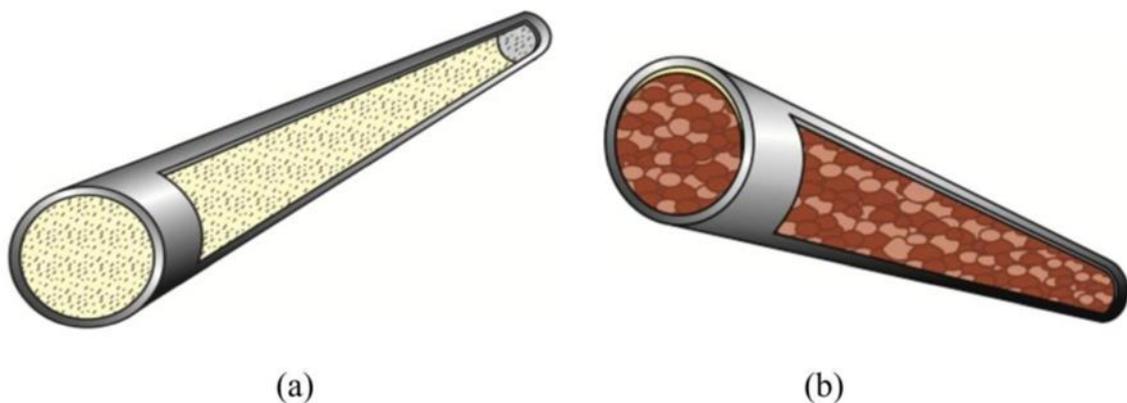
Cada uma dessas zonas desempenha um papel fundamental no funcionamento eficiente do sistema de transporte pneumático, garantindo que os materiais sejam manipulados

de forma segura e eficaz ao longo de todo o processo.

3.3. MODO DE TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Uma das principais vantagens dos dutos no sistema de transporte pneumático reside em sua notável flexibilidade. A capacidade de mudar de direção é essencial nesse contexto, e normalmente é alcançada através da instalação de acessórios como curvas e cotovelos (LOPES, 2011). No entanto, no projeto de sistemas de transporte pneumático, é crucial ter um profundo entendimento do modo de transporte, o qual é influenciado pelas propriedades das partículas e pelas condições operacionais do sistema gás-sólido. No entanto, é determinante para o projeto eficaz de sistemas de transporte pneumático possuir um profundo conhecimento do modo de transporte. Pode-se variar dependendo das propriedades das partículas transportadas e das condições operacionais do sistema gás-sólido. Esses modos de transporte são comumente classificados como transporte pneumático em fase densa ou fase diluída (KLINZING et al, 1990).

Figura 2 - Modos de transporte pneumático: (a) Fase Diluída e (b) Fase Densa.



Fonte: LOURENÇO, 2019.

O transporte pneumático em fase diluída é caracterizado por uma baixa concentração volumétrica de sólidos dentro dos tubos durante a operação, geralmente inferior a 1%. As velocidades do fluxo nesse modo de transporte são tipicamente elevadas, normalmente excedendo os 10 m/s (MORAES, 2012). Neste modo de transporte, as quedas de pressão por unidade de comprimento da linha são geralmente baixas, frequentemente inferiores a 500 Pa/m. Além disso, o transporte pneumático em fase diluída é especialmente adequado para trajetos curtos e permite o transporte contínuo de sólidos a taxas inferiores a 10 t/h. Sob estas condições de fluxo, as partículas são transportadas completamente suspensas no gás, com as forças fluido-partículas predominando (RHODES, 2008; GOMES, 2022). Essa característica torna o transporte pneumático em fase diluída ideal para uma variedade de aplicações industriais onde é necessária uma manipulação delicada e eficiente dos materiais a granel.

Comercialmente é o mais utilizado, apresenta custo de aquisição relativamente baixo, porém, proporciona o desgaste irregular da tubulação a baixas velocidades, principalmente na

parte inferior de tubos horizontais e nas curvas. Seu rendimento é altamente afetado pela queda de pressão, que por sua vez depende de vários parâmetros como as propriedades do material, configuração da tubulação e do fluxo de ar (SANTOS et al., 2011).

O transporte em fase densa é caracterizado por baixas velocidades de gás, concentrações de sólidos elevadas (normalmente superiores a 30% em volume), altas quedas de pressão por unidade de comprimento do tubo e uma alta relação de carregamento, impulsionando vigorosamente o material através da tubulação. Para alimentar esse modo de transporte, é comum o uso de 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 no gás, ao contrário do que ocorre na fase diluída. Em vez disso, as interações entre partículas e com as paredes do tubo são significativas (RHODES, 2008).

Isso pode resultar em uma dinâmica de transporte mais complexa, com um maior potencial para a abrasão e desgaste das partículas e do equipamento. Embora o transporte em fase densa possa exigir mais energia para operar devido às altas pressões necessárias, ele é frequentemente preferido em situações onde é necessária uma maior capacidade de transporte ou quando se lida com materiais mais sensíveis à fragmentação. Essa abordagem permite um transporte mais compacto e eficiente de materiais a granel em diversas aplicações industriais.

A diferenciação entre os fluxos em fase diluída e em fase densa não possui fronteiras nitidamente definidas, e ainda não existe um consenso universal sobre suas definições. Konrad (1986) propôs 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.

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 (Klinzing et al, 2010).

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, M. S. 2012; LOURENÇO, 2019).

Tabela 1 - Características do transporte pneumático nas fases diluída e densa.

	Fase Densa	Fase Diluída
Carga de Sólidos	Superior a 15	Inferior a 15
Velocidade de Transporte	Inferior a 10 m/s	Superior a 10 m/s, geralmente acima de 20 m/s
Concentração de Sólidos	Superior a 30% em volume	Inferior a 1% em volume
Pressão de Operação	Superior a 100 kPa	Inferior a 100 kPa
Vantagens	(i) Baixa relação de energia por massa de sólido transportado (ii) Baixa erosão da tubulação (iii) Baixa degradação do produto	(i) Baixo custo de aquisição e manutenção (ii) Transporte de material a maiores distâncias
Desvantagens	Elevado custo de aquisição, operação e manutenção	Elevado consumo energético e erosão na parte inferior da tubulação e em curvas

Fonte: GOMES, 2022.

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. Este cenário evidencia a existência de 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. Essa transição é observada passando de uma condição estável, caracterizada como 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).

Essa complexa dinâmica de transição entre os regimes de fluxo em fase diluída e densa destaca a importância de compreender as interações entre as propriedades do gás e dos sólidos, bem como os parâmetros operacionais do sistema, para garantir um transporte eficiente e seguro.

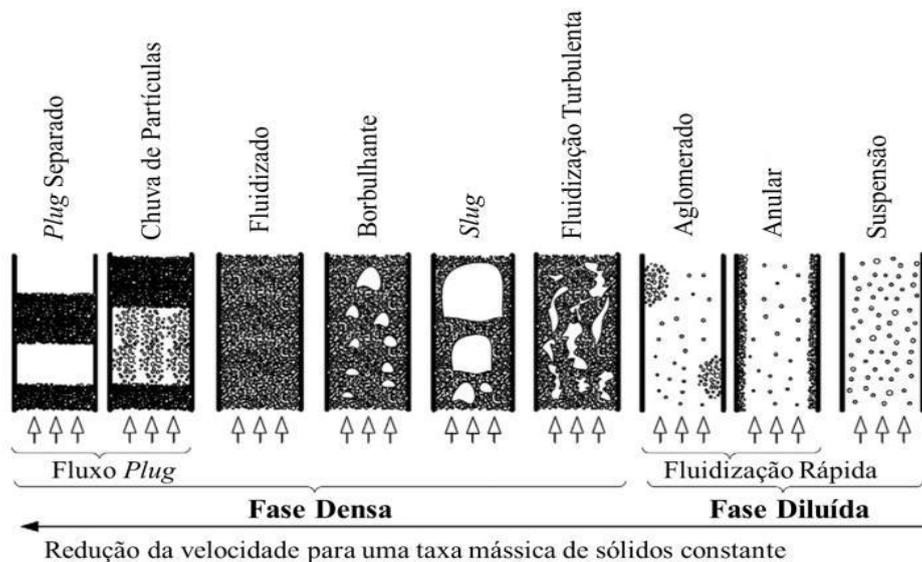
Portanto, na classificação do regime de transporte pneumático, é importante destacar

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 importante diferenciar o modo de transporte do regime de escoamento no contexto do transporte pneumático, distinguindo as fases diluída ou densa (GOMES, 2022). Por outro lado, o regime de escoamento é determinado pelo perfil de distribuição de sólidos e gás no interior da tubulação durante o transporte (LOURENÇO, 2019). As Figuras 2 e 3 exemplificam os regimes de escoamento para o transporte pneumático vertical e horizontal, respectivamente, quando a velocidade do ar transportador é gradualmente reduzida, mantendo-se uma taxa mássica constante de sólidos. Assim, o transporte horizontal tende a ser mais complexo do que o vertical devido à assimetria do escoamento induzida pela gravidade agindo normalmente à direção do fluxo. Como resultado dessa força, a fase sólida tem a tendência de se acumular no fundo da tubulação (FOKEER et al., 2004).

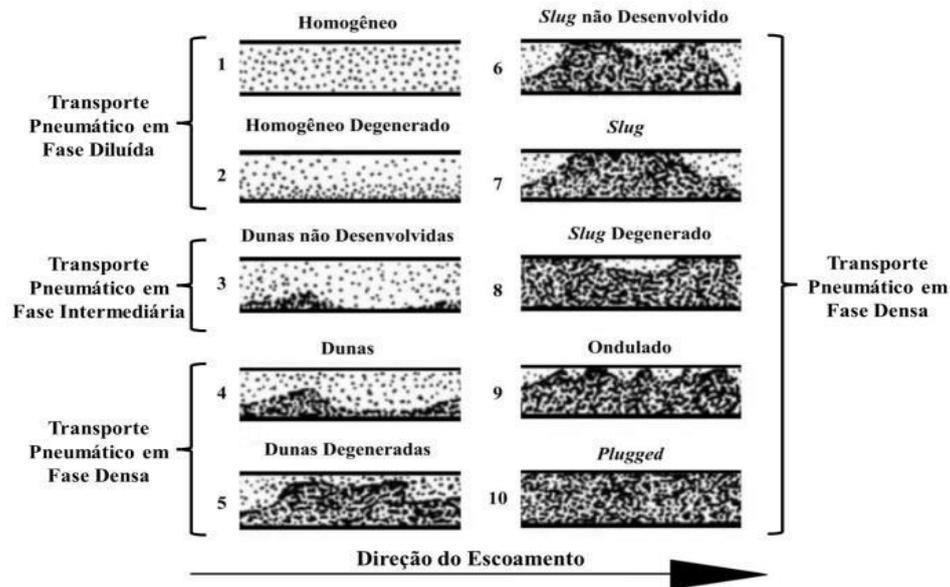
Como resultado dessa força, a fase sólida tem a tendência de se acumular no fundo da tubulação (FOKEER et al., 2004). Essa distribuição desigual de sólidos e gás ao longo do transporte horizontal pode influenciar significativamente a eficiência e a uniformidade do transporte, exigindo uma análise cuidadosa e ajustes adequados no projeto e operação do sistema para garantir um desempenho ideal.

Figura 3 - Regime de fluxos para transporte pneumático vertical.



Fonte: Rabinovich e Kalman (2011).

Figura 4 - Regime de fluxos para transporte pneumático horizontal.



Fonte: Adaptado de LOURENÇO, 2019.

3.5. MODELOS DE TURBULÊNCIA

A turbulência é um dos fenômenos mais complexos e menos compreendidos na mecânica dos fluidos. Caracterizada por movimentos instáveis, vórtices de várias escalas e alta dissipação de energia, a turbulência é um estado de fluxo que desafia tanto a análise teórica quanto a prática computacional. O fluxo turbulento ocorre em uma ampla variedade de contextos naturais e industriais, desde o escoamento de rios e o clima atmosférico até processos de mistura em reatores químicos e o fluxo de ar ao redor de veículos e aeronaves. A capacidade de modelar e prever o comportamento turbulento dos fluidos é primordial para o design e otimização de sistemas de engenharia, garantindo eficiência, segurança e inovação tecnológica.

A turbulência é descrita pelas equações de Navier-Stokes, que governam o movimento dos fluidos. Essas equações são não lineares e de difícil resolução, especialmente em regimes turbulentos onde a variabilidade espacial e temporal é intensa. Em um fluxo turbulento, as interações entre diferentes escalas de movimento são profundas, criando uma cascata de energia desde grandes estruturas, que dominam o transporte de massa, até pequenas escalas, onde a energia é dissipada em forma de calor. A resolução direta das equações de Navier-Stokes em escoamentos turbulentos, conhecida como Simulação Direta de Navier-Stokes (DNS), requer uma alta quantidade de recursos computacionais devido à necessidade de resolver todas as escalas temporais e espaciais do fluxo. Como resultado, a DNS é impraticável para a maioria das aplicações de engenharia, especialmente em geometrias complexas e condições de fluxo realistas (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Para superar essas limitações, diversos modelos de turbulência foram desenvolvidos.

Esses modelos simplificam a representação dos efeitos turbulentos, permitindo simulações mais eficientes e aplicáveis a uma variedade de problemas práticos. Os modelos de turbulência podem ser classificados em três categorias principais: Modelo *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS), Modelo *Large Eddy Simulation* (LES) e *Direct Numerical Simulation* (DNS).

3.5.1. Modelo *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS)

A turbulência é um fenômeno presente em muitos fluxos de interesse prático, como no escoamento ao redor de aeronaves, veículos e tubulações. O modelo de turbulência RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*) é uma das abordagens mais utilizadas para simular e tratar esses fluxos, baseia-se na decomposição das variáveis de fluxo em médias de tempo e flutuações, permitindo resolver as equações médias, em vez de resolver diretamente todas as escalas de turbulência, o que seria computacionalmente inviável para muitos problemas práticos (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Este modelo baseia-se na decomposição de Reynolds, que separa as variáveis de fluxo em componentes de médias e flutuantes. Para uma variável genérica ϕ , essa decomposição é dada por:

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2)$$

onde $\bar{\phi}$ representa a média temporal de ϕ e ϕ' a sua flutuação.

Substituindo essa decomposição nas equações de Navier-Stokes e tomando a média temporal, obtemos as equações RANS:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} \quad (3)$$

onde, $\overline{u'_i u'_j}$ é o tensor de tensões de Reynolds, que adiciona termos adicionais às equações médias e representa os efeitos das flutuações turbulentas.

Os modelos de turbulência RANS mais comuns são classificados com base no número de equações de transporte adicionais que precisam ser resolvidas juntamente com as equações de fluxo RANS:

Figura 5 - Tipos de modelos de turbulência RANS.

<i>No. of extra transport equations</i>	<i>Name</i>
Zero	Mixing length model
One	Spalart–Allmaras model
Two	k – ε model k – ω model
Seven	Algebraic stress model Reynolds stress model

Fonte: (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Este trabalho detalha os fundamentos, a formulação matemática e as aplicações dos modelos de duas equações mais comuns: $k-\epsilon$ e $k-\omega$.

3.5.1.1. Modelo $k-\epsilon$

Em camadas de cisalhamento finas e bidimensionais, as variações na direção do fluxo são suficientemente lentas para que a turbulência possa se ajustar às condições locais. No entanto, em fluxos onde a convecção e a difusão resultam em grandes discrepâncias entre a produção e a dissipação de turbulência, como em fluxos recirculantes, uma prescrição algébrica simples para o comprimento de mistura torna-se inadequada. Nesse contexto, é necessário adotar uma abordagem que considere as dinâmicas detalhadas da turbulência. O modelo $k-\epsilon$ aborda diretamente os mecanismos que influenciam a energia cinética turbulenta, proporcionando uma compreensão mais profunda e precisa do comportamento turbulento nesses fluxos complexos (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Na sua versão original, o modelo $k-\epsilon$ descreve os fenômenos turbulentos através de duas equações de transporte, que fornecem a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação da turbulência isotrópica (ϵ). A versão mais popular deste modelo foi desenvolvida por Launder e Spalding em 1974, após contribuições de diversos pesquisadores, e ganhou ampla aceitação a partir das versões apresentadas por Jones e Launder em 1972 e 1973. O modelo $k-\epsilon$ assume que a viscosidade turbulenta (ν_t) é função exclusivamente de (k) e (ϵ), sendo expressa pela seguinte relação (WILCOX, 2006):

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

onde ν_t é a viscosidade turbulenta e C_μ é a constante empírica.

Para este modelo, resolve-se uma equação de transporte para k e uma equação de transporte para ϵ . Com isso, conhecem-se as várias constantes da equação a partir do estudo de diferentes escoamentos turbulentos simples isolados. As equações de transporte aparecem da seguinte forma:

- **Equação de Transporte para k :**

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} + \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (5)$$

- **Equação de Transporte para ϵ :**

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} + \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) \quad (6)$$

- **Termo de Produção:**

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

na qual P_k é o termo da produção da média da energia cinética turbulenta, σ_κ e σ_ε são os coeficientes de difusão turbulenta, $C_{\varepsilon 1}$ e $C_{\varepsilon 2}$ são constantes empíricas. As constantes do modelo foram obtidas a partir da correlação de dados experimentais de diversos escoamentos turbulentos, sendo dadas por: $C_\mu = 0.09$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $\sigma_\kappa = 1.0$ e $\sigma_\varepsilon = 1.3$ (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Portanto, o modelo k - ε é amplamente utilizado em diversas aplicações industriais e de engenharia devido às suas várias vantagens. Uma das principais razões para sua popularidade é a sua robustez e eficiência em termos computacionais. Este modelo consegue fornecer uma boa previsão do comportamento turbulento em uma ampla gama de condições de fluxo, tornando-o adequado para muitas simulações práticas. Sua implementação relativamente simples e a disponibilidade de coeficientes empíricos bem estabelecidos contribuem para sua aplicabilidade e confiança entre os engenheiros.

Apesar de suas vantagens, o modelo k - ε apresenta algumas limitações. Ele é menos preciso em situações onde há fluxos com forte curvatura de superfície, como nas extremidades das asas de aviões ou nas pás de turbinas. Além disso, em fluxos com camada de limite que se separa, como aqueles encontrados em veículos em alta velocidade ou em estruturas de pontes, o modelo pode não prever com precisão o comportamento detalhado do fluxo. Outra limitação significativa é sua performance em escoamentos em vórtices, onde a complexidade do fluxo turbulento é alta. Nesses casos, o modelo k - ε pode não capturar adequadamente as interações complexas e as escalas de turbulência, resultando em previsões menos precisas (WILCOX, 2006).

3.5.1.2. Modelo k - ω

O primeiro modelo k - ω foi proposto por Kolmogorov em 1942. Este modelo, como k - ε , resolve uma equação de transporte para a energia cinética turbulenta k . No entanto, a segunda equação de transporte aborda ω , que representa a dissipação específica da turbulência. A substituição da equação de ε por ω traz várias vantagens significativas. Por um lado, a equação de ω é mais fácil de integrar, o que resulta em maior robustez e estabilidade numérica. Por outro lado, essa equação pode ser integrada ao longo da subcamada viscosa até a parede em aplicações com baixo número de Reynolds, o que melhora a precisão das simulações em regiões próximas às superfícies sólidas. Os modelos k - ε têm uma conhecida limitação em fluxos com gradientes adversos de pressão elevados, onde muitas vezes não conseguem fornecer resultados precisos. Em contrapartida, os modelos k - ω demonstram um desempenho superior nessas condições desafiadoras, fornecendo previsões mais precisas e confiáveis (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Uma melhoria no modelo de duas equações k - ω foi desenvolvido há mais de 20 anos por Wilcox (1993). Neste modelo, a expressão para v_t e a equação k são iguais como aqueles

no modelo $k-\varepsilon$. Conforme descrito em detalhes por Wilcox (1993), para fluxos da camada limite, o $k-\omega$ modelo é superior tanto no tratamento da região viscosa próxima à parede, quanto na sua contabilização dos efeitos dos gradientes de pressão no sentido da corrente, ou seja, tem-se uma projeção mais correta da evolução do perfil de velocidade adimensional em coordenadas de parede na região da lei logarítmica. O modelo $k-\varepsilon$ assume que a viscosidade turbulenta (ν_t) é função exclusivamente de (k) e (ω), sendo expressa pela seguinte relação:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega}$$

Para este modelo, resolve-se uma equação de transporte de k e uma equação de transporte para ω . As equações de transporte aparecem da seguinte forma:

- **Equação de Transporte para k :**

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma^* \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (9)$$

- **Equação de Transporte para ω :**

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} P_x - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

- **Termo de Produção:**

$$P_k = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

Temos que: β^* , σ^* , α , β , σ são constantes empíricas. As constantes do modelo foram obtidas a partir da correlação de dados experimentais de diversos escoamentos turbulentos, sendo dadas por: $\beta^* = 0.09$, $\sigma^* = 2.0$, $\alpha = 0.553$, $\beta = 0.075$ e $\sigma = 2.0$ (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

3.5.2. Modelo *Large Eddy Simulation* (LES)

O modelo de turbulência *Large Eddy Simulation* (LES) representa uma abordagem avançada para simulações de fluxos turbulentos, oferecendo uma representação mais precisa dos fenômenos turbulentos em comparação com modelos tradicionais. Deve-se em grande parte às diferenças no comportamento de vórtices grandes e pequenos. Os vórtices menores são quase isotrópicos e têm comportamento universal (para fluxos turbulentos em condições suficientemente com números de Reynolds elevados). Por outro lado, os turbilhonamentos maiores, que interagem e extraem energia do fluxo médio, são mais anisotrópicos e seu comportamento é ditado pela geometria do domínio do problema, as condições de contorno e forças corporais. No LES, as equações de Navier-Stokes incompressíveis são resolvidas diretamente para as escalas maiores da turbulência, enquanto as escalas menores são modeladas (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Isso é realizado filtrando as equações de Navier-Stokes para decompor as variáveis de fluxo em escalas grandes e pequenas. Em vez de calcular a média do tempo, o LES usa uma operação de filtragem espacial para separar os vórtices maiores e menores. Geralmente utiliza-se a equação do filtro Gaussiano, sendo uma forma de aplicar um filtro espacial às equações de Navier-Stokes para obter as equações filtradas no modelo LES. Esse filtro tem como objetivo suavizar as flutuações de alta frequência do campo de velocidade, preservando as características de baixa frequência.

