

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

PAULO HENRIQUE DE SOUSA BAUDEL

SIMULAÇÃO CFD DE UM LEITO DE JORRO CÔNICO
UTILIZANDO O OPENFOAM

SÃO CARLOS -SP
2021

PAULO HENRIQUE DE SOUSA BAUDEL

SIMULAÇÃO CFD DE UM LEITO DE JORRO CÔNICO UTILIZANDO O OPENFOAM

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Béttega
Co-orientadora: Dra. Júnia Natália Mendes Batista

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Graduação em Engenharia Química

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do candidato Paulo Henrique de Sousa Baudel, realizada em 28/06/1994:

Prof. Dr. Edson Luiz Silva
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua
Universidade Federal de São Carlos

Prof. Dr. Rodrigo Béttega
Universidade Federal de São Carlos

Dra. Júnia Natália Mendes Batista
Universidade Federal de São Carlos

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram, cada um à sua forma, nesta jornada.

AGRADECIMENTO

Ao orientador, Prof. Dr. Rodrigo Béttega pela mentoria, apoio e compreensão ao longo do curso, especialmente durante os três anos de trabalho que culminaram neste momento.

À co-orientadora, Dra. Júnia Mendes Batista, por compartilhar seu conhecimento técnico, sem o qual este trabalho não seria possível, e pelo comprometimento, assistência, parceria, motivação e amizade sempre presentes neste período.

À Prof. Dra. Gabriela Cantarelli Moreira, pela solicitude e disposição em dialogar sobre o *software* OpenFOAM e suas particularidades.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Química que fizeram parte da graduação que carrego com orgulho e do crescimento pessoal que experienciei durante o curso.

Aos membros da banca e aos professores da disciplina de Trabalho de Graduação, por aceitarem o convite e fazerem parte deste momento.

A Ana, pelo amor incondicional materno, pela torcida e pela doçura sempre oferecida nos momentos de dificuldade. A Henrique, fonte de conhecimento, sabedoria e apoio; principalmente, pela presença do carinho de um pai.

A Victoria Shiratsu, por permear todas as camadas da minha vida, navegar pelas turbulências e celebrar as conquistas ao meu lado.

RESUMO

A performance da ferramenta de fluidodinâmica computacional (CFD) em código aberto OpenFOAM foi comparada ao *software* comercial *Ansys Fluent* através da validação do modelo de dois fluidos (TFM) na fluidodinâmica do leito de jorro em simulações equivalentes. A malha computacional escolhida foi gerada no *software* de licença comercial, importada ao OpenFOAM por meio de rotina interna e validada por meio de testes de independência de malha utilizando a metodologia GCI. Foram realizados ensaios na unidade experimental representada de acordo com a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974), de modo a obter a curva fluidodinâmica real do equipamento e determinar parâmetros operacionais característicos. A ferramenta OpenFOAM apresentou resultados satisfatórios em relação ao *software* comercial, obtendo menores tempos de simulação e maior precisão na obtenção de parâmetros característicos como altura do leito de jorro estável e velocidade de mínimo jorro; no entanto, falhas na importação da malha ao *software* de código aberto resultaram em distorções na simulação do regime de jorro, observadas através dos contornos na fração volumétrica de sólidos. O modelo TFM mostrou-se adequado para os dois *softwares*, apesar das divergências relativas à modelagem matemática observadas em relação à curva fluidodinâmica experimental em ambos os casos. Concluiu-se que, apesar da forte influência dos colapsos incorridos na malha pela importação do OpenFOAM, o *software* de código aberto é capaz de gerar bons resultados com os grandes benefícios de gratuidade de uso e agilidade no processamento, mesmo em casos onde a malha computacional apresenta elevado nível de complexidade e densidade de células se comparada aos exemplos disponíveis na literatura.

Palavras-chave: CFD. Código aberto. OpenFOAM. Leito de Jorro. TFM. GCI. Ansys Fluent.