O método começa com a seleção de uma função de filtragem e uma certa largura de corte com o objetivo de resolver o fluxo instável e todos aqueles vórtices com uma escala de comprimento maior que a largura de corte. Os filtros são dispositivos de separação familiares em aplicações eletrônicas e de processo que são projetados para dividir uma entrada em uma parte desejável e retida e, uma parte indesejável e rejeitada (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

No LES define-se uma operação de filtragem espacial por meio de uma função de filtro $G(x, x', \Delta)$ como segue:

$$\bar{\phi}(x, t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x, x', \Delta) \phi(x', t) d'_{x_1} d'_{x_2} d'_{x_3} \quad (12)$$

onde $\bar{\phi}(x, t)$ = função filtrada; $\phi(x, t)$ = função original (não filtrada) e Δ = largura de corte do filtro.

Na etapa seguinte, a operação de filtragem espacial é realizada nas equações de fluxo dependentes do tempo e, durante a filtragem espacial de informações com relação aos vórtices turbulentos menores, estes são filtrados e destruídos. Com isso, os efeitos de interação entre os turbilhonamentos maiores resolvidos e os menores não resolvidos dão origem às tensões em escala de sub-rede ou tensões SGS, assim, o efeito no fluxo resolvido deve ser descrito por meio de um modelo SGS. Se o método de volume finito é utilizado, as equações de fluxo dependentes do tempo e, filtradas pelo espaço, são resolvidas em uma grade de volumes de controle junto com o modelo SGS de tensões não resolvidas. Portanto, gera o fluxo médio e todos os vórtices turbulentos em escalas maiores que a largura de corte (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

No modelo de turbulência LES, as equações fundamentais resolvidas são as equações de Navier-Stokes incompressíveis, que descrevem o comportamento do fluido em termos de velocidade e pressão. As equações de Navier-Stokes incompressíveis são compostas por uma equação de continuidade e três equações de conservação de quantidade de movimento. As equações de Navier-Stokes incompressíveis para um escoamento turbulento são:

- **Equação da conservação de massa (equação de continuidade):**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

Esta equação descreve a conservação da massa em um volume de controle. Aqui, ρ é a densidade do fluido, \mathbf{u} é o vetor velocidade, e ∇ denota o operador de divergência. Desse modo, temos as seguintes equações de Navier-Stokes:

- **Equação da conservação do momento na direção x:**

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x \quad (14)$$

- **Equação da conservação do momento na direção y:**

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y \quad (15)$$

- **Equação da conservação do momento na direção z:**

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + F_z \quad (16)$$

Nestas equações, p é a pressão, μ é a viscosidade dinâmica, e F_x , F_y e F_z representam as forças externas na direção x , y e z respectivamente.

As equações de Navier-Stokes, para aplicar o modelo LES, são filtradas geralmente usando um filtro espacial, para decompor as variáveis de fluxo em escalas grandes (resolvidas diretamente pelo LES) e escalas menores (modeladas).

- **Equação da conservação de massa filtrada (equação de continuidade filtrada):**

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}) = 0 \quad (17)$$

Após a aplicação do filtro, as equações de Navier-Stokes são modificadas da seguinte forma:

- **Equação da conservação do momento na direção x filtrada:**

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{u} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{\mathbf{u}}) + \bar{\mathbf{F}} \quad (18)$$

- **Equação da conservação do momento na direção y filtrada:**

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{v} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{\mathbf{v}}) + \bar{\mathbf{F}} \quad (19)$$

- **Equação da conservação do momento na direção z filtrada:**

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{w})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{w} \bar{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\mu \nabla \bar{\mathbf{w}}) + \bar{\mathbf{F}} \quad (20)$$

Nessas equações, $\bar{\rho}$, $\bar{\mathbf{u}}$, \bar{p} e $\bar{\mathbf{F}}$ são respectivamente a densidade, a velocidade, a pressão

e as forças filtradas. O operador ∇ denota o gradiente espacial, μ é a viscosidade cinemática do fluido e \bar{F} representa as forças filtradas, que podem incluir forças de corpo, forças de superfície e outras forças externas.

Realizada a filtragem das equações de Navier-Stokes no modelo LES, as equações de subrede (SGS) podem ser derivadas para modelar as contribuições das escalas menores que foram filtradas. As equações de subgrid modeladas podem variar dependendo do modelo específico de submalha usado no LES.

A principal vantagem do LES é sua capacidade de capturar uma ampla gama de escalas espaciais e temporais, permitindo uma representação mais realista dos fenômenos turbulentos. No entanto, sua implementação requer uma malha computacional fina o suficiente para capturar as escalas maiores da turbulência, o que pode exigir recursos computacionais substanciais. Apesar disso, o LES é amplamente utilizado em uma variedade de aplicações, incluindo aerodinâmica de aeronaves, engenharia de turbinas eólicas, dispersão de poluentes atmosféricos, entre outros, destacando seu papel significativo na pesquisa e na prática da engenharia fluidodinâmica.

3.5.3. Modelo Linear

Os escoamentos são fundamentais na Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para prever e analisar os comportamentos complexos dos escoamentos turbulentos, que são caracterizados por movimentos caóticos e desordenados do fluido. O conceito de análise de turbulência linear é particularmente importante para entender a transição de um escoamento laminar para um escoamento turbulento.

O modelo de turbulência linear se refere à linearização das equações de Navier-Stokes para simplificar a análise de escoamentos complexos, como a análise de estabilidade ou o estudo de pequenas perturbações em um escoamento de base, a qual torna-se fundamental para entender a transição de escoamentos laminares para turbulentos. Ao linearizar as equações de Navier-Stokes e analisar a evolução de pequenas perturbações, podemos prever a estabilidade do escoamento de base e identificar as condições que levam à turbulência. Este conhecimento é fundamental para diversas aplicações em engenharia e ciência, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas mais eficientes e seguros (KUNDU, COHEN, DOWLING, 2015).

A análise de turbulência laminar, ou análise de estabilidade linear, se concentra em entender como pequenas perturbações em um escoamento laminar podem crescer e levar à turbulência. Esta abordagem é baseada na ideia de que um escoamento de base estável pode se tornar instável se submetido a pequenas perturbações. A análise linear é uma simplificação que permite prever a instabilidade de um escoamento sem resolver diretamente todas as escalas turbulentas.

A análise de turbulência laminar começa com as equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (21)$$

onde \mathbf{u} é o vetor velocidade, p é a pressão, ρ é a densidade do fluido, e ν é a viscosidade cinemática.

Para realizar a análise linear, é necessário decompor o escoamento total em um escoamento de base e uma pequena perturbação:

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}' \quad (22)$$

$$p = P + p' \quad (23)$$

onde \mathbf{U} e P representam o escoamento de base e, \mathbf{u}' e p' , representam as perturbações.

Ao substituir essa decomposição nas equações de Navier-Stokes e subtrair as equações referentes ao escoamento de base, obtemos as equações governantes para as perturbações:

$$\frac{\partial \mathbf{u}'}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{u}' + (\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho} \nabla p' + \nu \nabla^2 \mathbf{u}' \quad (24)$$

$$\mathbf{u}' \cdot \nabla = 0 \quad (25)$$

assumindo que as perturbações são pequenas, os termos não lineares de segunda ordem em \mathbf{u}' são desconsiderados.

Portanto, a análise de turbulência laminar desempenha um papel fundamental na engenharia e na ciência, fornecendo uma base teórica para prever e controlar a transição de escoamentos laminares para turbulentos. Além disso, a análise de estabilidade linear permite a otimização de projetos de engenharia, como asas de aviões e lâminas de turbinas, melhorando a eficiência energética e a vida útil dos componentes. Ao compreender os mecanismos fundamentais de instabilidade, os engenheiros podem desenvolver métodos eficazes de controle de fluxo, dessa forma, a análise de turbulência linear não apenas melhora a eficiência e a segurança dos sistemas, mas também contribui para a inovação tecnológica e a redução de custos operacionais (KUNDU, COHEN, DOWLING, 2015).

3.6. MALHA COMPUTACIONAL

As simulações fluidodinâmicas de sistemas multifásicos são essenciais para melhorar a compreensão dos fenômenos físicos e das variáveis envolvidas em processos complexos. Essas simulações são particularmente valiosas porque algumas grandezas físicas são difíceis de serem medidas experimentalmente. Com o avanço da tecnologia, as soluções computacionais têm se tornado menos dispendiosas e mais confiáveis, o que tem incentivado o uso de técnicas de modelagem viáveis para auxiliar no desenvolvimento e otimização de projetos, como os sistemas de transporte pneumático.

Uma malha computacional é constituída por linhas e pontos, onde os pontos de intersecção dessas linhas servem como orientação para o cálculo de propriedades físicas

baseado em um modelo matemático. Essencialmente, uma malha computacional representa a "discretização" do plano físico utilizado em simulações numéricas. A solução de um sistema de equações diferenciais, que compõem o modelo matemático, pode ser significativamente simplificada quando se utiliza uma malha bem construída (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

A malha computacional é um elemento indispensável para a precisão das simulações numéricas. Ela transforma o domínio físico contínuo em um conjunto finito de pontos, onde as equações diferenciais podem ser resolvidas numericamente. Existem diferentes tipos de malhas: estruturadas e não estruturadas. A escolha depende das características do problema a ser resolvido e das particularidades da geometria do domínio. As malhas estruturadas são compostas por elementos regulares e ordenados, como quadrados ou cubo, cada nó da malha pode ser identificado por um índice único, o que facilita a organização e a manipulação dos dados. Em contrapartida, as não estruturadas são compostas por elementos irregulares, como triângulos e tetraedros, esses elementos podem variar em forma e tamanho, proporcionando maior flexibilidade na representação de geometrias complexas (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

Para garantir que uma malha computacional seja eficiente é caracterizada por dois aspectos: teste de independência de malha e qualidade de malha.

3.6.1. Teste de Independência de Malha

O teste de independência de malha é uma etapa crucial na validação de simulações numéricas, especialmente em áreas como dinâmica dos fluidos computacionais (CFD) e análise estrutural. Este teste avalia se os resultados de uma simulação permanecem consistentes quando a malha é refinada, ou seja, quando o número de elementos da malha é aumentado. A independência de malha assegura que os resultados da simulação dependem das condições físicas e das equações matemáticas que modelam o problema, e não do tamanho dos elementos da malha.

A independência de malha, por sua vez, envolve um processo iterativo de refinamento da malha inicialmente grosseira até que as variações nas respostas entre as malhas sejam mínimas ou nulas (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007). Essa resposta é considerada convergente quando ela tende a um valor constante à medida que a malha é refinada. Se os resultados da simulação mudam significativamente com o refinamento da malha, isso indica que a malha original não era suficientemente fina para capturar todos os detalhes do fenômeno físico (GOMES, 2022). Realizar o teste de independência de malha aumenta a confiança nos resultados da simulação, pois indica que o modelo matemático e as condições de contorno estão bem definidos. Isso garante que os resultados obtidos são precisos e podem ser utilizados para previsões, análises e tomadas de decisão.

Entretanto, antes da realização do teste de independência, é necessário entender a construção de uma malha, é importante salientar que as células próximas à parede sejam devidamente dimensionadas para garantir uma simulação precisa do campo de fluxo, permitindo a identificação da formação da camada limite e a correta quantificação dos efeitos viscosos inerentes a esta região. O fator que representa a dimensão desses elementos é chamado de y^+ .

3.6.1.1. Parâmetro y^+

O parâmetro y^+ conhecido como Y Plus, desempenha uma função importante na simulação numérica de dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), especialmente na modelagem da camada limite. Ele representa a proximidade entre a parede sólida e o primeiro ponto da camada limite adjacente, em relação ao tamanho das células da malha, sendo frequentemente utilizado para descrever o quão grosseira ou refinada é uma malha para um padrão de fluxo específico. O valor do y^+ é calculado da seguinte forma:

$$y^+ = \frac{\rho_f y u_t}{\mu} \quad (26)$$

onde y é a distância da parede até o primeiro ponto da camada limite, ρ é a densidade do fluido, u_t é a velocidade de atrito na parede e μ é a viscosidade dinâmica do fluido.

A velocidade de atrito é definida como:

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_f}} \quad (27)$$

em que τ_w é a tensão de cisalhamento na parede.

O processo de realização do teste de independência de malha envolve uma etapa importante a qual são definidas várias malhas com diferentes resoluções, variando desde uma malha grosseira, com poucos elementos, até uma malha muito fina, com muitos elementos. Essas malhas são geradas de maneira que o refinamento seja progressivo e uniforme (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007). Posteriormente, são realizadas simulações numéricas utilizando cada uma das malhas definidas.

Portanto, além de garantir a precisão dos resultados, o teste de independência de malha é essencial para identificar erros numéricos, como erros de truncamento e discretização. Esses erros podem ser minimizados ao realizar o teste, permitindo identificar regiões da malha que necessitam de refinamento adicional ou ajustes nas condições de contorno.

3.6.2. Qualidade de Malha

A qualidade da malha é um aspecto fundamental nas simulações numéricas, influenciando diretamente a precisão e a eficiência dos resultados obtidos. Uma malha de alta qualidade permite uma melhor representação do domínio físico, minimiza os erros numéricos e o tempo computacional e, com isso, permite um aumento na taxa de convergência

necessária. Diferentes parâmetros podem avaliar características dos volumes de controle na malha, sendo denominados de métricas da malha, com destaque para a razão de aspecto, assimetria e ortogonalidade (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

3.6.2.1. Razão de Aspecto

A razão de aspecto é a relação entre as dimensões dos elementos da malha, ou seja, é o grau de alongamento/deformação dos elementos da malha. Uma razão de aspecto baixa, próxima de 1, indica que o elemento é aproximadamente equidimensional, o que é desejável para a maioria das simulações, podendo garantir os melhores resultados. Elementos com alta razão de aspecto, ou seja, alongados ou achatados, podem levar a erros numéricos significativos e aumentar a dificuldade na convergência das soluções. Dessa forma, recomenda-se que o seu valor máximo seja inferior a 100 (MARQUARDT, 2019; GOMES, 2022).

3.6.2.2. Assimetria

A assimetria, ou *skewness*, é uma das principais medidas de qualidade de uma malha, demonstrando o quão próxima uma célula está de sua forma ideal. Um valor de 0 indica uma célula equilátera, representando a melhor qualidade, enquanto um valor de 1 indica uma célula completamente degenerada, representando a pior qualidade. Portanto, evitar células altamente distorcidas é determinante para garantir a qualidade da simulação (ANSYS Fluent User's Guide, 2016).

A Tabela 2 apresenta um guia abrangente para a relação entre a assimetria (*skewness*) e a qualidade das células da malha. Em malhas tridimensionais (3D), é esperado que a maioria das células possua qualidade boa ou superior. No entanto, é comum que uma pequena porcentagem das células se situe na faixa de qualidade razoável, e algumas poucas células possam ser classificadas como de baixa qualidade (GOMES, 2022).

Tabela 2 - Relação entre assimetria e qualidade da célula.

<i>Skewness</i>	Qualidade da célula
1	Degenerada
0,9 – <1	Ruim
0,75 – 0,9	Pobre
0,5 – 0,75	Razoável
0,25 – 0,5	Boa
> 0 – 0,25	Excelente
0	Equilátera

Fonte: GOMES, 2022.

Em geral, recomenda-se que a malha apresente um valor máximo de assimetria (*skewness*) inferior a 0,95, com um valor médio significativamente menor. Valores de

skewness superiores a 0,95 podem resultar em dificuldades de convergência e comprometer a precisão dos resultados (ANSYS Fluent User's Guide, 2016).

3.6.2.3. Ortogonalidade

A ortogonalidade refere-se ao grau em que os vetores dos elementos da malha são perpendiculares entre si. Idealmente, as linhas que conectam os centros dos elementos adjacentes devem ser perpendiculares às faces comuns desses elementos. O conceito de ortogonalidade da malha está associado ao quanto os ângulos entre faces de elementos ou entre arestas de elementos adjacentes estão próximos de um ângulo ótimo, 90° para elementos com faces quadrilaterais e 60° para elementos com faces triangulares (VENTURIN, 2014). As células de pior qualidade terão uma ortogonalidade próxima de 0, enquanto as células de melhor qualidade terão uma ortogonalidade próxima de 1.

Tabela 3 - Intervalos de qualidade ortogonal da malha.

Inaceitável	Ruim	Aceitável	Bom	Muito Bom	Excelente
0 – 0,001	0,001 – 0,14	0,15 – 0,20	0,20 – 0,69	0,70 – 0,95	0,95 – 1

Fonte: GOMES, 2022.

Na Tabela 3, é apresentado o limite inferior permitido para os critérios de qualidade ortogonal, sendo 0,15 o valor mínimo aceitável.

A qualidade da malha é um fator determinante para o sucesso das simulações numéricas, avaliar e garantir a qualidade através de critérios como razão de aspecto, ortogonalidade e assimetria é essencial para obter resultados precisos e confiáveis. A atenção a esses aspectos durante a geração e o refinamento da malha ajuda a determinar que a malha gerada é capaz de capturar todos os detalhes relevantes do fenômeno físico estudado, proporcionando uma base sólida para análises e decisões.

3.7. CFD NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O transporte pneumático de materiais particulados é vital em várias indústrias, como a alimentícia, farmacêutica, química e de mineração. Este método envolve a movimentação de sólidos por meio de um gás, geralmente ar, através de dutos fechados. A eficiência desse processo é importante para a produtividade industrial, mas sua complexidade intrínseca apresenta grandes desafios de engenharia. As características do transporte, como padrão de fluxo e queda de pressão, são influenciadas por diversos fatores, incluindo a geometria e orientação da tubulação, as condições operacionais (vazão do ar transportador e carga de sólidos), bem como as propriedades das partículas e das paredes do tubo (Mills, 2016b; Gomes, 2022). Com os avanços tecnológicos e o aumento da capacidade de processamento dos computadores, juntamente com os altos custos de construção de plantas piloto, a dinâmica de fluidos computacional (CFD) tornou-se uma ferramenta avançada para estudar os vários

aspectos desse tipo de transporte (Ariyaratne, Ratnayake e Melaaen, 2018).

Esses benefícios tornam a CFD uma ferramenta viável para análise e projeto de situações complexas de fluxo multifásico (Manjula et al., 2017). A aplicação da CFD no transporte pneumático envolve a modelagem detalhada tanto do escoamento do fluido quanto do movimento das partículas, permitindo a solução de um conjunto de equações diferenciais acopladas que expressam a conservação de massa, energia e movimento em um sistema.

Entre as pesquisas documentadas que utilizam a análise CFD para auxiliar na compreensão e previsão dos escoamentos gás-sólido em sistemas de transporte pneumático, destaca-se o estudo de Patro e Dash (2014). Nesse estudo, foi empregada a metodologia Euler-Euler, incorporando a teoria cinética do escoamento granular, para investigar os atributos relacionados à queda de pressão e à fluidodinâmica dos escoamentos gás-sólido em tubos horizontais. O modelo desenvolvido por Patro e Dash foi validado com resultados experimentais previamente documentados na literatura, garantindo a robustez e a precisão das simulações. A metodologia Euler-Euler é particularmente adequada para esse tipo de estudo, pois permite a modelagem detalhada das interações entre as fases gás e sólido, tratando ambas como contínuas. A inclusão da teoria cinética do escoamento granular aprimora a precisão do modelo ao considerar os efeitos das colisões e fricções entre partículas sólidas, aspectos fundamentais para uma representação realista do comportamento do escoamento.

Por meio das simulações realizadas, os pesquisadores foram capazes de propor uma correlação para prever a queda de pressão na zona de fluxo completamente desenvolvido. Essa correlação é uma contribuição significativa, fornecendo uma ferramenta prática para engenheiros projetarem e otimizarem sistemas de transporte pneumático, permitindo previsões precisas da queda de pressão com base em parâmetros operacionais e características do material transportado.

O uso de softwares de simulação tem se tornado uma ferramenta essencial na análise e otimização de processos industriais complexos, como o transporte pneumático de materiais particulados. A simulação computacional permite a visualização detalhada dos escoamentos, possibilitando uma compreensão aprofundada dos fenômenos físicos envolvidos, como interações entre fases sólida e gasosa, turbulência, e padrões de fluxo em diferentes regimes. No contexto do transporte pneumático, ferramentas de CFD (Fluidodinâmica Computacional) têm desempenhado um papel crucial, uma vez que permitem prever o comportamento do sistema sem a necessidade de extensivos testes experimentais, otimizando tempo e recursos. Entre os softwares amplamente utilizados para esse fim, destacam-se o SALOME e o OpenFOAM.

O software SALOME foi criado para otimizar o pré e pós-processamento em simulações numéricas, com foco em análises de elementos finitos e problemas de física

computacional. Seu desenvolvimento começou no final dos anos 1990, fruto de uma colaboração entre o Commissariado de Energia Atômica e Energias Alternativas da França (CEA) e a empresa Open Cascade. O objetivo era criar uma plataforma integrada e flexível para engenheiros e cientistas. Lançado oficialmente em 2001 sob a licença de código aberto GNU LGPL, SALOME tem evoluído continuamente, incorporando novas funcionalidades e suportando uma ampla gama de aplicações industriais e científicas. As principais características do software incluem ferramentas avançadas para modelagem geométrica, geração de malhas estruturadas e não estruturadas, integração com diversos solvers numéricos e visualização avançada de resultados.

Já o OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) a qual é um software gratuito e de código aberto, desenvolvido em 2004 pela OpenCFD Ltd. Este programa é amplamente utilizado em contextos comerciais e acadêmicos, abrangendo diversas áreas da engenharia, como dinâmica de fluidos computacional (CFD), transferência de calor, dinâmica de partículas, acústica, entre outras. Desenvolvido predominantemente em C++, o OpenFOAM oferece uma estrutura modular que permite extensiva personalização e expansão. Sua estrutura de arquivos padronizada é organizada em três pastas principais: *system*, *constant* e *times*, facilitando a configuração e gestão dos casos de simulação (FATTI, 2021). Além disso, o OpenFOAM é suportado por uma comunidade ativa que contribui para a contínua evolução do software, proporcionando uma ampla gama de *solvers* e ferramentas pré-configuradas, bem como documentação detalhada e recursos educativos. A flexibilidade e a robustez do OpenFOAM o tornam uma ferramenta essencial para a realização de simulações complexas e inovadoras em engenharia.

A combinação dessas ferramentas permite a realização de simulações robustas e a análise detalhada dos resultados, fornecendo subsídios importantes para a tomada de decisões na engenharia de sistemas pneumáticos, desde o projeto de novas instalações até a otimização de processos operacionais existentes.

4. METODOLOGIA

4.1 ETAPA PRIMÁRIA

A fase inicial deste estudo consistiu em uma extensa revisão bibliográfica sobre o transporte pneumático, abrangendo diversos aspectos fundamentais. Foram explorados os modos e tipos de transporte pneumático, além dos modelos de turbulência aplicáveis. A revisão também envolveu uma análise da fluidodinâmica computacional (CFD), focando na compreensão e aplicação dessa ferramenta em simulações de transporte pneumático.

Adicionalmente, foi avaliado a importância dos parâmetros de qualidade da malha na CFD, identificando aqueles que são essenciais para a precisão dos resultados. Paralelamente, foi conduzido um teste de independência de malha, assegurando que os resultados das simulações não fossem influenciados pela discretização da malha utilizada.

4.2 PRÉ-PROCESSAMENTO

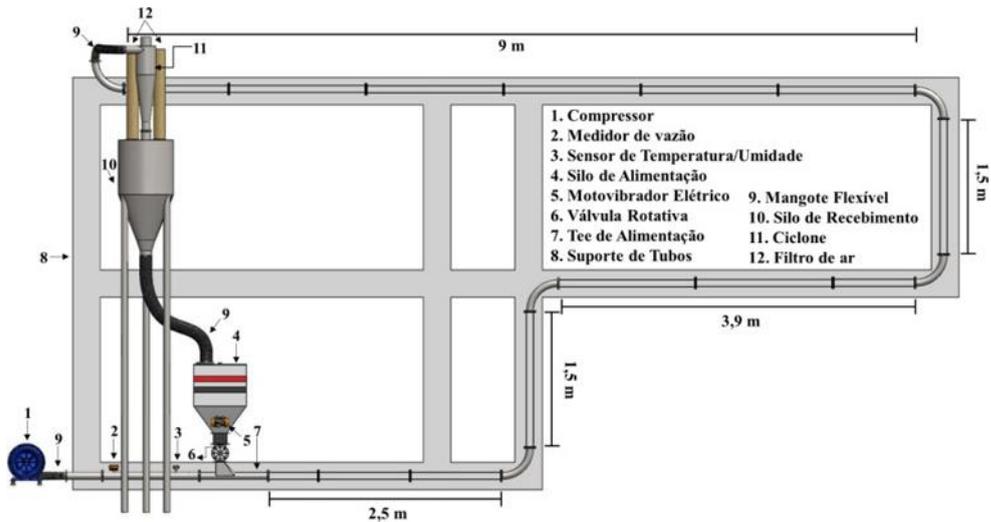
Durante a etapa de pré-processamento, com base no Planejamento Composto Central (PCC) apresentado no estudo de Coêlho (2023), foram avaliadas 9 condições experimentais, variando-se as duas principais variáveis independentes: a velocidade do ar e a concentração de partículas. O objetivo desse planejamento foi investigar como essas variáveis influenciam o comportamento do sistema de transporte pneumático nas fases diluída e densa. Após a execução das simulações, foi realizada uma análise detalhada dos resultados, permitindo identificar que as simulações 1 e 2 atingiram de forma satisfatória o comportamento característico dessas duas fases. A simulação 1 demonstrou eficiência no regime de fase diluída, enquanto a simulação 2 destacou-se na fase densa. Este procedimento visou uma investigação preliminar dos efeitos dos modelos de turbulência sobre as duas variáveis específicas na linha de transporte do sistema pneumático. Além disso, foi realizada a caracterização da biomassa com base no estudo de Gomes (2022), tendo a farinha de trigo como escolha de referência e, com isso, complementando a fase de preparação dos dados. Para a confecção da geometria do corpo de estudo (leito pneumático) e a criação da malha utilizou-se o software SALOME e, para simulação foi realizada pelo software OpenFoam que se mostraram adequados para a geração precisa da geometria, criação de uma malha de qualidade e uma simulação satisfatória.

4.2.1. 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 6.

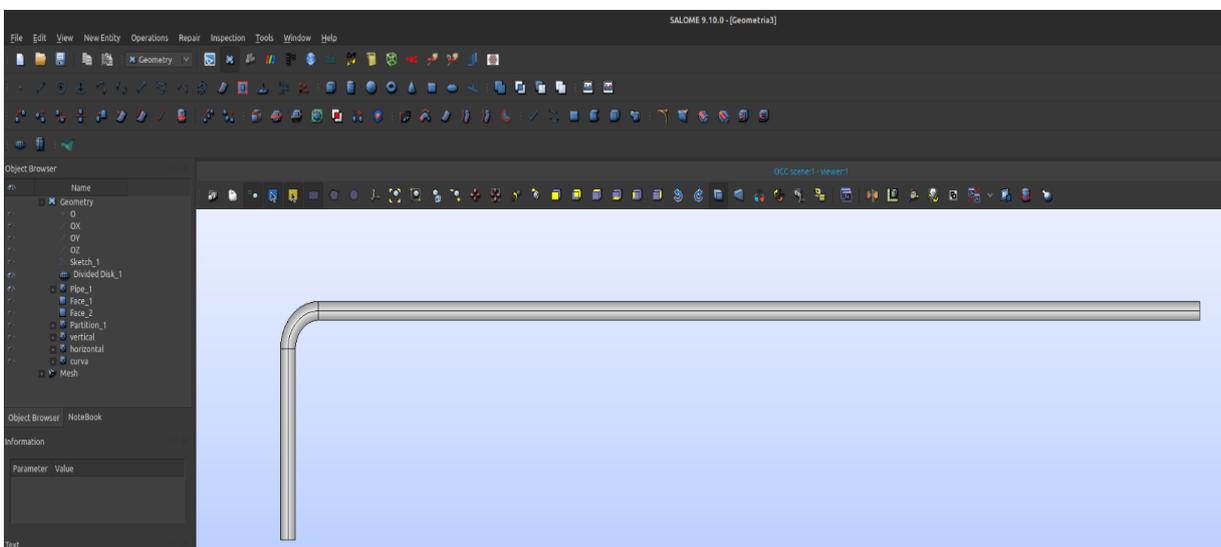
Figura 6 - Aparato experimental do sistema de transporte pneumático.



Fonte: GOMES, 2022.

Com base no aparato geométrico desenvolvido por Gomes (2022) e ilustrado na Figura 6, foi realizada a construção da geometria utilizando o software SALOME. Neste estudo, considerou-se apenas a parte final do trecho da tubulação, abrangendo as seções vertical, curva e horizontal, conforme demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Geometria do sistema de transporte pneumático no SALOME.



Fonte: Autor, 2024.

4.2.2. Criação da Malha

Este estudo se concentra na avaliação do transporte pneumático de biomassa em fases diluída e densa, abordando o transporte vertical, horizontal e curvo. Devido à extensão significativa da unidade piloto, foi selecionada uma região específica para a análise numérica. O objeto de estudo abrange 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 analisada detalhadamente para descrever o comportamento das partículas, pois ela é crucial na mudança de direção da trajetória do

escoamento gás-sólido. A compreensão do comportamento das partículas nesta curva é essencial para otimizar o desempenho do sistema de transporte pneumático.

Utilizando o software SALOME, foi construída uma malha tridimensional estruturada com células hexaédricas e outra com células tetraédricas empregando as mesmas dimensões do equipamento experimental, para a simulação foi utilizado o software OpenFoam. Esta abordagem permite uma simulação precisa do comportamento das partículas e do escoamento dentro do sistema, fornecendo dados valiosos para a melhoria dos processos industriais relacionados ao transporte pneumático de biomassa.

4.2.3. Criação da Simulação

A escolha da infraestrutura computacional é um fator determinante no sucesso de simulações numéricas, especialmente em áreas como a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD), onde a precisão dos resultados e a eficiência do processamento dependem diretamente da capacidade de hardware e software utilizados. Conforme Tabela 4, tem-se as especificações do computador utilizado no presente estudo.

Tabela 4 – Especificação do computador utilizado nas simulações.

Computador	Memória	Processador	Núcleos	Placa de vídeo
1	64.0 GB	2x Processador Ryzen 9 7950x	32	RTX 3060

Fonte: Autor, 2024.

Alguns arquivos são fundamentais na configuração de simulações no OpenFOAM, como por exemplo *fvSolution* e *fvSchemes* pois definem, respectivamente, os solucionadores e esquemas numéricos utilizados. O arquivo *fvSolution* desempenha um controle da convergência e precisão das simulações numéricas no OpenFOAM, especificando os solucionadores para cada variável envolvida no problema, como pressão, velocidade, densidade (massa específica) e fração volumétrica de fases distintas. Essas configurações são ajustadas com base na complexidade e na natureza física do problema, sendo fundamentais para garantir que as soluções numéricas sejam alcançadas de forma eficiente e estável. O arquivo *fvSchemes*, por sua vez, define os métodos discretizadores aplicados às operações matemáticas fundamentais que surgem na formulação dos problemas de dinâmica dos fluidos computacional.

Como parte essencial da modelagem numérica do escoamento no circuito pneumático, foram estabelecidas condições de contorno que representam o ambiente experimental e físico do sistema. Para as condições de pressão, tanto no *underflow* quanto no *overflow*, adotou-se a pressão atmosférica como referência, ou seja, uma condição de pressão de 101325 Pa (1 atm). A velocidade de entrada do fluxo foi definida em 6 m/s, configurando um regime de

escoamento controlado para a fase fluida. Esta taxa de velocidade foi escolhida com base no estudo de Coêlho (2023) a qual tem uma tendência de se garantir uma adequada mistura. Adicionalmente, a simulação considerou diferentes concentrações volumétricas de partículas sólidas, refletindo as características distintas das fases diluída e densa. Na fase diluída, uma concentração de 5% (v/v) (Coêlho, 2023) foi configurada, representando um fluxo onde as interações entre partículas são relativamente fracas e o comportamento é dominado pela fase contínua (fluido). Já na fase densa, a concentração foi elevada para 25% (v/v) (Coêlho, 2023), indicando um regime onde as interações entre partículas são significativas, influenciando não apenas a dinâmica do fluxo, mas também a resistência ao movimento e as taxas de colisão e aglomeração de partículas. Por fim, tem-se a aceleração da gravidade, mantida em $9,81 \text{ m/s}^2$.

Desta forma, aplicando aos modelos de turbulência e com as condições de contorno definidas, tem-se as seguintes configurações:

Tabela 5 - Métodos de discretização: Simulação $k-\epsilon$.

fvSchemes	
ddtSchemes	Euler
gradSchemes	Gauss linear
divschemes	"div(alphaPhi.*,p)": Gauss limitedLinear "div(alphaRhoPhi.*, (k epsilon).*)" Gauss limitedLinear
laplacianSchemes	Gauss linear uncorrected
interpolationSchemes	Linear
snGradSchemes	Uncorrected

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 6 - Métodos de solução numérica: Simulação $k-\epsilon$.

fvSolution		
PIMPLE	correctPhi	No
	nOuterCorrectors	3
	nCorrectors	3
	nNonOrthogonalCorrectors	0
Fator de relaxação	0,9	-

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 7 - Métodos de discretização: Simulação $k-\omega$.

fvSchemes	
ddtSchemes	Euler
gradSchemes	Gauss linear
divschemes	"div(phi.*,U.*)": Gauss limitedLinearV "div(alphaRhoPhi.*, (k omega).*)" Gauss limitedLinear
laplacianSchemes	Gauss linear uncorrected
interpolationSchemes	Linear
snGradSchemes	Uncorrected

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 8 - Métodos de solução numérica: Simulação k- ω .

fvsolution		
PIMPLE	correctPhi	No
	nOuterCorrectors	3
	nCorrectors	3
	nNonOrthogonalCorrectors	0
Fator de relaxação	0,9	-

Fonte: Autor, 2024.

4.2.4. Obtenção da Caracterização da Biomassa

A biomassa utilizada neste estudo baseia-se no trabalho desenvolvido por Gomes (2022), que serviu de referência para a caracterização completa do material. O farelo de trigo (FTR) foi utilizado conforme fornecido comercialmente, sem processamentos adicionais, conforme ilustrado na Figura 8.

Inicialmente, o material foi submetido a um processo de caracterização abrangente para determinar diversas propriedades físicas. Essas propriedades incluem a 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. Todos os processos de caracterização foram realizados em triplicata, garantindo a precisão e confiabilidade dos dados obtidos no estudo de Gomes (2022).

Essas caracterizações são essenciais para entender o comportamento do farelo de trigo durante o transporte pneumático, uma vez que as propriedades físicas influenciam diretamente a eficiência e o desempenho do sistema. A análise detalhada das propriedades permite otimizar o transporte pneumático de biomassa, contribuindo para a melhoria dos processos industriais associados.

Figura 8 - Material particulado (farelo de trigo) do estudo experimental.



Fonte: GOMES, 2022.

Os valores médios das propriedades avaliadas para o material, juntamente com seus respectivos desvios padrão, estão apresentados na Tabela 9. Esses dados fornecem uma visão detalhada das características físicas da biomassa estudada, fundamentais para a análise e otimização do transporte pneumático.

Tabela 9 - Propriedades da biomassa estudada.

Material	Grupo Geldart	d_s (μm)	ρ_{ba} (kg/m^3)	ρ_{bc} (kg/m^3)	ρ_s (kg/m^3)	ρ_{real} (kg/m^3)	\bar{U}_{bs} (%)	α ($^\circ$)	HR (-)	Ψ (-)
FTR	B	338,92	318,19	455,04	1069,36	1392,4	12,68	41,03	1,43	0,62
		\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm	\pm
		18,35	3,53	3,49	3,22	5,3	0,21	1,24	0,02	0,03

Fonte: GOMES, 2022.

Conforme apresentado na Tabela 9, todas as biomassas foram classificadas como pertencentes ao grupo B de Geldart. Este grupo é caracterizado por materiais granulares que apresentam fácil fluidização, não retendo a aeração. Conseqüentemente, o leito fluidizado colapsa quase que instantaneamente quando o suprimento de ar é interrompido (MILLS; JONES; AGARWAL, 2004; GOMES, 2022). A classificação no grupo B de Geldart é relevante para a análise do comportamento das biomassas durante o transporte pneumático, pois indica que esses materiais possuem boas características de fluidização, facilitando o transporte em sistemas pneumáticos.

4.3. PROCESSAMENTO

Na etapa de processamento, foi realizado um estudo de simulação numérica utilizando o OpenFOAM, um software amplamente utilizado para simulações computacionais de dinâmica de fluidos. O material granular empregado neste estudo foi o farelo de trigo, com o ar atmosférico atuando como fluido de transporte (GOMES, 2022). O uso do OpenFOAM permitiu a obtenção de dados detalhados e informações relevantes sobre os fenômenos envolvidos no transporte pneumático. A simulação fornece informações sobre o comportamento do farelo de trigo durante o transporte em fase diluída e densa, incluindo aspectos como distribuição de velocidade e pressão, interação entre as partículas e o fluido. Para garantir a precisão das simulações, foi adotada uma malha tridimensional estruturada com células hexaédricas, que proporcionou uma representação fiel do sistema físico. Os modelos de turbulência foram selecionados e calibrados para refletir as condições reais do escoamento.

4.4. PÓS-PROCESSAMENTO

Posteriormente, o software ParaView 5.12 foi utilizado para realizar uma análise quantitativa e qualitativa dos resultados. Essa análise permitiu uma compreensão aprofundada dos fenômenos associados aos modelos de turbulência no transporte pneumático, oferecendo informações cruciais sobre os comportamentos turbulentos e facilitando a interpretação dos resultados obtidos de forma tanto qualitativa quanto quantitativa. No estágio de pós-processamento, foram examinados os dados gerados durante as simulações para analisar as relações entre as variáveis dependentes, como a queda de pressão e a região de aceleração, e as variáveis independentes, como a concentração de sólidos e a velocidade do fluido. Esta análise permitiu uma avaliação detalhada do desempenho dos modelos de turbulência sob

diferentes condições e parâmetros operacionais.

Os resultados das simulações foram então comparados e validados com dados experimentais disponíveis na literatura. Esta comparação foi fundamental para verificar a precisão dos modelos de turbulência e assegurar a validade dos resultados obtidos. A validação através de dados experimentais garantiu a confiabilidade das conclusões tiradas do estudo, fornecendo uma base sólida para a interpretação dos fenômenos de transporte pneumático e a eficácia dos modelos de turbulência aplicados.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A precisão e a eficiência das simulações computacionais em dinâmica dos fluidos (CFD) são influenciadas por diversos fatores, sendo a independência de malha e a escolha do modelo de turbulência dois dos aspectos mais críticos. Este estudo se propõe a investigar ambos os aspectos, realizando uma análise detalhada dos efeitos do refinamento de malha e da escolha de diferentes modelos de turbulência – especificamente, os modelos $k-\varepsilon$, $k-\omega$ e linear. Primeiramente, um teste de independência de malha é conduzido para avaliar a convergência dos resultados e identificar a densidade de malha adequada para cada modelo de turbulência. Em seguida, com a malha otimizada, são realizadas simulações utilizando os três modelos de turbulência, permitindo uma comparação detalhada em termos de precisão, erro de discretização e capacidade de captura dos fenômenos turbulentos.

As simulações realizadas utilizando o OpenFOAM resultaram em 380 passos de tempo. Esses passos referem-se à discretização temporal em intervalos finitos, durante os quais as equações que descrevem o comportamento do sistema pneumático, numericamente, são resolvidas (Coelho, 2023). Esse processo é essencial para garantir a precisão das previsões de comportamento do sistema ao longo do tempo. Além disso, vale destacar que o estudo gerou mais de 500 gigabytes de dados, refletindo a complexidade e o detalhamento das simulações realizadas. O tempo médio de algumas simulações atingiu um total de mais de 280 horas, o que corresponde a aproximadamente 11 dias.

Após a geração dos dados, todos os arquivos foram carregados no software Paraview para o pós-processamento das simulações referentes ao material de estudo, no caso, farelo de trigo. O Paraview permitiu a criação de diversas configurações gráficas. Essas visualizações foram essenciais para a verificação dos fenômenos físicos envolvidos no sistema pneumático, abrangendo tanto aspectos quantitativos quanto qualitativos.

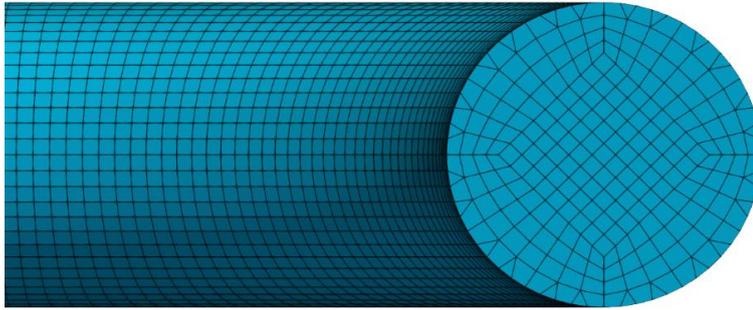
5.1 TESTE DE INDEPENDÊNCIA DE MALHA

5.1.1. Análise Qualitativa

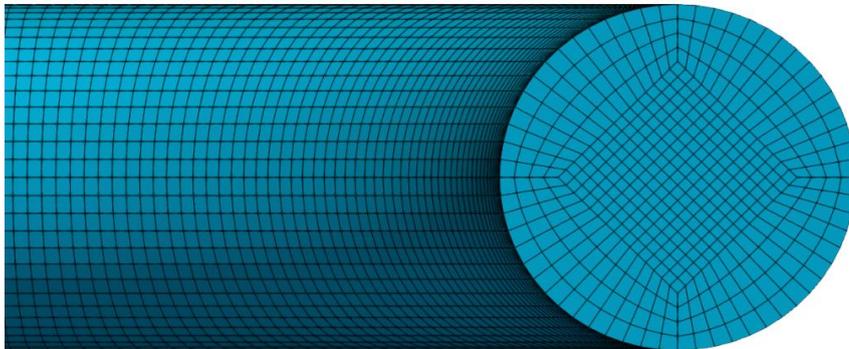
Para realizar o teste de independência de malha deste trabalho foram adotadas malhas hexaédricas classificadas como grosseira, intermediária e refinada e, além disso, foi criada uma malha tetraédrica afim de realizar um comparativo entre as geometrias. A simulação consistiu em verificar também a pressão e velocidade em certos pontos da tubulação utilizando apenas o fluxo gasoso para o teste e com os resultados gerados utilizou-se o software Paraview para análise qualitativa. Na Figura 9 é apresentado a estrutura das malhas, verificando sua qualidade e eficácia, assim como avaliações comparativas entre as simulações, a qual identificou-se parâmetros de qualidade que influenciaram na determinação da escolha da malha final.