ABSTRACT

The performance of *open-source* computational fluid dynamics (CFD) *software*, OpenFOAM, relative to the widely-used *Ansys* suite of CFD *software*, was evaluated through the validation of two equivalent simulations of a spouted bed utilizing the *two-fluid model* (TFM). The grid used in the simulation was created in *Meshing*, part of the *Ansys* suite, and imported to OpenFOAM through an internal command, then validated by grid independence tests through the calculation of a *Grid Convergence Index* (GCI). Experimental tests were run according to the methodology proposed by Mathur and Epstein (1974), aiming to obtain the equipment's characteristic curve and determine operational fluid dynamic parameters. OpenFOAM performed in a satisfactory manner, resulting in shorter simulation times and greater precision in obtaining characteristic parameters such as stable spout height and minimum spout velocity; however, local grid collapses due to faulty mesh conversion were noted, which led to distortion in the spout regimes and impacted on the visualization of the simulation behaviour as seen in the volumetric solid fraction contour plots. The two-fluid approach was shown to be adequate for both *softwares*, despite the differences noted between experiment and simulation shown for the pressure drop versus velocity curve. It was concluded that, despite the heavy influence of local cell collapses suffered in the mesh conversion, OpenFOAM is entirely capable of generating good results for spouted bed simulations, with the added benefits of free and open-source use and enhanced processing speed, even in cases where the mesh used is highly complex relative to what is usually employed in similar works.

Keywords: CFD. Open-source. OpenFOAM. Spouted bed. TFM. GCI. Ansys Fluent.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE SÍMBOLOS	10
1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 SORGO SACARINO	14
2.2 LEITO DE JORRO	15
2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	17
2.4 OPENFOAM	19
3 MODELAGEM MATEMÁTICA	22
3.1 MALHA COMPUTACIONAL (PROCEDIMENTO GCI)	22
3.2 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO	24
3.2.1 Forças de Arraste Entre Fases	26
3.2.2 Tensões de Viscosidade	27
3.2.3 Teoria Cinética Granular	28
3.2.4. Pressão e viscosidade da fase sólida	30
3.3 TURBULÊNCIA	31
3.3.1. Turbulência na Fase Fluida	31
3.3.2. Turbulência na Fase Granular	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 EXPERIMENTO	34
4.1.1 Equipamento e Materiais Utilizados	34
4.1.2 Metodologia	36
4.2 GERAÇÃO, ESCOLHA E VALIDAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL	37
4.2.1 Infraestrutura Computacional e Softwares Utilizados	37
4.2.2 Geração das Malhas	37
4.2.3 Escolha e Validação da Malha	37
4.3 SIMULAÇÃO DO LEITO DE JORRO VIA ABORDAGEM EULER-EULER	39
4.3.1 Ansys Fluent	40
4.3.2 OpenFOAM	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
5.1 EXPERIMENTAL	43

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO NO SOFTWARE ANSYS FLUENT	44
5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO NO SOFTWARE OPENFOAM	47
5.4 COMPARAÇÃO ENTRE SOFTWARES	52
6 CONCLUSÕES	54
REFERÊNCIAS	57