Figura 9 - Comparativo do refinamento da malha.

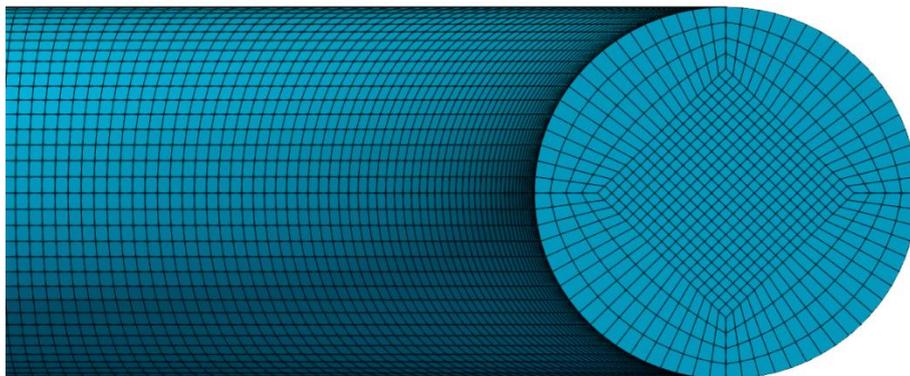
Malha Grosseira - Hexaédrica



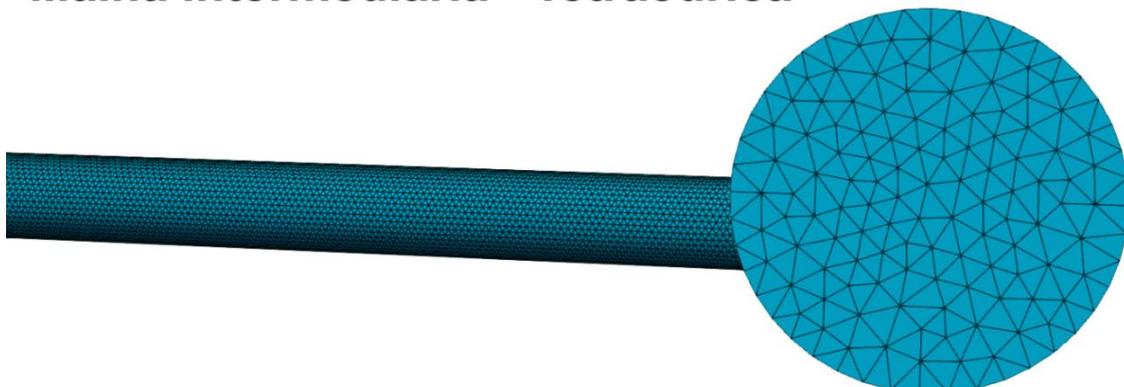
Malha Intermediária - Hexaédrica



Malha Refinada - Hexaédrica



Malha Intermediária - Tetraédrica



Fonte: Autor, 2024.

O refinamento de malha computacional é um processo fundamental em simulações

numéricas, especialmente em dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Esse processo envolve a divisão do domínio de interesse em elementos discretos menores para resolver equações diferenciais que governam o comportamento físico do sistema estudado. O refinamento de malha visa aumentar a precisão dos resultados da simulação ao capturar mais detalhes do fenômeno físico (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007). Tendo isso em consideração, o parâmetro y^+ , importante para o processo de refino, foi inicialmente estabelecido no valor de 1. A partir desse valor de referência, foram definidos mais dois valores de y^+ para explorar diferentes granularidades na malha: um valor 50% menor e outro 50% maior que o valor inicial. Conseqüentemente, os valores obtidos foram 0,5, 1 e 1,5. Estes valores correspondem às classificações das malhas como refinadas, intermediária e grosseiras, respectivamente.

A malha grosseira, com y^+ de 1,5, facilita uma análise mais rápida, porém com menor resolução dos fenômenos de camada limite. Já a malha intermediária, com y^+ de 1, representa um balanço adequado entre precisão e tempo computacional. Por fim, a malha refinada, com y^+ de 0,5, permite uma captura detalhada dos efeitos de superfície, essencial para análises mais críticas e detalhadas (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

O número de elementos gerados após a construção das malhas reflete diretamente a complexidade e a capacidade de resolução de cada uma dessas configurações. Assim, os valores de elementos foram 328.929 para a malha grosseira, 613.800 para a malha intermediária e 952.556 para a malha refinada.

Uma malha adequada é fundamental para uma simulação numérica, sendo o controle mais efetivo para erros de discretização. A geração de uma malha de qualidade depende da escolha do tipo de elemento utilizado (tetraédrico ou hexaédrico), e da verificação de métricas que estimam a deformação desses elementos (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

As malhas computacionais são predominantemente compostas por elementos tetraédricos e hexaédricos. A escolha do tipo de elemento é baseada no tempo de pré-processamento, custo computacional durante a solução, e acurácia numérica. Elementos tetraédricos são preferidos para geometrias complexas devido à sua adaptabilidade e facilidade de geração. Em contrapartida, malhas hexaédricas frequentemente requerem decomposições geométricas ou construção manual, aumentando significativamente o tempo de pré-processamento. No entanto, malhas hexaédricas demandam menor poder computacional durante a solução em comparação a malhas tetraédricas equivalentes, o que justifica sua utilização em casos onde a eficiência computacional é crucial (ANSYSR, 2016).

Com base na necessidade de comparar a eficácia em termos de pré-processamento, criou-se uma malha computacional tetraédrica com classificação intermediária, contendo 648.898 elementos. Embora a malha tetraédrica ofereça vantagens em termos de adaptação a

geometrias complexas e facilidade de geração automática, a malha hexaédrica foi selecionada como a opção final para este estudo. Essa decisão foi fundamentada na eficiência computacional superior das malhas hexaédricas durante a fase de solução, o que se traduz em menores custos computacionais e maior precisão numérica. Na outra parte deste estudo, a malha hexaédrica otimizada será empregada em simulações utilizando diferentes modelos de turbulência, como $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, com o objetivo de avaliar a precisão e a robustez dos resultados obtidos.

5.1.2. Análise Quantitativa

A definição da malha envolve decisões críticas como a granularidade, que podem impactar significativamente a capacidade do modelo de capturar os detalhes e os fenômenos físicos de interesse. Embora uma análise qualitativa inicial tenha levado à seleção de uma geometria hexaédrica devido à sua eficiência, essa escolha por si só não é suficiente para determinar o tipo de malha ideal.

Portanto, foram analisadas duas variáveis para o teste de independência de malha: pressão e velocidade. Para avaliar essas variáveis dependentes, foram dispostos pontos de medição, denominados de “*probes*” no software Paraview, ao longo dos trechos vertical e horizontal da linha de transporte pneumático, conforme apresentado na Tabela 10. Os pontos estabelecidos na geometria seguiram critérios definidos no estudo de Gomes (2022), a qual três pontos foram dispostos ao longo do trecho vertical, um ponto foi posicionado na curva e oito pontos foram distribuídos no trecho horizontal. No trecho horizontal, quatro desses pontos foram colocados com um distanciamento de 94 cm entre eles e três pontos foram posicionados a distâncias de 140 cm, 130 cm e 150 cm, respectivamente, visando obter uma melhor representação da região de aceleração.

Tabela 10 - Coordenadas ao longo da tubulação no software Paraview.

Pontos	X	Y	Z
1	0	0	0
2	0	0,9	0
3	0	1.5	0
4	0.1	1.75	0
5	0.4	1.8	0
6	1.34	1.8	0
7	2.28	1.8	0
8	3.22	1.8	0
9	4.16	1.8	0
10	5.56	1.8	0
11	6.86	1.8	0
12	8.36	1.8	0

Fonte: Autor, 2024.

A escolha desses pontos é para garantir uma representação precisa das variações de pressão e velocidade ao longo da linha de transporte pneumático. No trecho vertical, a disposição dos três pontos permite capturar as mudanças nas variáveis devido à força da

gravidade e ao comportamento do fluxo ascendente. O ponto na curva é essencial para entender os efeitos da mudança de direção do fluxo, onde podem ocorrer significativas variações de pressão e velocidade. No trecho horizontal, os pontos dispostos com um distanciamento menor na região de aceleração permitem uma análise detalhada das mudanças rápidas nas variáveis, enquanto os pontos mais distantes proporcionam uma visão abrangente das variações ao longo de uma extensão maior do sistema. Essa abordagem combinada garante uma avaliação eficaz e precisa das condições de operação dentro da linha de transporte pneumático, contribuindo para uma análise da independência de malha e fornecendo dados valiosos para otimizações futuras do sistema.

Tendo definido as posições dos “*probes*” na geometria, foi possível obter e avaliar as variáveis dependentes, pressão e velocidade, conforme as tabelas abaixo:

Tabela 11 - Teste de independência de malha com elementos grosseiros hexaédricos.

Pontos	Pressão (Pa)	Velocidade (m/s)		
		X	Y	Z
1	240,35	3,15E-07	9,1846	7,97E-13
2	238,18	2,35E-06	9,4189	1,17E-12
3	225,31	0,4146	9,7576	-2,55E-12
4	200,60	5,5677	7,0947	-1,33E-11
5	202,64	5,7872	0,8556	9,92E-11
6	179,36	8,7899	0,1687	-4,26E-10
7	157,90	9,3014	0,0054	5,26E-08
8	135,97	9,1359	-0,0017	-2,46E-08
9	113,84	9,1470	-0,0004	-0,0001
10	80,91	9,1415	8,33E-06	-1,22E-06
11	50,34	9,1593	0,0002	-7,44E-06
12	15,06	9,1263	0,0032	0,0006

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 12 - Teste de independência de malha com elementos intermediários hexaédricos.

Pontos	Pressão (Pa)	Velocidade (m/s)		
		X	Y	Z
1	249,46	2,90E-07	9,1996	3,36E-13
2	247,21	2,17E-06	9,4410	1,72E-13
3	233,84	0,40353	9,8776	7,80E-13
4	228,58	5,5956	7,1442	-3,78E-12
5	210,19	5,7621	0,8390	-2,41E-11
6	186,62	8,8541	0,1750	1,25E-09
7	164,32	9,3536	0,0045	9,46E-09
8	141,48	9,2041	-0,0015	3,11E-07
9	118,45	9,2004	-0,0003	1,60E-06
10	84,18	9,2030	-9,10E-05	8,13E-06
11	52,37	9,2160	0,0013	-4,46E-05
12	15,66	9,2030	0,0002	-0,0004

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 13 - Teste de independência de malha com elementos refinados hexaédricos.

Pontos	Pressão (Pa)	Velocidade (m/s)		
		X	Y	Z
1	249,48	2,86E-07	9,1962	3,65E-14
2	247,24	2,14E-06	9,4378	1,50E-13
3	233,87	0,4046	9,9101	-3,11E-10
4	228,59	5,5939	7,1444	-4,80E-09
5	210,19	5,7654	0,8383	1,72E-09
6	186,63	8,8519	0,1732	1,48E-09
7	164,32	9,3523	0,0045	-4,75E-08
8	141,48	9,2090	-0,0016	-1,48E-07
9	118,45	9,2109	-0,0003	2,95E-07
10	84,18	9,2133	-2,91E-05	-5,54E-06
11	52,36	9,2132	-8,94E-05	6,35E-05
12	15,65	9,2129	0,0027	-2,83E-05

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 14 - Teste de independência de malha com elementos intermediários tetraédricos.

Pontos	Pressão (Pa)	Velocidade (m/s)		
		X	Y	Z
1	158,44	-0,0038	8,5004	-0,0079
2	156,83	0,0131	8,6945	-0,0053
3	147,92	0,4516	9,5600	-0,0120
4	145,82	5,5328	7,0784	-0,0514
5	130,61	5,1590	0,7488	0,0002
6	112,99	8,0642	0,2522	-0,0077
7	98,20	9,3164	0,0550	-0,0087
8	84,82	9,5422	-0,0122	-0,0045
9	70,92	9,3599	-0,0105	0,0023
10	50,38	9,3427	-0,0025	-0,0096
11	31,25	9,3422	-0,0016	-0,0084
12	9,18	9,2950	-0,0047	-0,0138

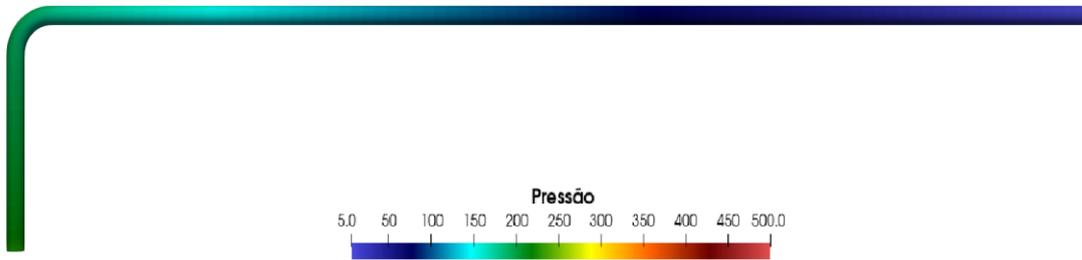
Fonte: Autor, 2024.

Conforme pode ser observado nas Tabelas 11, 12, 13 e 14, as pressões estáticas e as regiões de aceleração previstas ao longo dos trechos vertical e horizontal não variaram significativamente com o número de células. Os dados demonstram que os desvios entre os valores de pressão obtidos com a malha refinada e a malha intermediária foram inferiores a 1%. Esta pequena variação quantitativa sugere que a malha intermediária é capaz de fornecer uma precisão adequada para a análise em questão, sem a necessidade do elevado custo computacional associado à malha refinada.

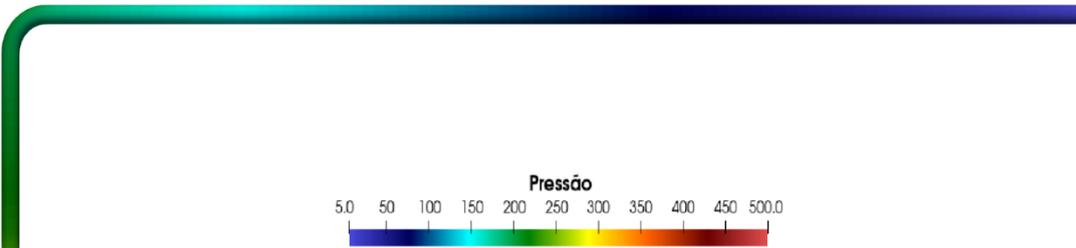
Na Figura 10, observa-se a distribuição de pressão na geometria no tempo final da simulação, variando-se as malhas. Essas figuras corroboram a análise quantitativa apresentada anteriormente, demonstrando visualmente a consistência dos resultados obtidos com as diferentes resoluções de malha.

Figura 10 - Comparativo das pressões para o teste de malha.

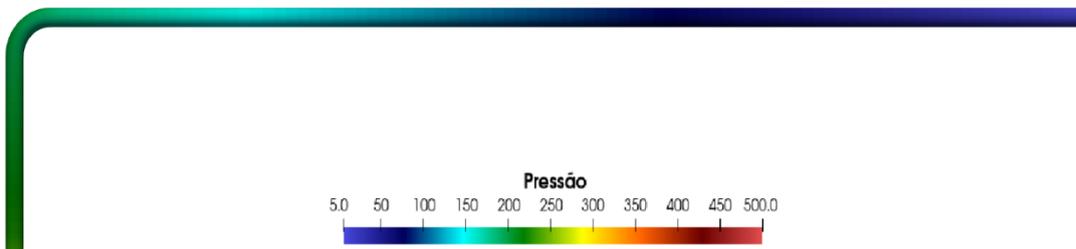
Malha Grosseira - Hexaédrica



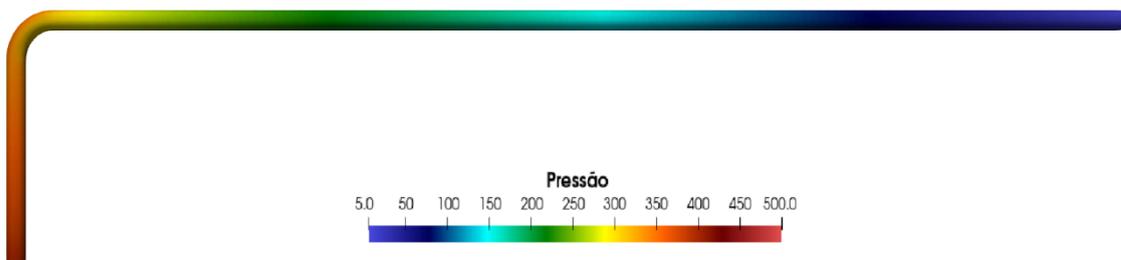
Malha Intermediária - Hexaédrica



Malha Refinada - Hexaédrica



Malha Intermediária - Tetraédrica



Fonte: Autor, 2024.

A distribuição e a forma dos elementos de uma malha afetam diretamente o resultado da simulação numérica. Desta forma, a geração de uma malha de alta qualidade se torna de suma importância na solução de um problema de Dinâmica dos Fluidos Computacional

(CFD). As malhas hexaédricas são amplamente preferidas em simulações devido à sua regularidade e estrutura geométrica bem definida, que proporciona maior precisão em problemas que envolvem gradientes suaves, como fluxos de fluidos e tensões mecânicas. Este fato ocorre devido a forma cúbica dos elementos hexaédricos minimiza a distorção geométrica, o que reduz significativamente os erros numéricos. Por outro lado, malhas tetraédricas, embora sejam mais fáceis de gerar automaticamente e se adaptem melhor a geometrias complexas, tendem a introduzir erros numéricos mais significativos devido à irregularidade e distorção dos elementos (Knupp & Steinberg, 1993).

Os resultados apresentados no estudo corroboram com as análises de Knupp e Steinberg. A malha hexaédrica apresentou melhor desempenho, especialmente em termos de precisão devido à sua regularidade e menor distorção geométrica, foi capaz de capturar melhor os gradientes de fluxo e tensões, minimizando os erros numéricos, diferentemente da malha tetraédrica, que apresentou mais distorções em regiões de maior complexidade. Em termos de eficiência computacional, observou-se que a malha hexaédrica exige um número menor de elementos para representar o mesmo volume, e, conseqüentemente, um menor tempo de processamento. A malha tetraédrica, embora flexível para geometrias complexas, apresentou um custo computacional mais elevado, devido à necessidade de mais elementos para atingir a mesma resolução.

Diversos parâmetros são utilizados para avaliar as características dos volumes de controle na malha, incluindo o formato geométrico dos elementos, a quantidade de volumes e a transição entre eles em uma determinada região do domínio de solução. Esses parâmetros, conhecidos como métricas da malha, incluem a razão de aspecto, a assimetria ou *skewness* e a ortogonalidade. A razão de aspecto mede a proporcionalidade entre as dimensões de um elemento para evitar células excessivamente alongadas ou achatadas. A assimetria avalia o grau de divergência de um elemento em relação à sua forma ideal. Já a ortogonalidade examina o ângulo entre as arestas dos elementos e a direção do fluxo ou dos gradientes. Com base nessas características, neste estudo, as três métricas de qualidade foram analisadas no software Paraview em todas as malhas geradas, conforme mostrado na Tabela 15:

Tabela 15 - Parâmetros de qualidade para avaliação das malhas.

Parâmetros	Grosseira	Média Hexaédrica	Refinada	Média Tetraédrica
Razão de Aspecto	3,40	3,24	3,00	6,69
Skewness	0,82	0,46	0,47	0,90
Ortogonalidade	0,24	0,29	0,29	0,72

Fonte: Autor, 2024.

Com base nos estudos de Marquardt (2019), a razão de aspecto próxima de 1 é

considerada ideal para malhas em simulações numéricas, pois oferece uma maior precisão nos resultados. Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 15, observa-se que as malhas com geometrias hexaédricas se aproximam mais do valor recomendado de razão de aspecto, destacando-se especialmente a malha intermediária hexaédrica e a malha refinada hexaédrica. Esses tipos de malha apresentam uma maior uniformidade nos elementos, o que contribui para a obtenção de resultados consistentes ao longo da simulação.

Avaliando os dados de *skewness*, com base na Tabela 2, a malha hexaédrica grosseira e tetraédrica intermediária exibem uma relação de *skewness* considerada pobre, indicando uma maior distorção nos elementos da malha, o que pode levar a problemas de precisão e estabilidade durante a simulação. Por outro lado, a malha intermediária e refinada hexaédrica apresentam uma *skewness* dentro de uma faixa considerada boa, indicando que os elementos estão mais próximos de suas formas ideais, com menos distorções e, portanto, mais adequados para a simulação.

No que diz respeito à ortogonalidade, as malhas com elementos hexaédricos se enquadram em uma classificação de boa qualidade ortogonal, conforme indicado na Tabela 3. A boa ortogonalidade é essencial para garantir que os fluxos nas direções normais sejam corretamente calculados, reduzindo o erro numérico e aumentando a precisão da simulação. A malha tetraédrica, por sua vez, foi classificada como muito boa, o que sugere uma vantagem nesse aspecto específico, embora essa vantagem possa ser desconsiderada devido à uma *skewness* menos favorável.

Com base na avaliação qualitativa e quantitativa dos dados, a escolha da malha intermediária hexaédrica para o estudo se justifica plenamente. Essa malha oferece um equilíbrio superior entre a razão de aspecto, *skewness*, e ortogonalidade, garantindo uma alta qualidade da malha e, conseqüentemente, uma maior confiabilidade nos resultados da simulação. Além disso, a malha intermediária hexaédrica proporciona uma eficiência computacional aceitável, evitando o alto custo computacional que seria exigido por uma malha refinada, ao mesmo tempo em que supera as limitações de precisão associadas à malha tetraédrica.

5.2 MODELOS DE TURBULÊNCIA

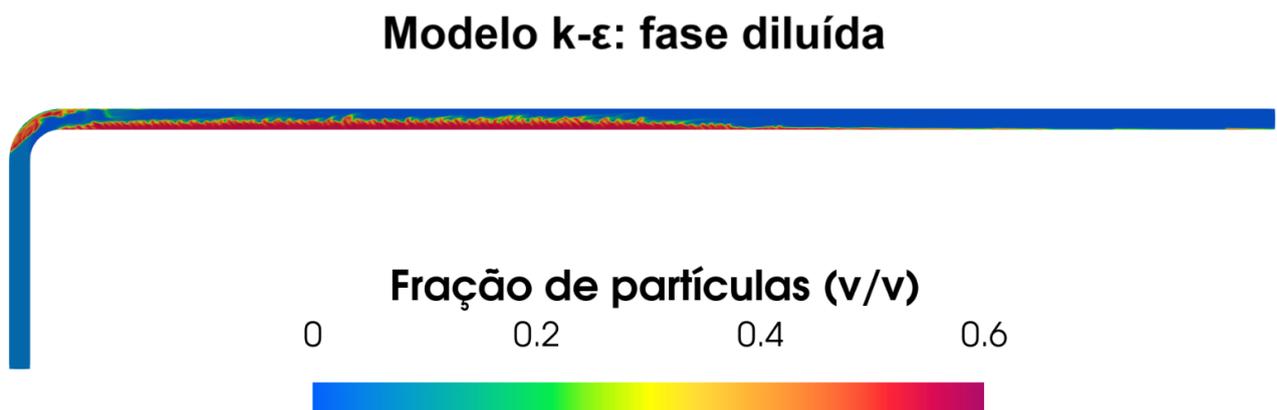
5.2.1. Análise qualitativa

Para continuar a realização deste estudo, por meio da plataforma de visualização e análise de dados Paraview, o presente trabalho focou-se na biomassa em questão, especificamente o farelo de trigo, avaliando-se o comportamento do material sob diferentes condições de escoamento em um circuito pneumático. A biomassa de farelo de trigo, devido às suas propriedades físicas e comportamentais em sistemas multifásicos, apresenta desafios significativos relacionados à previsibilidade de transporte e dispersão.

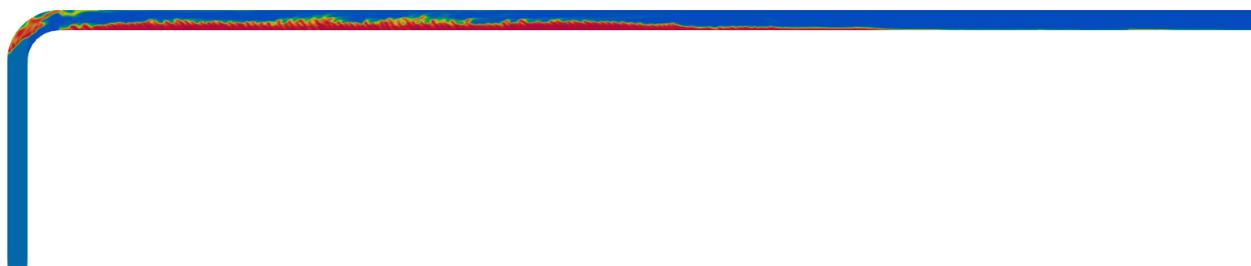
Neste contexto, foram realizadas análises qualitativas, quantitativas e comparativas entre diferentes simulações, explorando a influência dos modelos de turbulência nas variáveis dependentes (como perda de carga, distribuição de velocidade e padrões de concentração). A pesquisa frisou na identificação dos modos de transporte da biomassa, diferenciando claramente entre a fase diluída, onde a interação partícula-partícula é minimizada, e a fase densa, caracterizada por uma alta concentração de partículas sólidas que alteram significativamente o campo de escoamento. As fases diluída e densa foram identificadas em diferentes trechos da tubulação, permitindo a visualização de zonas críticas onde ocorrem transições de regime.

A fase diluída caracteriza-se como um regime de escoamento no qual as partículas sólidas são transportadas por um fluido, geralmente ar ou gás, em concentrações relativamente baixas. Nesse regime, a densidade das partículas é significativamente menor do que a do fluido transportador, o que permite que as partículas permaneçam bem dispersas no fluxo. Como resultado, ocorre uma distribuição uniforme das partículas ao longo de toda a extensão do sistema, especialmente em trechos verticais, e as partículas tendem a se mover a uma velocidade próxima à do fluido (Tripathi et al., 2018). Na Figura 11, são ilustradas as distribuições da fração volumétrica de partículas ao longo de todo o sistema pneumático, especificamente para a fase diluída.

Figura 11 - Fração de partículas em fase diluída.



Modelo k- ω : fase diluída



Fonte: Autor, 2024.

A análise da fração volumétrica de sólidos nas simulações revela um comportamento característico após a curva acentuada do sistema pneumático. Observa-se que, devido à brusca mudança de direção do escoamento gás-sólido da orientação vertical para a horizontal, há uma tendência significativa de acumulação de partículas na região superior da tubulação. Esse fenômeno é atribuído à biomassa utilizada, por ser um material leve e de fácil dispersão, entretanto, as partículas também podem ser sensíveis a turbulências, separações de fluxo e zonas de estagnação, o que pode resultar em aglomeração ou deposição nas curvas. Também está associado à inércia das partículas sólidas, que, ao passar pela curva, tendem a se desviar do fluxo principal, acumulando-se na parte superior devido à menor ação das forças de arraste e gravidade em comparação com o escoamento gasoso. Essa redistribuição de partículas resulta em uma concentração elevada de sólidos na parte superior da tubulação, criando uma camada densa que pode influenciar a dinâmica subsequente do escoamento multifásico. À medida que o fluxo se estabiliza na seção horizontal, observa-se que o material particulado é gradualmente redistribuído, migrando para a base da tubulação.

O modelo k- ϵ apresenta bom desempenho em regiões de escoamento turbulento distante das paredes, sendo eficiente na captura de fenômenos de grande escala. No entanto, a redistribuição das partículas após a curva sugere que o k- ϵ pode não capturar com precisão a dissipação de energia turbulenta. O modelo k- ω , por sua vez, é conhecido por sua capacidade de capturar a turbulência com maior precisão em regiões próximas às superfícies. Nos resultados da simulação, observa-se uma transição mais suave na redistribuição das partículas após a curva do duto, com uma dispersão mais gradual ao longo da tubulação. As zonas de alta concentração de partículas, representadas em vermelho/laranja, são capturadas de forma mais detalhada, sugerindo que o k- ω descreve com maior acurácia as interações fluido-partícula em zonas de alta turbulência nas proximidades das paredes.

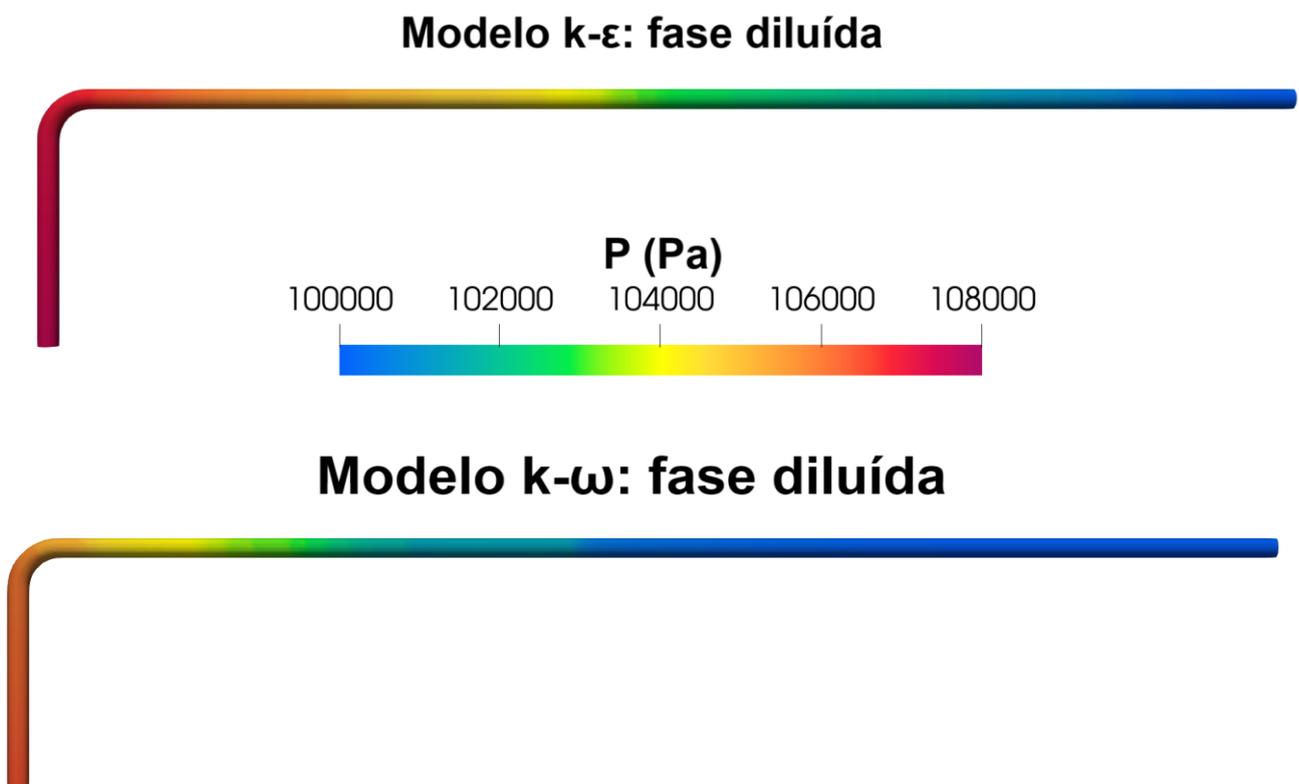
A fase diluída é caracterizada como um regime de escoamento onde as partículas sólidas são transportadas em um fluxo de ar ou gás com baixa concentração de sólidos. Nesse regime, a fração volumétrica das partículas é consideravelmente menor em comparação à

fração volumétrica do fluido transportador, resultando em uma distribuição uniforme de partículas ao longo do escoamento, especialmente em trechos verticais. Esse comportamento é típico de condições em que a velocidade do fluido é suficientemente alta para manter as partículas suspensas, prevenindo sua sedimentação e promovendo um transporte eficiente. De acordo com Tripathi et al. (2018), na fase diluída, a interação partícula-fluido é predominante sobre as interações entre as partículas, minimizando os efeitos de colisões e aglomerações que são mais comuns em regimes de escoamento denso. Esse regime é especialmente relevante em aplicações industriais de transporte pneumático, onde se busca maximizar a eficiência do transporte e minimizar o desgaste das tubulações.

Na Figura 11, observa-se que o regime de fase diluída é predominante ao longo do trecho vertical da tubulação. A análise sugere que a concentração de sólidos teve influência na configuração do regime de escoamento, evidenciando que, mesmo em baixas concentrações, as partículas mantêm uma distribuição relativamente uniforme devido à alta velocidade do transporte.

Associando ao estudo dos perfis de pressão ao longo da tubulação para cada uma das simulações, observa-se que o modelo de turbulência $k-\epsilon$ apresenta um aumento significativo na queda de pressão, conforme evidenciado na Figura 12:

Figura 12 - Pressão em fase diluída.



Fonte: Autor, 2024.

O $k-\epsilon$, por ser um modelo mais robusto para escoamentos homogêneos e distantes das

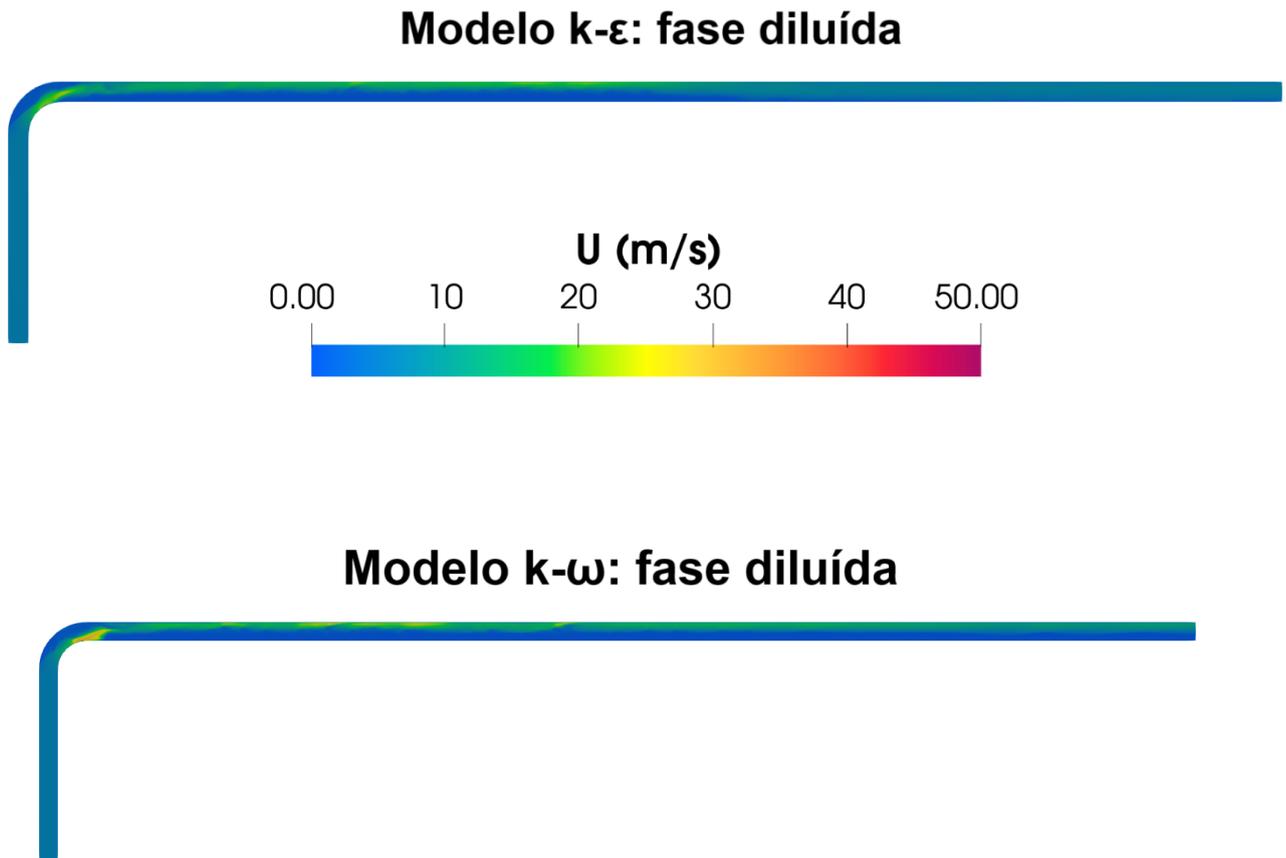
superfícies, oferece previsões de pressão médias adequadas em regiões de fluxo relativamente uniforme. No entanto, ele tende a subestimar os efeitos de recirculação e as flutuações de pressão em áreas com fortes variações de velocidade, especialmente em zonas de transição, como nas curvas da tubulação, a qual resulta em gradientes de pressão que não são capturados com precisão por este modelo. Isto se confirma pois observa-se um gradiente de pressão mais acentuado, onde a coloração passa de vermelha para amarelo, sugerindo que há uma queda abrupta de pressão, associada à mudança de direção do fluxo.

Já o modelo $k-\omega$ tende a capturar com maior detalhe as zonas de recirculação e flutuações de pressão, resultando em uma previsão mais realista das perdas de carga ao longo do sistema. A presença de fortes gradientes de velocidade e as condições de contorno complexas, como as encontradas em regiões de curvas acentuadas, são adequadamente representadas, levando a um perfil de pressão que reflete mais fielmente as características dinâmicas do escoamento multifásico. No entanto, a transição de pressão parece menos abrupta, visto que, na curva da tubulação, a queda de pressão ainda é perceptível, porém, mais suave do que na simulação com o modelo $k-\epsilon$. A coloração verde-amarelada é menos intensa, indicando que a perda de pressão local é mais distribuída.

Em ambos os casos a coloração azul ao final do sistema demonstra que a pressão se reduz significativamente, caracterizando a perda de carga típica em escoamentos multifásicos, onde as interações entre o fluido transportador e as partículas sólidas aumentam a resistência ao fluxo.

Pode-se observar e validar os resultados anteriores também por meio do perfil de velocidade ao longo da tubulação de cada uma das simulações:

Figura 13 - Velocidade em fase diluída.



Fonte: Autor, 2024.

Destaca-se que, em fases diluídas, o escoamento do gás é o fator predominante que controla o comportamento das partículas. Ele explica que, ao passar por mudanças na geometria, como curvas ou transições de direção (vertical para horizontal), o fluxo experimenta variações de velocidade, com acelerações localizadas. Essas regiões de aumento de velocidade são comuns devido à contração e à aceleração do fluxo (Rhodes, 2008).

Com aplicação do modelo de turbulência k- ϵ , revela-se um perfil de velocidade estável e controlado ao longo da tubulação ou seja, indica que as velocidades são moderadas e homogêneas ao longo do sistema. Na região da curva, observa-se um leve aumento na velocidade, identificado por uma transição de cores para verde e amarelo, o que é esperado devido à aceleração do fluxo causada pela mudança de direção do escoamento vertical para horizontal. Com base na Figura 13, nota-se o acúmulo gerado na curva o que evidencia o aumento da velocidade em um determinado ponto da curva. Esse comportamento reflete a tendência natural do escoamento em sistemas pneumáticos, onde a inércia e a contração na curva provocam uma aceleração local.

Após a curva, o fluxo rapidamente retoma um estado mais uniforme ao longo da seção horizontal, com velocidades estabilizadas próximas das iniciais. Esse comportamento é ideal para manter o transporte pneumático contínuo em fase diluída, evitando acúmulos ou zonas de

baixa velocidade que poderiam levar à deposição de partículas.

Segundo Rhodes (2008), os modelos de turbulência $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ desempenham papéis distintos e complementares na simulação de escoamentos complexos, como os encontrados em sistemas de transporte pneumático de biomassa. O modelo $k-\varepsilon$ é amplamente utilizado devido à sua simplicidade e robustez em simulações de escoamentos turbulentos de fluxo interno e o $k-\omega$ é reconhecido pela sua capacidade de capturar com maior precisão os fenômenos turbulentos próximos às superfícies sólidas. Rhodes evidencia que o $k-\omega$ é particularmente eficaz em prever as interações do escoamento em camadas limite e em regiões de alta complexidade, como curvas e transições. Em termos práticos, Rhodes destaca que, enquanto o $k-\varepsilon$ pode fornecer uma visão global do escoamento com menor custo computacional, o $k-\omega$ oferece uma análise mais detalhada, especialmente em cenários onde a precisão na captura dos fenômenos turbulentos é essencial para a previsão do comportamento do fluxo de partículas.

O que de fato é evidenciado pela imagem da tubulação para o modelo $k-\omega$ a qual a análise da simulação revela características do comportamento do escoamento dentro da tubulação, alinhando-se com as previsões teóricas discutidas por Rhodes (2008). A distribuição da velocidade é sensível nas proximidades das paredes da tubulação, com áreas de maior intensidade de gradiente, especialmente visíveis nas curvas e transições do escoamento. Essas características refletem a maior capacidade do modelo $k-\omega$ de capturar os efeitos da turbulência nas camadas limites, onde os gradientes de velocidade são acentuados. As regiões com coloração verde-amarelada ao longo da parede superior da tubulação indicam zonas de maior velocidade, sugerindo uma intensa interação entre o escoamento e as superfícies da tubulação.

Essa precisão do $k-\omega$ na captura das interações de parede e da turbulência local impacta diretamente o transporte de partículas, assim, a resolução detalhada dos fenômenos turbulentos, especialmente em regiões complexas como curvas e transições, proporciona uma vantagem significativa sobre o modelo $k-\varepsilon$. A simulação confirma que o $k-\omega$ captura com precisão os efeitos das forças de arraste e as interações de fluxo próximas às paredes da tubulação, oferecendo uma análise detalhada e aplicável ao transporte pneumático de biomassa em fase diluída.