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Regimes de jorro estabelecidos de acordo com a vazão de gás: a) Arco compacto; b) Jato interno; c) Jorro estabelecido.	16
Figura 2 – Esquema da unidade experimental utilizada no trabalho. (1) soprador; (2) válvula principal; (3) válvula by-pass; (4) termopar (não utilizado neste trabalho); (5) placa de orifício; (6) sensor de pressão; (7) computador; (8) microcontrolador Arduino; (9) leito de jorro.	35
Figura 3 – Dimensões do leito de jorro utilizado no experimento.	36
Figura 4 – Malha OF-3DP utilizada nas simulações do OpenFOAM.	39
Figura 5 – Curva fluidodinâmica característica experimental para a massa de 500g de sorgo.	43
Figura 6 – Valores experimentais e simulados via Ansys Fluent para a queda de pressão em função da velocidade para a massa de 500g de sorgo no leito de jorro.	44
Figura 7 – Fração volumétrica de sólidos simulada via Ansys Fluent para 500g de sorgo em diversas faixas de velocidade.	45
Figura 8 – Valores experimentais e simulados via OpenFOAM para a queda de pressão em função da velocidade para a massa de 500g de sorgo no leito de jorro.	47
Figura 9 – Fração volumétrica de sólidos simulada via OpenFOAM para 500g de sorgo em diversas faixas de velocidade.	48
Figura 10 – Corte transversal da malha feita no software Meshing e importada ao OpenFOAM ilustrando pontos de colapso localizado.	50
Figura 11 – Trajetória das partículas da fase sólida pelos vetores velocidade na simulação em malha 3D no OpenFOAM.	51
Figura 12 – Valores experimentais e simulados via Ansys Fluent e OpenFOAM para a queda de pressão em função da velocidade para a massa de 500g de sorgo no leito de jorro.	52
Figura 13 – Comparação entre contornos de fração volumétrica de sólidos obtidos em regime de jorro estável para a massa de 500g de sorgo via Ansys Fluent e OpenFOAM para a velocidade de 22 m/s.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Malhas computacionais geradas no estudo.	37
Tabela 2 – Parâmetros e propriedades fluidodinâmicas do ar adotados às simulações de teste via método GCI.	38
Tabela 3 – Modelos e parâmetros de solução numérica adotados nas simulações de teste via método GCI.	38
Tabela 4 – Resultados das simulações de teste via método GCI.	39
Tabela 5 – Parâmetros e propriedades fluidodinâmicas de fase adotados às simulações de leito de jorro com sementes de sorgo sacarino no software Ansys Fluent.	40
Tabela 6 – Modelos e parâmetros de solução numérica adotados nas simulações de leito de jorro com sementes de sorgo sacarino no software Ansys Fluent.	41
Tabela 7 – Modelos e parâmetros de solução numérica adotados nas simulações de leito de jorro com sementes de sorgo sacarino no software OpenFOAM.	42
Tabela 8 – Comparação de parâmetros diversos entre Ansys Fluent e OpenFOAM.	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Ar	Número de Archimedes
C_D	Coefficiente de arraste
$C_\mu, C_1, C_2, C_3, C_\beta, C_V$	Coefficientes do modelo de turbulência
$c_{p,s}$	Calor específico fase sólida [J/kg.K]
$c_{p,g}$	Calor específico fase fluida [J/kg.K]
d_s	Diâmetro da partícula [m]
D_0	Diâmetro entrada região cônica [m]
D_c	Diâmetro da coluna cilíndrica [m]
$D_{t,pg}, D_s$	Parâmetros do modelo de turbulência
e_{ss}	Coefficiente de restituição
\vec{F}_s	Forças de campo [N/m ³]
$\vec{F}_{lift,s}$	Força de ascensão [N/m ³]
$\vec{F}_{vm,s}$	Força de massa virtual [N/m ³]

g	Aceleração gravitacional [m/s^2]
g_0	Função de distribuição radial
H_0	Altura do leito estático [m]
$k_{\theta s}$	Coefficiente de difusão da energia granular
K_{fs}	Coefficiente de troca de momento entre fases [kg/m^3s]
κ_s	Parâmetros da turbulência da fase sólida [m^2/s^2]
κ_f	Parâmetros da turbulência da fase fluida [m^2/s^2]
k_f	Condutividade térmica da fase fluida [W/mK]
k_s	Condutividade térmica da fase sólida [W/mK]
p	Pressão [N/m^2]
p_s	Pressão do sólido [N/m^2]
Q	Vazão Volumétrica [m^3/min]
r	Posição radial [m]
Re_s	Número de Reynolds de partícula
U_{ms}	Velocidade do fluido na condição de mínimo jorro [m/s]
U_s	Velocidade do fluido no canal do jorro [m/s]
\vec{v}_q	Velocidade da fase q [m/s]
\vec{v}_f	Velocidade da fase fluida [m/s]
\vec{v}_s	Velocidade da fase particulada [m/s]
X_{bu}	Umidade em base úmida [%]
Z	Posição axial [m]
ΔP	Queda de pressão [Pa]