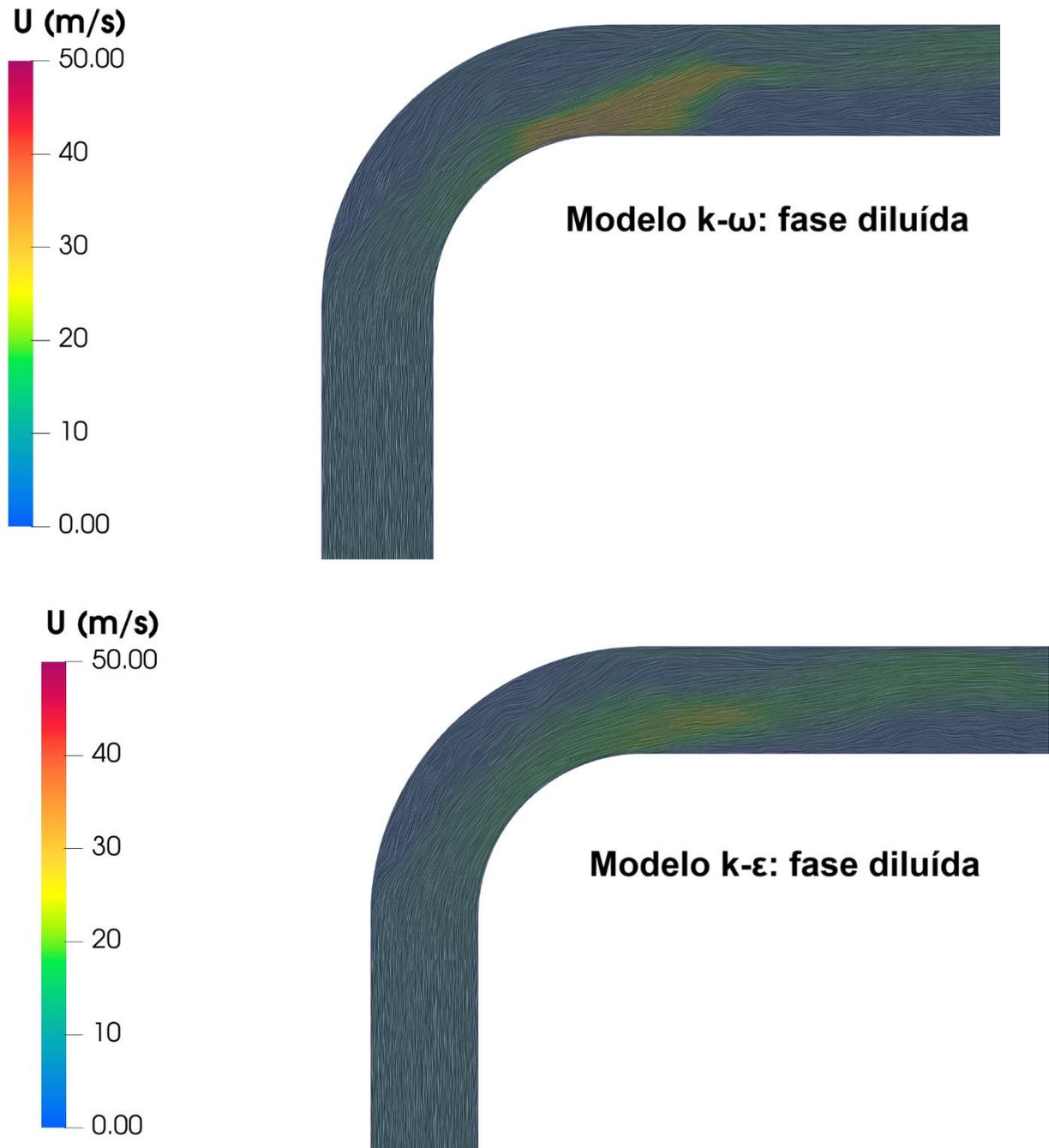
Com base nas análises anteriormente discutidas, torna-se essencial uma avaliação detalhada da distribuição de velocidade em um ponto crítico do sistema: a região da curva da tubulação. Esta área é particularmente relevante devido às intensas variações de escoamento que ocorrem ali, influenciando diretamente o desempenho global do transporte pneumático.

A curva representa um desafio significativo em termos de dinâmica de fluidos, pois é onde ocorrem mudanças abruptas na direção do fluxo, as forças centrífugas induzem uma

redistribuição do fluxo, criando zonas de alta e baixa velocidade, que são fundamentais para compreender os padrões de turbulência e as possíveis perdas de carga.

A Figura 14 fornece uma visão ampliada da distribuição de velocidade na curva, permitindo identificar as áreas críticas onde ocorrem as maiores variações de velocidade:

Figura 14 - Velocidade na curva em fase diluída.



Fonte: Autor, 2024.

Como evidenciado na imagem, o modelo $k-\epsilon$ apresenta limitações em capturar variações de velocidade próximas às superfícies, como a curva da tubulação analisada. A simulação do escoamento $k-\epsilon$ revela um padrão de velocidade que não detalha suficientemente as zonas de alta turbulência próximas à parede externa da curva, onde o aumento da velocidade devido às forças centrífugas é esperado. Em termos de previsão das velocidades

máximas e mínimas, este modelo proporciona uma visão geral adequada, mas perde detalhes críticos que são importantes para a compreensão do comportamento do escoamento em regiões complexas.

Por outro lado, o modelo $k-\omega$, conforme ilustrado na imagem correspondente, mostra um desempenho superior na captura das variações de velocidade próximas à parede da curva. Este modelo demonstra uma maior sensibilidade às condições de fronteira e captura de forma mais precisa o aumento de velocidade na parte externa da curva e a redução na parte interna, onde o fluxo tende a desacelerar. A vantagem do $k-\omega$ sobre o $k-\epsilon$ é evidente na capacidade de modelar com maior precisão a interação entre a camada limite e o fluxo, assim como as flutuações de velocidade que ocorrem nas zonas de alta curvatura.

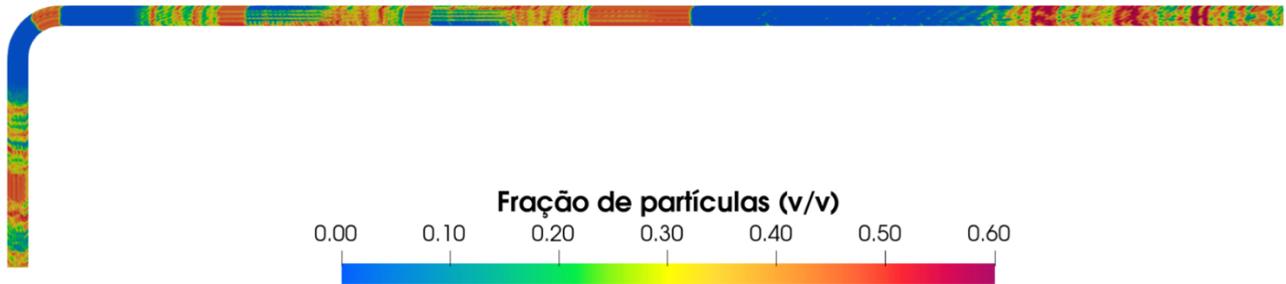
Portanto, em ambos os modelos têm suas aplicações específicas: o $k-\epsilon$ é adequado para análises de escoamentos gerais em grandes domínios, enquanto o $k-\omega$ se destaca em regiões de alta curvatura e proximidade com superfícies, capturando com maior fidelidade as características de velocidade e turbulência. A escolha do modelo ideal deve considerar o equilíbrio entre a necessidade de precisão e a viabilidade computacional, com o $k-\omega$ sendo preferível em análises onde os detalhes de fronteira são essenciais para a compreensão do comportamento do fluxo.

A transição entre fases diluída e densa em sistemas particulados, caracteriza um comportamento dinâmico e influencia nas propriedades físicas desses sistemas. O aumento da concentração de partículas em um sistema resulta em uma intensificação significativa das colisões tanto entre partículas quanto entre partículas e a parede do conduto. Esse fenômeno é responsável por maiores perdas de energia mecânica, o que, por sua vez, eleva a queda de pressão ao longo do sistema, como discutido por Patro e Murugan (2014). À medida que a quantidade de sólidos em suspensão cresce, há também um aumento na resistência ao fluxo, pois o número elevado de interações e empacotamento entre as partículas gera forças adicionais que dificultam o escoamento.

Na Figura 15, são ilustradas as distribuições da fração volumétrica de partículas e os perfis de pressão e velocidade ao longo de todo o sistema pneumático, especificamente para a fase densa:

Figura 15 - Fração de partículas em fase densa.

Modelo k- ϵ : fase densa



Modelo k- ω : fase densa



Fonte: Autor, 2024.

A curva do duto apresenta regiões distintas de concentração de partículas. Nas paredes externas da curva, há acúmulo significativo de partículas, a qual ocorre devido à força centrífuga que empurra as partículas para a parte externa da curva, enquanto a parte interna apresenta menor concentração onde a fração de partículas é mais dispersa. Na parte horizontal do duto, logo após a curva, a fração de partículas varia de maneira intermitente, com zonas de alta concentração (vermelho-laranja) intercaladas com zonas de baixa concentração (verde-azul). Esse comportamento pode ser resultado de aglomerados de partículas ou "*plugs*" que ocorrem em sistemas de fase densa.

A presença dessas regiões indica que o escoamento não está completamente homogêneo, e há flutuações na densidade de partículas ao longo do duto. Na curva, observa-se um aumento significativo da fração de partículas, seguido por uma diminuição gradual ao longo do trecho reto. Esse resultado pode ser explicado pela separação de fases que ocorre quando o fluxo de partículas é submetido à mudança de direção. As partículas, devido à sua inércia, tendem a se concentrar mais nas paredes externas da curva, enquanto o gás se desloca de maneira mais livre. Mais distante da curva, a concentração de partículas começa a se estabilizar, mas ainda há variações significativas, com regiões alternadas de alta e baixa fração volumétrica de partículas, sugerindo que a turbulência do modelo k- ϵ está promovendo uma

dispersão incompleta.

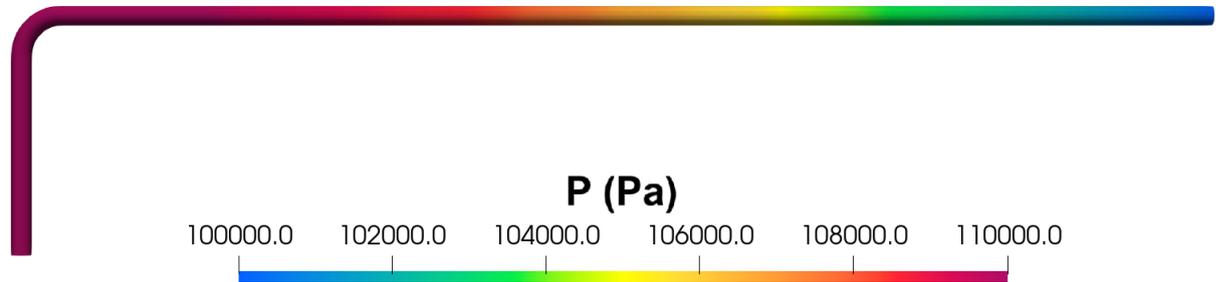
Já no modelo $k-\omega$, a região da curva apresenta também uma maior concentração de partículas onde esse desempenho é esperado. Além disso, a transição do fluxo nas seções retas do duto após a curva apresenta uma redistribuição das partículas mais uniforme em comparação ao modelo $k-\epsilon$. As cores variando entre verde e azul indicam que, embora ainda haja áreas de maior concentração de partículas, o modelo $k-\omega$ consegue prever uma dissipação mais controlada da turbulência, resultando em um fluxo mais estável e uma distribuição mais homogênea. Isso reduz a probabilidade de formação de aglomerados que poderiam comprometer o transporte eficiente do material. Outro ponto importante é que o modelo $k-\omega$ é mais preciso em prever a interação próxima às superfícies o que permite uma melhor descrição do acúmulo de partículas nessas regiões de alta turbulência. No caso desta simulação, o $k-\omega$ captura de forma mais precisa a dinâmica do fluxo de partículas, melhorando a descrição do transporte nos dutos.

Dessa forma, o modelo $k-\omega$ demonstra oferece uma melhor resolução dos efeitos de superfície, resultando em uma distribuição de partículas mais uniforme e estável ao longo do duto. Comparado ao modelo $k-\epsilon$, o $k-\omega$ consegue descrever com mais precisão o comportamento das partículas em zonas críticas, como as curvas e próximas às paredes do duto, o que pode ser vantajoso para reduzir o desgaste e garantir maior eficiência no transporte pneumático.

Associando ao estudo dos perfis de pressão ao longo da tubulação para cada uma das simulações, observa-se que o modelo de turbulência $k-\epsilon$ apresenta um aumento significativo na queda de pressão, conforme evidenciado na Figura 16:

Figura 16 - Pressão em fase densa.

Modelo k- ϵ : fase densa



Modelo k- ω : fase densa



Fonte: Autor, 2024.

Observa-se uma elevação da pressão a qual ocorre devido à perda de carga nas curvas, onde há um aumento na resistência ao fluxo de partículas e gás, forçando o aumento da pressão nessa região. Logo após a curva, há uma queda brusca de pressão sendo algo comum nesse cenário, onde a energia dissipada durante a curva é parcialmente recuperada, mas o escoamento perde parte da sua energia cinética, resultando em uma redução da pressão. A queda abrupta de pressão após a curva sugere que a turbulência, associada ao modelo k- ϵ , está contribuindo para uma redistribuição rápida da pressão, o que pode indicar perda de eficiência energética no transporte das partículas. Este modelo, devido à sua natureza de modelar grandes estruturas de turbulência, tende a resultar em um comportamento de pressão menos estável e mais flutuante ao longo do duto. Isso é observado na imagem, onde a queda de pressão após a curva é bastante expressiva. À medida que o escoamento avança para as partes retas do duto, a pressão se estabiliza em valores mais baixos, com coloração azul. Isso indica que o escoamento está em uma condição de menor resistência e menor interação turbulenta, onde a pressão necessária para manter o transporte das partículas é significativamente menor.

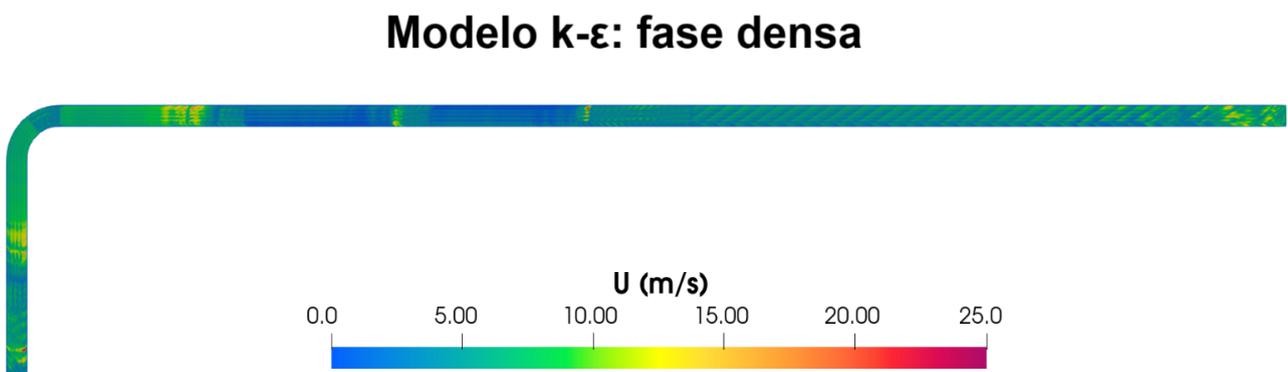
Analisando o modelo k- ω a área da curva apresenta pressão mais alta em comparação com a parte reta do tubo e, conforme o escoamento progride na tubulação reta, a pressão diminui progressivamente. Este fato se dá pois o k- ω é mais sensível às variações da turbulência em regiões de proximidade com superfícies sólidas, o que proporciona uma melhor resolução na área da curva, onde ocorrem maiores flutuações de pressão. Neste caso, a

simulação mostra que, ao passar pela curva, a pressão aumenta de forma acentuada, como indicado pelas cores mais quentes (vermelho e laranja). Após a curva, ao longo do trecho reto do duto, observa-se uma diminuição gradual da pressão, evidenciada pela transição das cores quentes para verde e azul, que indicam pressões mais baixas. O modelo $k-\omega$ é capaz de prever com maior precisão a dissipação da energia turbulenta e a interação com as paredes do duto, o que resulta em uma previsão mais clara da queda de pressão. O resultado deste modelo é eficaz para capturar o comportamento da pressão em escoamentos com regiões de alta variação de gradientes, como em curvas de dutos.

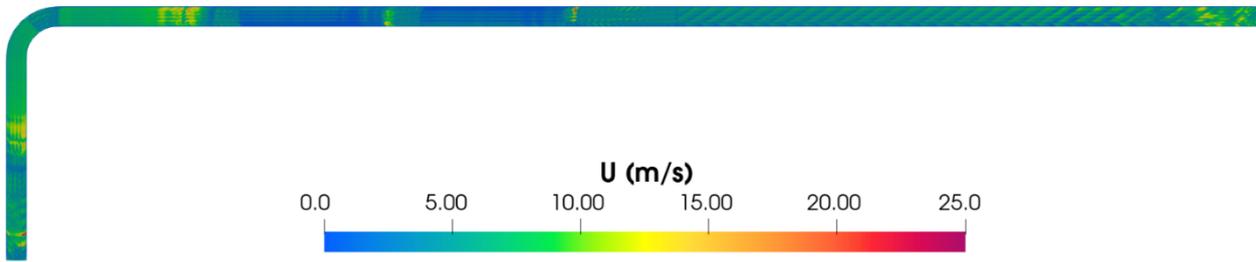
A curva de 90 graus desempenha um papel fundamental no aumento da pressão local devido à resistência causada pela mudança de direção do fluxo. Esse efeito de perda por curvatura é comum em escoamentos pneumáticos, especialmente quando o transporte é na fase densa, onde a interação entre as partículas e o fluido é intensa, principalmente nas zonas de estagnação. A elevada pressão na curva implica que o sistema necessita de maior potência para manter o transporte das partículas e a combinação de alta pressão com alta concentração de partículas na curva pode levar a desgaste mecânico acelerado das paredes do duto, especialmente nas zonas externas da curva, onde a erosão é comum em sistemas pneumáticos de fase densa. Comparado ao modelo $k-\epsilon$, o $k-\omega$ captura de forma mais assertiva os gradientes de pressão e o comportamento das camadas limite na curva. Esse maior detalhamento é essencial, pois regiões de alta pressão podem ser áreas críticas para o desgaste dos materiais ou pontos de falha estrutural no sistema. A curva do duto, por ser uma área de maior complexidade de escoamento, exige uma modelagem precisa das interações entre a turbulência e as superfícies sólidas, o que o $k-\omega$ proporciona de maneira mais eficaz.

Pode-se observar e validar os resultados anteriores também por meio do perfil de velocidade ao longo da tubulação de cada uma das simulações:

Figura 17 - Velocidade em fase densa.



Modelo k- ϵ : fase densa



Fonte: Autor, 2024.

Na curva, observa-se uma diminuição significativa da velocidade, essa redução ocorre devido à necessidade de redistribuir a energia cinética do escoamento enquanto as partículas e o ar são forçados a mudar de direção, com valores predominantemente azuis e verdes, essa diminuição é causada pelo aumento da resistência ao escoamento devido à mudança de direção. Em ambos os trechos retilíneos (vertical e horizontal) há um aumento gradual da velocidade, com cores variando de verde para amarelo e, eventualmente, vermelho nas partes finais do duto. Sugere-se que, após a curva, o escoamento gradativamente recupera sua velocidade e, mesmo com esse aumento, nas seções retas do duto, a velocidade é mais estável. Isso indica que, mesmo em um sistema de fase densa, o escoamento tem a capacidade de acelerar nas partes retas, especialmente após passar pela resistência gerada pela curva. A perda significativa de velocidade na curva indica um acúmulo de material, "*plugs*" ou até mesmo bloqueios. A recuperação progressiva da velocidade ao longo do duto reto é um bom indicativo de que o escoamento consegue se estabilizar. No entanto, a turbulência gerada pela curva pode aumentar a variabilidade do escoamento, resultando em velocidades não uniformes, que podem comprometer a distribuição uniforme de partículas e a eficiência geral do transporte.

Ao analisar o campo de velocidades do modelo k- ω , nota-se que, na entrada do duto, a velocidade do fluido é relativamente uniforme, com predominância de cores entre azul e verde, indicando velocidades moderadas. Conforme o escoamento se aproxima da curva, ocorre um aumento significativo na velocidade na parte interna da curva, evidenciado pela transição de cores para o amarelo e eventualmente para o vermelho em alguns pontos. Esse aumento de velocidade na curva é esperado devido à ação centrífuga, que acelera o fluido na região interna enquanto a região externa sofre uma desaceleração relativa, formando gradientes de velocidade importantes. Após a curva, no segmento reto da tubulação, a velocidade (verde-amarelo) sugere um escoamento mais estável, com menores efeitos de turbulência próxima à parede, já que o fluido e as partículas seguem em linha reta. Essas flutuações são características dos escoamentos turbulentos e são bem capturadas pelo k- ω , que permite uma descrição das interações entre a turbulência e as paredes do duto, onde o atrito é

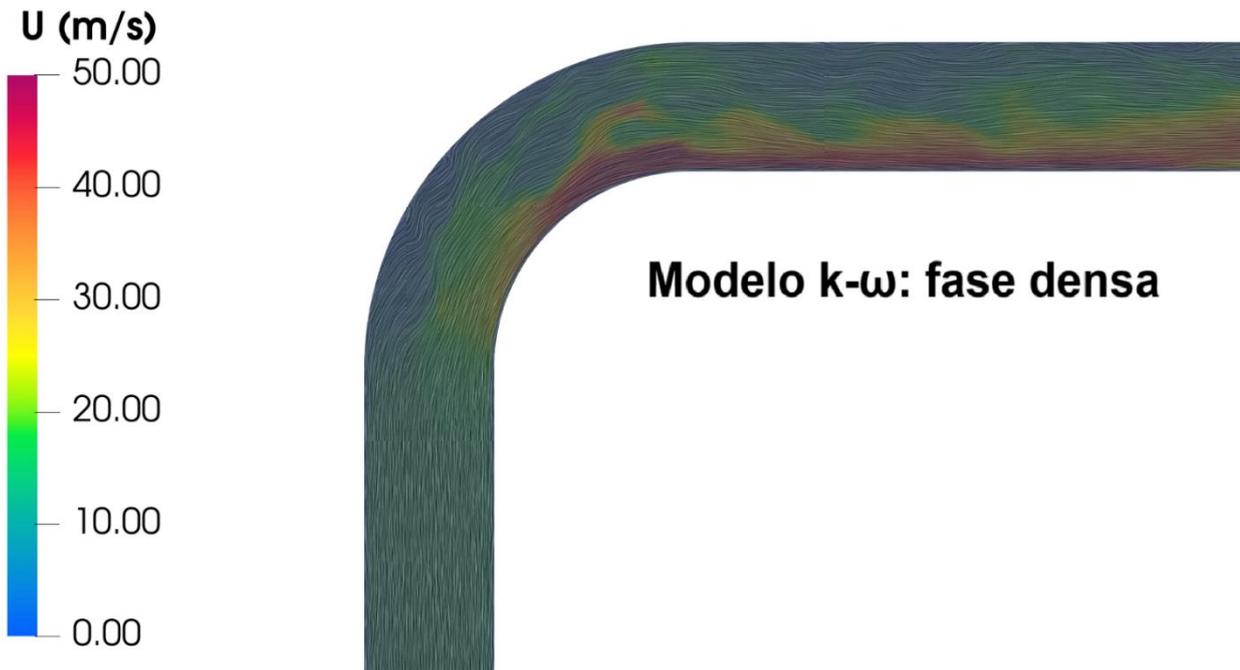
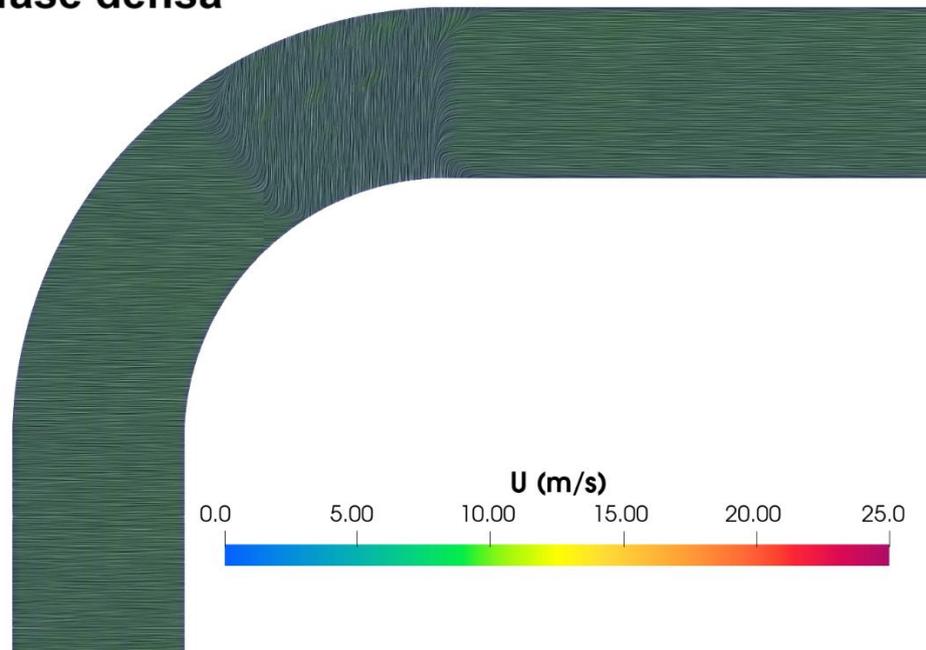
mais significativo. Com o bom desempenho desse modelo para gerar os resultados, tornam-se essenciais para o projeto e a otimização de sistemas de transporte pneumático, pois permitem identificar áreas de alta velocidade que podem ser suscetíveis a desgaste acelerado e zonas de estagnação que podem impactar a eficiência do escoamento.

Na imagem relacionada à velocidade obtida com o modelo $k-\varepsilon$, nota-se uma distribuição mais homogênea e suavizada da velocidade ao longo do duto. Essa suavidade no comportamento da velocidade pode indicar uma falha do $k-\varepsilon$ em capturar adequadamente a camada limite turbulenta e os efeitos de alta curvatura do escoamento. Em áreas onde há grande variação de velocidades, como na transição após a curva, o modelo tende a fornecer resultados simplificados. Por outro lado, utilizando o modelo $k-\omega$, revela-se uma maior definição nos perfis de velocidade, principalmente nas regiões de curva e nas proximidades das superfícies do duto. Este modelo é conhecido por seu desempenho superior em capturar detalhes mais finos nas regiões próximas às paredes, onde a interação entre a turbulência e o sólido é mais intensa. Quando se considera o transporte pneumático de farelo de trigo, a qual tem características específicas como baixa densidade e uma tendência a formar aglomerações, o modelo $k-\omega$ mostra-se mais eficaz na previsão dos comportamentos complexos de velocidade do escoamento, particularmente em áreas de curvas e transições, onde a separação de partículas e a sedimentação são preocupações. O $k-\varepsilon$, embora ofereça uma visão global do escoamento, pode não capturar com a mesma precisão os fenômenos locais importantes para o transporte eficiente de materiais particulados. Portanto, para o projeto de sistemas de transporte pneumático de farelo de trigo, o $k-\omega$ é preferível, especialmente em cenários onde o controle da sedimentação e a uniformidade de transporte são essenciais.

A Figura 18 fornecem uma visão ampliada da distribuição de velocidade na curva, permitindo identificar as áreas críticas onde ocorrem as maiores variações de velocidade:

Figura 18 - Velocidade na curva em fase densa.

Modelo k- ϵ : fase densa



Fonte: Autor, 2024.

5.2.2. Análise quantitativa

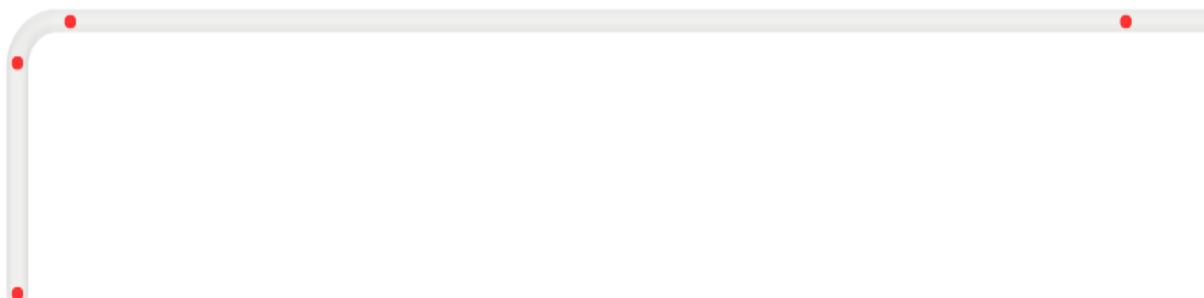
Para complementar a análise qualitativa apresentada anteriormente, faz-se necessário um aprofundamento por meio de uma avaliação quantitativa dos resultados, focando na avaliação da queda de pressão ao longo do sistema de transporte pneumático. Enquanto as simulações qualitativas forneceram uma visão geral sobre a distribuição de partículas e o comportamento turbulento, a queda de pressão oferece um indicador direto do desempenho operacional do sistema, sendo um parâmetro essencial para a validação dos modelos de

turbulência.

A perda de pressão ao longo do duto está diretamente relacionada à interação entre a fase fluida e as partículas, além de influenciar significativamente o consumo energético e a eficiência do transporte pneumático. Comparar os resultados obtidos para os modelos $k-\epsilon$ e $k-\omega$ permitirá avaliar qual deles oferece uma previsão mais precisa em termos de resistência ao escoamento e comportamento das partículas em regiões de maior turbulência, como nas curvas e ao longo do trecho reto do duto. Nos resultados quantitativos a seguir, será analisada a queda de pressão calculada ao longo do percurso simulado, destacando como cada modelo de turbulência prediz as perdas no sistema e quais as implicações dessas diferenças no desempenho do transporte pneumático em fase diluída e densa.

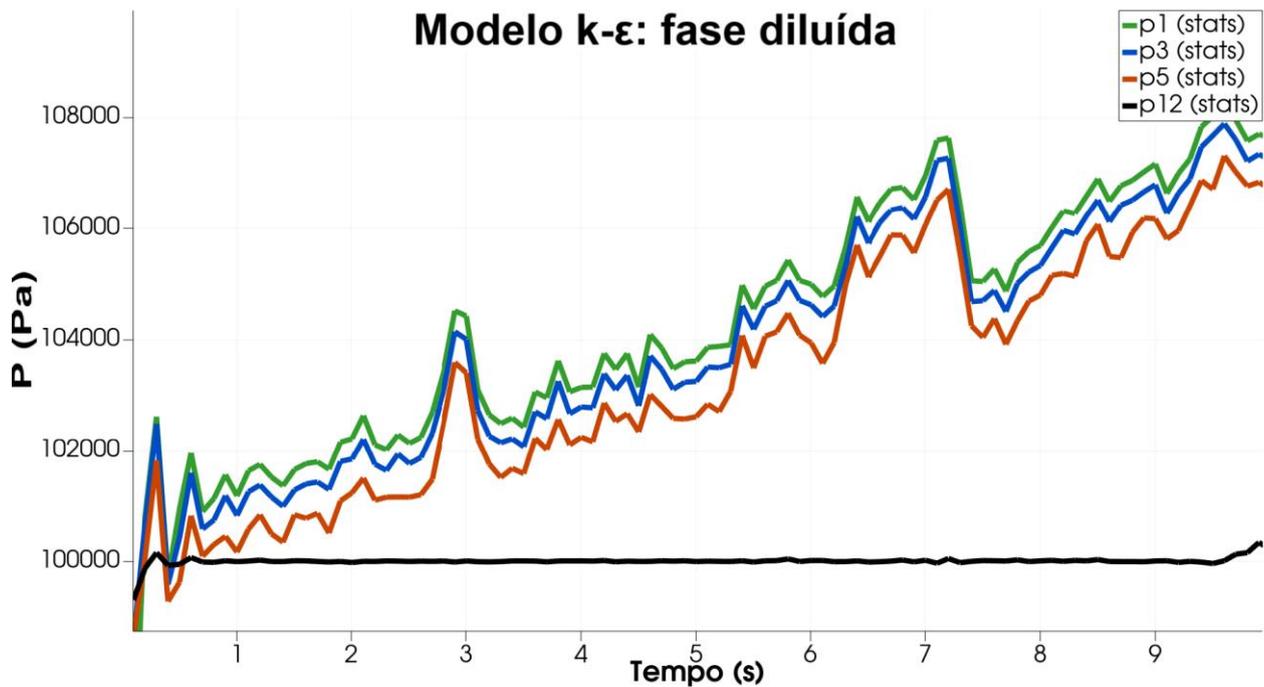
Para realizar a avaliação deste parâmetro, foram definidos pontos de monitoramento, denominados "probes" no software Paraview, dispostos estrategicamente ao longo dos trechos vertical e horizontal da linha de transporte pneumático. A distribuição dos "probes" foi estabelecida com base no sistema de coordenadas definido no Paraview, conforme ilustrado na Tabela 10. Cabe destacar que a seleção dos pontos ao longo da tubulação seguiu os critérios estabelecidos no estudo de Gomes (2022). Os pontos selecionados para análise correspondem às coordenadas dos pontos 1, 3, 5 e 12, considerados de relevância crítica para a avaliação do comportamento do sistema de transporte pneumático. A Figura 19 fornece uma representação visual desses pontos, facilitando a compreensão de sua localização e justificando sua escolha como áreas de interesse específico, onde variações significativas no escoamento ou outros fenômenos relevantes podem ocorrer. Além disso, a escolha dos pontos críticos leva em consideração possíveis regiões de acúmulo de material ou de mudanças nas condições de fluxo, como transições entre regimes de escoamento ou zonas de turbulência aumentada, características comuns em sistemas de transporte pneumático.

Figura 19 - Coordenadas para avaliação quantitativa.



Com base nos pontos previamente definidos no sistema de coordenadas, foram realizadas, por meio do software Paraview, configurações gráficas para a visualização da evolução das pressões estáticas em função do tempo. Essas análises, apresentadas nas Figuras 20 a 23, permitem uma avaliação detalhada das variações temporais da pressão em cada uma das coordenadas selecionadas, proporcionando uma compreensão aprofundada do comportamento dinâmico do escoamento no sistema de transporte pneumático. Esses gráficos são fundamentais para entender as dinâmicas internas do sistema, especialmente em termos de perdas de carga, gradientes de pressão, e possíveis áreas de instabilidade no fluxo. A representação gráfica também facilita a identificação de regiões de maior suscetibilidade a fenômenos como turbulência ou bloqueios, que podem comprometer a eficiência do transporte de materiais particulados.

Figura 20 - Perfil de queda de pressão utilizando k-ε em fase diluída.



Fonte: Autor, 2024.

Figura 21 - Perfil de queda de pressão utilizando k- ω em fase diluída.

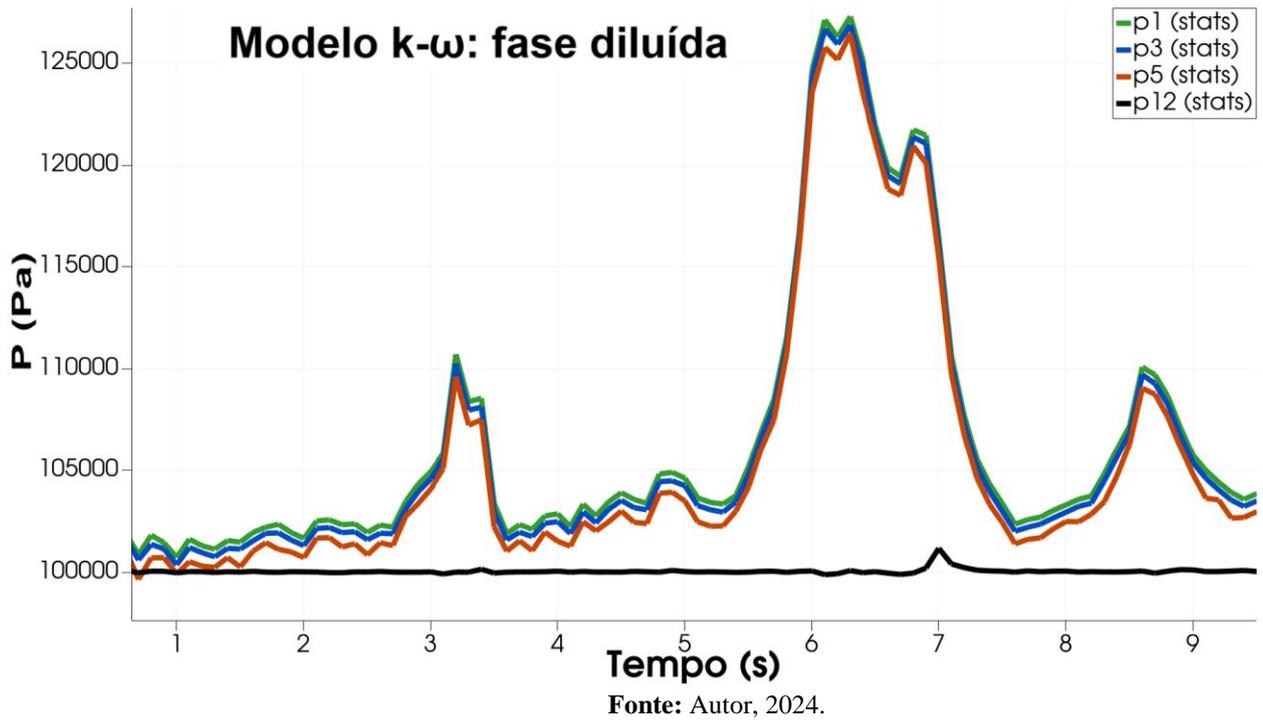


Figura 22 - Perfil de queda de pressão utilizando k- ϵ em fase densa.

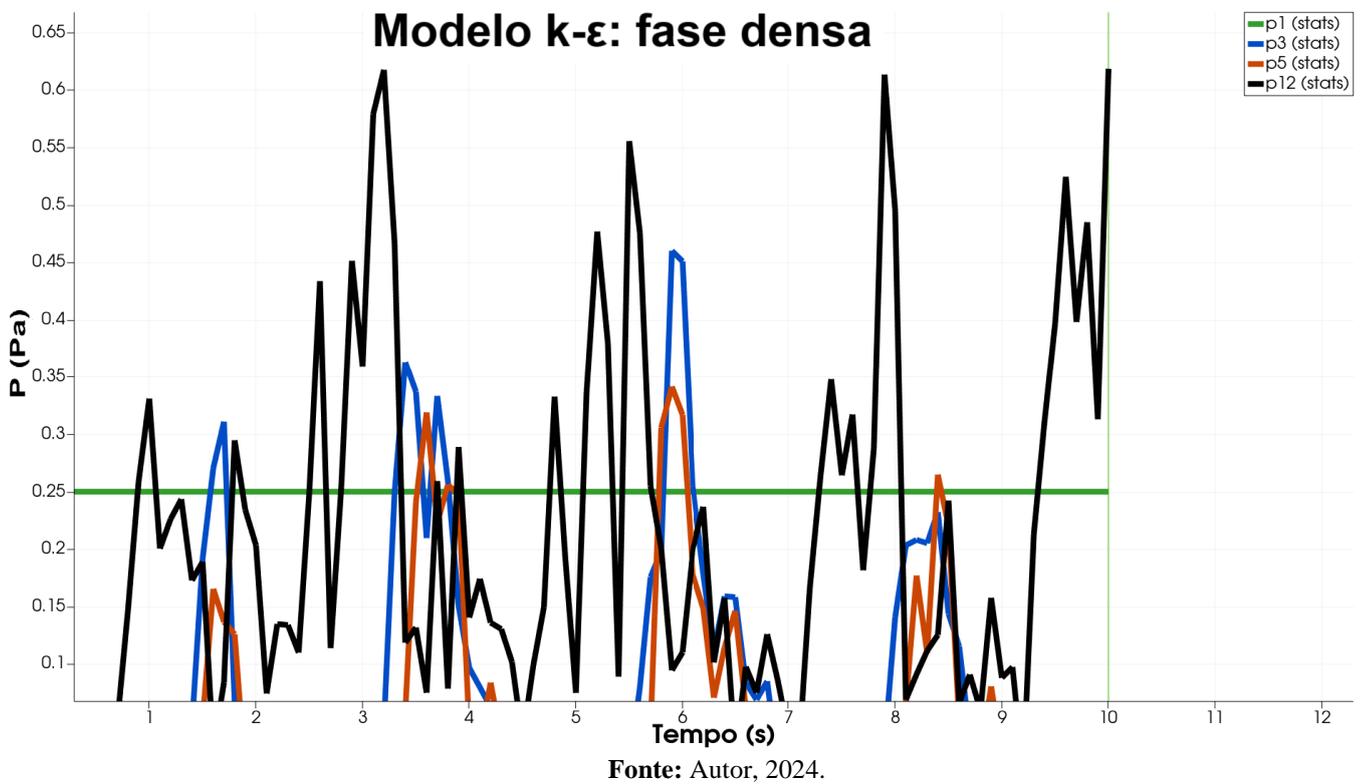
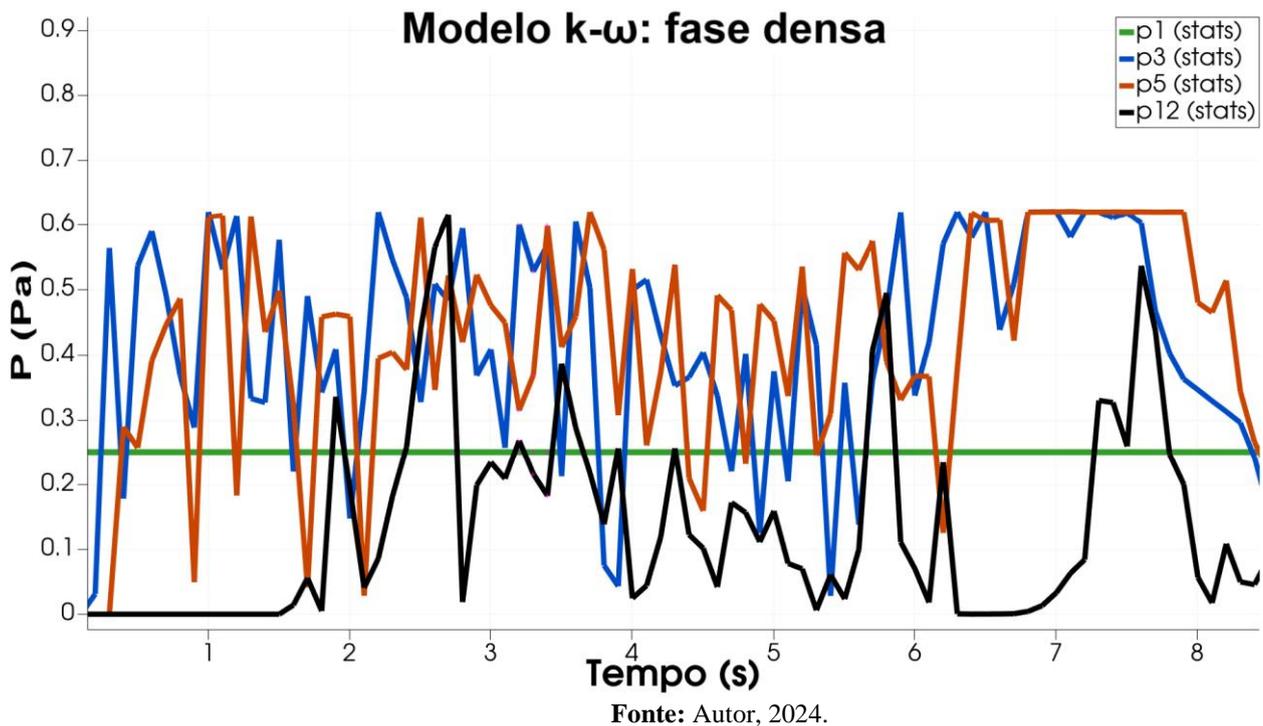


Figura 23 - Perfil de queda de pressão utilizando $k-\omega$ em fase densa.