Letras Gregas

α_f	Fração volumétrica do fluido
α_q	Fração volumétrica da fase q
$\alpha_{s,max}$	Fração volumétrica de sólidos máxima
α_s	Fração volumétrica de sólidos no empacotamento
γ	Ângulo da base cônica [°]
$\gamma_{\theta s}$	Dissipação de energia por efeitos de colisão

ε_f	Dissipação de energia de turbulência na fase fluida [m^2/s^3]
η_{sf}	Parâmetro de turbulência
θ_s	Temperatura granular [m^2/s^2]
λ_s	Viscosidade de <i>bulk</i> dos sólidos [Pa.s]
μ_f	Viscosidade do fluido [Pa.s]
$\mu_{t,f}$	Viscosidade turbulenta da fase fluida [Pa.s]
$\prod_{k,f}$, $\prod_{\varepsilon,f}$	Influência da fase particulada na fase contínua
ρ_s	Massa específica do sólido [kg/m^3]
ρ_f	Massa específica do fluido [kg/m^3]
$\bar{\tau}_s$	Tensor de tensões da fase sólida [N/m^2]
$\tau_{F,fs}$	Tempo de relaxação da partícula [s]
$\tau_{t,fs}$	Tempo de escala integral lagrangiano
φ	Esfericidade
ϕ_{fs}	Troca de energia entre a fase fluida e particulada

Subscritos

<i>EST</i>	Estável
<i>f</i>	Fluido
<i>mj</i>	Mínimo Jorro
<i>s</i>	Sólidos
<i>q</i>	Fase

Abreviaturas e Siglas

CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
DEM	<i>Discrete Element Method</i>
TFM	<i>Two Fluid Model</i>

1 INTRODUÇÃO

O sorgo sacarino, espécie rica em açúcares do sorgo, o quinto cereal mais produzido do mundo no momento de redação deste trabalho, tem ampla adesão e cultivo devido à sua adaptabilidade a climas tropicais (PARRELA, 2012), sendo de particular interesse para a agricultura brasileira sob a proposta de fonte de energia complementar à cana-de-açúcar em regime de entressafras. Por ser colhido em forma de sementes grosseiras, a secagem do sorgo faz-se essencial para a utilização e distribuição, sendo necessária atenção especial ao contato entre o sólido e o gás utilizado na secagem.

Desenvolvido por Mathur e Gishler em 1954, o leito de jorro vem sendo utilizado para a secagem de materiais particulados como o sorgo, bem como operações adicionais como pirólise e gaseificação (EPSTEIN, 2011). O equipamento possui algumas limitações relacionadas ao uso em maior escala e a presença de altos valores de perda de carga envolvidos no equipamento; sendo assim, vêm sendo estudadas novas geometrias e configurações, particularmente centradas nos parâmetros operacionais e na geometria do equipamento, de forma a contornar estas dificuldades.

Por apresentar altos gradientes para todos os fenômenos de transporte, o leito de jorro vem angariando popularidade nos estudos de fluidodinâmica computacional (CFD). A CFD surge como solução para o estudo de fenômenos de transporte, uma vez que consegue simular escoamentos e transferências de calor e mensurá-los com alta acuidade sem a introdução de erros experimentais atrelados aos instrumentos de medição, servindo também o propósito de simplificar o processo de tentativa-e-erro no desenvolvimento de equipamentos ao prever e mensurar comportamentos de escoamento, com a redução de gastos na construção física de protótipos em menor escala.

Na análise de escoamentos multifásicos no campo da fluidodinâmica computacional, convencionou-se utilizar uma de duas abordagens. A abordagem Euler-Euler ou Modelo de Dois Fluidos (*Two-Fluid Model*, ou TFM), utilizada neste trabalho, interpreta a fase dispersa como um segundo fluido, a partir do conceito de teoria cinética granular para o cálculo de parâmetros fluidodinâmicos utilizados no acoplamento pressão-velocidade. O modelo apresenta a principal vantagem de possuir baixo custo computacional, variável bastante relevante na viabilidade dos estudos de CFD; no entanto, as simplificações envolvidas desconsideram alguns efeitos importantes como a influência do empacotamento do leito e das interações entre partícula e fluido.