Nas Figuras 20 a 23, observa-se que o aumento da concentração de sólidos na seção transversal da tubulação impacta diretamente o comportamento do escoamento, promovendo um aumento significativo na queda de pressão ao longo da linha. Esse fenômeno é resultado do atrito entre as partículas sólidas e a parede da tubulação, bem como da restrição ao fluxo de ar. Conforme a quantidade de sólidos dispersos no meio aumenta, o fluxo de ar encontra maior resistência, o que, por sua vez, eleva a perda de carga devido à maior interação entre o fluido e as superfícies, tanto das partículas quanto da tubulação. Esse comportamento é amplamente descrito na literatura, sendo característico de escoamentos bifásicos sólidos-gás em sistemas pneumáticos, onde o aumento da fração volumétrica de sólidos tende a intensificar as forças de fricção e os gradientes de pressão ao longo do trajeto.

Conforme descrito por Santo et al. (2018), após a alimentação ou uma curva em um sistema de transporte pneumático, as partículas sólidas experimentam uma fase de aceleração até atingirem uma velocidade constante. Durante essa fase, o comportamento do escoamento pode ser caracterizado pela variação da queda de pressão ao longo do comprimento da tubulação. A extensão da região de aceleração é influenciada por diversos fatores, incluindo o diâmetro da tubulação, as propriedades físicas do material transportado, a carga de sólidos e a velocidade do fluido de transporte. Nessa região de aceleração, a queda de pressão por unidade de comprimento não é constante, visto que uma porção significativa da energia do sistema é direcionada para superar a inércia das partículas e acelerar o fluxo sólido-gás. Conforme as partículas se aproximam da velocidade constante, a demanda energética para mantê-las aceleradas diminui, o que se reflete na redução da taxa de queda de pressão. A

transição da zona de aceleração para a zona de escoamento plenamente desenvolvido é marcada por uma queda de pressão mais linear e constante ao longo do duto. Nesta fase, o escoamento atinge um estado estável, no qual as forças de resistência e atrito se equilibram. A pressão estática ao longo da tubulação decresce de maneira aproximadamente linear, e a queda de pressão por unidade de comprimento se estabiliza, caracterizando uma condição de regime permanente.

Observa-se, na Figura 20, durante os primeiros segundos, a pressão em todos os pontos monitorados (P1, P3, P5 e P12) passa por uma fase inicial de estabilização, onde oscilações rápidas indicam o processo de ajuste do fluxo de ar e partículas. A partir desse ponto, há um comportamento típico de oscilações de pressão que aumenta gradativamente em todos os pontos monitorados ao longo do tempo, exceto no ponto P12, que mantém um valor de pressão significativamente mais baixo e estável durante toda a simulação. P1, P3 e P5 apresentam pressões progressivamente mais altas, indicando um aumento da resistência ao fluxo devido o aumento do atrito das partículas com as paredes da tubulação e às interações turbulentas que ocorrem no fluido. Por outro lado, P12, localizado mais a jusante, apresenta um comportamento distinto, com valores de pressão muito mais baixos e estáveis. Isso sugere que, à medida que o fluxo avança pela tubulação, a energia do sistema dissipa-se gradativamente, e as partículas que atingem essa região sofrem menos variações turbulentas e resistência ao movimento, resultando em um ambiente de fluxo mais uniforme.

Diferentemente dos resultados do modelo $k-\epsilon$, o gráfico gerado com o modelo $k-\omega$ exibe oscilações menos amplificadas de pressão nos pontos monitorados ao longo do tempo. Nos pontos P1, P3, e P5 (localizados nas regiões mais críticas da tubulação), observa-se uma elevação da pressão ao longo do tempo, tendo como consequência os picos expressivos entre 3 e 6 segundos. Essa variação coincide com os pontos críticos de aglomeração ou desaceleração das partículas transportadas, indicando zonas de maior resistência ao fluxo. O ponto P12 mantém-se em uma pressão mais estável e baixo, similar ao observado no modelo $k-\epsilon$, sugerindo que, à medida que o fluxo avança pela tubulação, há uma dissipação da energia turbulenta e uma acomodação do escoamento, resultando em um comportamento mais uniforme nessa região.

O gráfico do modelo $k-\omega$ apresenta um padrão distinto em relação ao modelo $k-\epsilon$, especialmente na forma como os picos de pressão se desenvolvem. No gráfico $k-\omega$, é possível perceber picos mais pronunciados, significativamente mais altas que no modelo $k-\epsilon$. Essa elevação acentuada pode ser atribuída à sensibilidade do $k-\omega$ para capturar pequenas variações nas interações entre as partículas e a parede da tubulação, gerando uma previsão mais precisa de eventos de alta resistência localizada e formação de gradientes de pressão. Além disso, o modelo $k-\omega$ consegue captar variações súbitas de pressão, como a queda brusca observada

após o maior pico em torno de 7 segundos. Esses comportamentos podem estar associados a fenômenos transientes de alívio de pressão, onde aglomerações de partículas podem ser temporariamente rompidas, permitindo que o fluxo de ar avance e diminua rapidamente a pressão.

Sob condições de baixas vazões do gás transportador e altas concentrações de sólidos, o comportamento do fluxo gás-sólido tende a se tornar instável e a apresentar um caráter altamente heterogêneo. Nesses casos, a distribuição dos sólidos na seção transversal da tubulação não é uniforme, como descrito por Klinzing et al. (2010). Esse fenômeno pode resultar na formação de aglomerados de partículas, zonas de recirculação ou até mesmo em padrões de escoamento pulsante. Tais características indicam a existência de regiões com diferentes concentrações de sólidos e, conseqüentemente, variações na densidade do escoamento, o que afeta diretamente a eficiência do transporte pneumático. Este comportamento é particularmente relevante em sistemas de transporte denso, onde a concentração volumétrica de sólidos é elevada. Sob essas condições, forças de interação partícula-partícula e partícula-parede tornam-se predominantes, contribuindo para o surgimento de aglomerados e recirculação. A dinâmica do fluxo se complica ainda mais pela redução da capacidade de sustentação do gás sobre as partículas, agravando o desvio do comportamento idealmente disperso.

No início da tubulação, P1, a pressão mantém-se relativamente estável, sugerindo que, nesse ponto, o fluxo de material é mais uniforme, possivelmente devido a uma menor interação entre o ar e o farelo de trigo, que ainda não está completamente disperso na fase gasosa. À medida que o material avança na tubulação, o gráfico mostra flutuações mais pronunciadas nos pontos P3 e P5. Essas flutuações indicam que o regime de escoamento começa a ser mais afetado por fenômenos turbulentos, como a formação de "plugs" e a interação desordenada entre a fase gasosa e a fase sólida, características típicas de sistemas de transporte em fase densa. Esse comportamento é comum em sistemas que transportam materiais particulados de baixa fluidez, como o farelo de trigo. O modelo $k-\epsilon$, conhecido por lidar bem com grandes escalas de turbulência, captura essas variações de forma eficaz, permitindo a visualização das regiões de maior instabilidade dentro da tubulação. Observa-se que a pressão ao longo do tempo varia de forma acentuada, especialmente nos pontos mais distantes da entrada da tubulação, como o P12, pois, apresenta os maiores picos de pressão. Isso pode ser explicado pela formação de aglomerados de partículas que resistem ao fluxo de ar, causando obstruções temporárias na tubulação e exigindo um aumento da pressão para deslocar esses aglomerados.

Ao contrário do modelo $k-\epsilon$, o modelo $k-\omega$ apresenta flutuações de pressão menos acentuadas, especialmente nos pontos intermediários e finais da tubulação (P3, P5 e P12). As

pressões em P3 e P5 mantêm-se dentro de uma faixa relativamente estável, a qual sugere-se um escoamento mais homogêneo e controlado ao longo desses pontos, com menores oscilações bruscas de pressão, refletindo um melhor comportamento dinâmico do sistema. Ou seja, o sistema de transporte experimenta menos obstruções ou formação de "plugs", como observado no gráfico anterior com o modelo $k-\epsilon$. Atribuindo-se à maior capacidade do modelo $k-\omega$ de lidar com escoamentos próximos a superfícies sólidas e em regiões de gradientes de pressão elevados. O ponto P12, que no modelo $k-\epsilon$ apresentava grandes picos de pressão, exhibe no modelo $k-\omega$ uma variação significativamente reduzida. Essa menor amplitude de variação sugere que o modelo $k-\omega$ captura com mais precisão a dissipação da turbulência e a interação entre o farelo de trigo e o fluxo de ar, especialmente nas regiões mais próximas das paredes da tubulação, a qual resulta em um transporte mais eficiente e previsível do material.

Para aprofundar ainda mais o presente estudo, foi realizada uma comparação entre os valores de pressão obtidos por esses modelos em condições de fase diluída e densa, contrastados com os resultados de um escoamento monofásico, a fim de avaliar o desempenho de cada abordagem em capturar as dinâmicas do sistema.

Tabela 16 - Queda de pressão no sistema monofásico.

Δp	
Pontos	Monofásico
Vertical	63.562,0
Curva	26.198,0
Horizontal	347.941,0

Fonte: Autor, 2024.

Tabela 17 - Queda de pressão no sistema multifásico.

Δp				
Pontos	$k-\epsilon$ (diluída)	$k-\omega$ (diluída)	$k-\epsilon$ (densa)	$k-\omega$ (densa)
Vertical	365,0	337,0	121.753,0	3.731,0
Curva	634,0	681,0	12,0	32.534,0
Horizontal	2.614,2	3.828,0	-70.976,0	102.817,0

Fonte: Autor, 2024.

Os valores de pressão em regime monofásico, conforme Tabela 16, são significativamente mais altos em todos os pontos comparados aos valores obtidos em regime multifásico (Tabela 17), tanto para o modelo $k-\epsilon$ quanto para o $k-\omega$. Isso indica que a presença de duas fases (sólido e gás) contribui para uma redução geral da pressão no sistema, devido ao aumento da resistência ao fluxo causado pela interação entre as fases. Essas diferenças destacam a maior sensibilidade do modelo $k-\omega$ às alterações no escoamento turbulento provocadas pela curva, o que reflete sua capacidade superior de capturar os valores do escoamento de forma mais sensível às regiões de fronteira e às interações de fluxo próximo à parede.

Na fase diluída, ambos os modelos de turbulência preveem uma queda de pressão semelhante, esta pequena diferença sugere que ambos os modelos capturam adequadamente o comportamento turbulento na fase diluída para um escoamento vertical, onde os efeitos gravitacionais predominam. No entanto, na fase densa, os resultados divergem drasticamente, sugerindo que o $k-\varepsilon$ pode estar superestimando a resistência ao escoamento na presença de partículas densas, devido à sua abordagem para tratar a dissipação de energia em regimes de alta concentração de sólidos. O $k-\omega$, por sua vez, fornece uma previsão mais razoável para essa fase, indicando maior robustez ao lidar com fases densas.

Na seção da curva, onde o escoamento é mais complexo devido às mudanças na direção do fluxo, os modelos $k-\varepsilon$ e $k-\omega$ também apresentam previsões bastante próximas na fase diluída, a qual entende-se que para regimes de baixa concentração de partículas, ambos os modelos conseguem capturar adequadamente o aumento na perda de pressão devido à curvatura. No entanto, na fase densa, o $k-\varepsilon$ subestima drasticamente a queda de pressão, esse comportamento pode ser atribuído à sua incapacidade de lidar adequadamente com as interações entre as partículas e o fluido em áreas de alta complexidade geométrica, como curvas, onde a segregação de partículas pode ocorrer. O $k-\omega$, por outro lado, parece capturar melhor os efeitos dessas interações, refletindo uma previsão mais realista.

Na seção horizontal, ambos os modelos de turbulência, $k-\varepsilon$ e $k-\omega$, apresentam um aumento significativo na queda de pressão para a fase diluída. Esses resultados são coerentes com o comportamento típico de escoamentos horizontais em sistemas pneumáticos, onde, devido à ausência da força gravitacional no eixo do escoamento, a resistência ao movimento das partículas sólidas aumenta consideravelmente. Essa resistência adicional ocorre principalmente devido à interação entre as partículas e as paredes da tubulação, assim como à maior influência das forças de arrasto e colisões interpartículas, que se tornam mais pronunciadas quando o escoamento é mantido horizontal. A previsão dessas quedas de pressão em escoamentos diluídos por ambos os modelos reflete a capacidade dos mesmos em capturar os fenômenos fundamentais associados à turbulência e dispersão de partículas em tais condições. No entanto, na fase densa, o comportamento dos modelos diverge substancialmente. O modelo $k-\varepsilon$ prediz um valor negativo de pressão, o que sugere a ocorrência de um comportamento não físico, possivelmente relacionado a problemas de convergência ou instabilidade numérica durante a simulação. Esse tipo de resultado aponta para uma limitação clara desse modelo ao lidar com escoamentos multifásicos densos em trechos horizontais. A falha pode ser atribuída à maneira como o $k-\varepsilon$ trata os fenômenos de dispersão turbulenta e as interações partícula-fluido em regimes com altas concentrações de sólidos. Em escoamentos densos, as partículas tendem a formar camadas próximas às paredes e a criar zonas de baixa pressão localizadas que o $k-\varepsilon$ não consegue modelar adequadamente,

resultando em previsões de pressão irreais ou não convergentes.

Contudo, o modelo $k-\omega$ prediz uma queda de pressão elevada, mas plausível, para a fase densa. Este comportamento reflete uma maior capacidade do $k-\omega$ em lidar com as complexidades associadas ao escoamento multifásico denso, particularmente em geometrias horizontais. A maior resistência ao escoamento denso em trechos horizontais é causada pela sedimentação das partículas, que tendem a se acumular nas camadas inferiores da tubulação, aumentando a fricção e a resistência ao fluxo. O $k-\omega$, ao incorporar melhor a dinâmica de borda e os efeitos locais de alta concentração de partículas, oferece previsões mais realistas ao capturar as interações fluidodinâmicas com maior precisão, mesmo em condições de alta densidade de sólidos.

Esse contraste de resultados sugere que o modelo $k-\varepsilon$, embora adequado para escoamentos diluídos, não consegue capturar com precisão o comportamento da fase densa em regiões horizontais, enquanto o $k-\omega$ se destaca por ser mais robusto ao prever as condições físicas e pressões reais nesses cenários. Vale ressaltar que, na fase densa, o tempo de convergência e a estabilidade numérica das simulações são fatores críticos, uma vez que os escoamentos densos apresentam maior sensibilidade a condições de contorno, malhas refinadas e a parâmetros de inicialização. A ocorrência de um valor negativo no $k-\varepsilon$ pode indicar que a simulação deveria ter um maior tempo de simulação ou refinamentos adicionais na malha e nos critérios de convergência para garantir resultados mais precisos e realistas. Os resultados indicam que o $k-\omega$ é o modelo de turbulência mais robusto e confiável para a simulação de escoamentos multifásicos densos, especialmente em seções de geometria complexa, como curvas e fluxos horizontais. Embora o $k-\varepsilon$ mostrou-se adequado para escoamentos diluídos e falhou em capturar adequadamente os efeitos de interações fluido-partícula em fases densas, particularmente em seções curvilíneas e horizontais, a aplicação do modelo $k-\omega$ para simulações de transporte pneumático parece ser a escolha mais adequada, dado seu desempenho superior na previsão de quedas de pressão e sua maior capacidade de lidar com fluxos complexos.

6. CONCLUSÃO

Com base no estudo realizado sobre a influência das propriedades de uma malha computacional e a aplicação de diferentes modelos de turbulência no transporte pneumático em trechos verticais, curvos e horizontais, é possível concluir que a compreensão aprofundada desses fatores é essencial para o projeto e operação eficientes de sistemas pneumáticos de transporte de materiais particulados. A análise quantitativa e qualitativa permitiu identificar a influência significativa do número de elementos e da geometria da malha computacional. Uma malha bem refinada, com distribuição adequada de elementos em regiões críticas, como curvas e zonas de mudança de direção, foi crucial para capturar adequadamente as variações de pressão, turbulência e comportamento do escoamento multifásico.

Além disso, os modelos de turbulência desempenharam um papel central na previsão das condições do escoamento multifásico em diferentes trechos da tubulação. O estudo evidenciou que, enquanto o modelo $k-\epsilon$ mostrou-se adequado para simular escoamentos diluídos e regimes de fluxo mais estáveis, ele apresentou limitações significativas ao lidar com escoamentos densos e complexos, como curvas e trechos horizontais com alta concentração de partículas. Em contraste, o modelo $k-\omega$ demonstrou uma maior robustez em capturar a dinâmica de escoamentos em ambas as fases, mostrando-se mais adequado para prever as quedas de pressão e o comportamento do gás-sólido em situações de alta concentração de partículas e em geometrias mais complexas.

A utilização de ferramentas de simulação numérica, como a fluidodinâmica computacional (CFD), provou ser fundamental para a previsão do comportamento do sistema pneumático, permitindo simular cenários complexos e antecipar problemas operacionais. A possibilidade de realizar uma análise multifásica com modelos precisos e malhas de alta qualidade contribuiu para o melhor entendimento da física ao escoamento gás-sólido, algo que seria inviável de capturar por métodos experimentais tradicionais devido à complexidade envolvida. No contexto industrial, a CFD possibilita otimizações de projeto, permitindo prever quedas de pressão, fluxo de partículas e possíveis bloqueios, otimizando o consumo energético e a eficiência do sistema. Outro aspecto crítico foi a validação dos resultados obtidos por meio de equações multifásicas e comparações com dados experimentais ou empíricos. A calibração das simulações por meio de tais validações é imprescindível para assegurar que os modelos numéricos capturam adequadamente as interações fluido-partícula, bem como os efeitos de turbulência e perda de pressão ao longo do sistema.

Esses resultados complementam e podem servir como uma referência para aprimorar as simulações realizadas por Gomes (2022) e Coêlho (2023). Com a definição de uma malha computacional hexaédrica intermediária e a escolha do modelo de turbulência $(k-\omega)$, este trabalho oferece parâmetros de simulação que podem elevar a precisão e a confiabilidade

dos resultados de transporte pneumático. A aplicação desses avanços nos estudos de Gomes e Coêlho tem o potencial de refinar a modelagem numérica, conduzindo a uma representação mais fiel do comportamento do escoamento e contribuindo para uma análise ainda mais detalhada dos sistemas experimentais e teóricos nessas pesquisas. Essa abordagem proporciona uma modelagem mais precisa do escoamento em simulações CFD, avançando o entendimento sobre o comportamento de biomassa em sistemas de transporte pneumático e oferecendo uma base sólida para futuras investigações e otimizações.

Portanto, este estudo avançou o conhecimento sobre o transporte pneumático, demonstrando que as propriedades dos materiais, como a distribuição a concentração da fase sólida, os parâmetros operacionais (como velocidade e pressão), e as configurações distintas para as variáveis independentes (como a geometria da tubulação) influenciam significativamente as variáveis de resposta, como queda de pressão, eficiência de transporte e segregação de partículas.

7. REFERÊNCIA

ANSYS **Fluent Theory Guide**, 2016.

ARIYARATNE, W. K. H.; RATNAYAKE, C.; MELAAEN, M. C. **CFD modeling of dilute phase pneumatic conveying in a horizontal pipe using Euler–Euler approach**. *Particulate Science and Technology*, v. 6351, p. 1–9, 2018.

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.

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

COÊLHO, WALBER. **AVALIAÇÃO NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES FÍSICAS GRANULARES E FLUIDAS NO TRANSPORTE PNEUMÁTICO EM TRECHOS HORIZONTAIS E VERTICAIS**. 2023. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas - Ufal, Maceió, 2023.

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)

Knupp, P., & Steinberg, S. (1993). **Fundamentos de Geração de Malhas**. CRC Press, Boca Raton.

KUNDU, Pijush K.; COHEN, Ira M.; DOWLING, David R. *Fluid Mechanics*. 6th ed.

Burlington: Academic Press, 2015.

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>

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.

MARQUARDT, R. M. **Influência do efeito de vizinhança nas solicitações devido à ação do vento: estudo comparativo segundo normativa técnica e simulação fluidodinâmica computacional**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Santa Cruz do Sul, Curso de Engenharia Civil, 2019.

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.

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>

Patro, S., & Murugan, S. (2014). **CFD simulation of dense phase pneumatic conveying of fly ash in horizontal pipe**. Engineering Science and Technology, an International Journal, 17(4), 223-230.

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.

RABINOVICH, E.; KALMAN, H. **Flow regime diagram for vertical pneumatic conveying and fluidized bed systems**. Powder Technology, v. 207, n. 1–3, p. 119–133, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.10.017>

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>

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

VENTURIN, V. S. **Simulação computacional de bio-escoamentos utilizando o OpenFOAM**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo, Curso de Engenharia Mecânica, 2014.

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Educatio

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>

WILCOX, D. C. (2006). "Turbulence Modeling for CFD." DCW Industries.

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>