O mercado conta com uma série de alternativas para *softwares* de CFD, com suas

respectivas aplicabilidades, vantagens e limitações. O *software* Ansys Fluent, utilizado neste trabalho, é amplamente empregado na indústria devido à sua facilidade de uso e à sua cobertura de todo o fluxo de trabalho da CFD, partindo da definição da geometria e geração da malha computacional até o pós-processamento dos resultados obtidos. Apesar da facilidade de uso e da qualidade dos resultados obtidos, o *software* não é gratuito para uso; visando divulgar e ampliar o uso do *software*, a empresa Ansys vem disponibilizando licenças estudantis com funções limitadas.

O *software* OpenFOAM, por sua vez, é uma ferramenta de uso inteiramente gratuito desenvolvida em código aberto para servir aos mesmos propósitos dos softwares comerciais de CFD; isto significa que todos os usuários podem contribuir para o desenvolvimento do projeto. Por operar diretamente através do terminal do sistema operacional Linux, o programa é ágil e conta com uma série de rotinas e pacotes de pós-processamento equivalentes aos presentes em licença comercial. No entanto, a falta de interface implica em um sistema pouco amigável a usuários que não tenham familiaridade com conceitos de programação, e uma limitação recorrente se deve à complexidade envolvida no sistema de leitura e geração de malhas nativa ao *software*. Há, no entanto, uma comunidade engajada em discutir e superar estas limitações atualmente apresentadas no *software*, e o projeto segue evoluindo de forma inteiramente voluntária possibilitada por esforços e financiamentos coletivos e de organizações sem fins lucrativos.

O presente trabalho visa, portanto, avaliar a performance do programa de código aberto OpenFOAM frente ao *software* comercial Ansys Fluent através da validação do modelo de dois fluidos (TFM) na fluidodinâmica do leito de jorro em simulações equivalentes partindo da mesma malha computacional, validada através de testes de independência de malha, comparando suas respectivas vantagens e desvantagens através da obtenção de curvas e parâmetros operacionais característicos do escoamento no leito de jorro. Para a validação destes modelos, foram realizados ensaios experimentais em laboratório segundo a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974) e os resultados gerados foram comparados ao histórico obtido para simulações similares em leito de jorro disponíveis na literatura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SORGO SACARINO

O sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench], uma das primeiras sementes a serem cultivadas em regime sedentário e com origem no continente africano, é atualmente o quinto cereal mais produzido no mundo (BATISTA, 2017). Parte desta amplitude de cultivo se deve ao sorgo ser facilmente adaptável a cultivo e utilização em países tropicais, apresentando eficiente utilização de água e nitrogênio, alta tolerância às variações ambientais e adaptabilidade em terras inférteis. Adicionalmente, considera-se o sorgo como uma cultura de multiprodutos, devido à sua alta produtividade de açúcar e às propriedades nutricionais adequadas de seus grãos, e enfatiza-se seu potencial de cultivo sem a adição de fertilizantes químicos (CALVIÑO; MESSING, 2012; MAW; HOUX; FRITSCHI, 2016; ROLZ, 2016).

O sorgo sacarino, espécie de sorgo com maior concentração de açúcares, vem sendo testado em regiões tropicais como matéria-prima complementar à cultura da cana-de-açúcar, devido a uma série de fatores, como: alto grau de açúcares fermentáveis; cultivo em formato de sementes, que facilita a operacionalização e mecanização em ampla escala; ciclo rápido de cultivo que dura quatro meses, permitindo reduzir a ociosidade do período entressafra da cana-de-açúcar e viabilizar um plantio anual completo através do rodízio de culturas (DOS SANTOS et al., 2015).

Originalmente, o sorgo teve uso principal na nutrição da população e de animais locais ao continente africano, sua região de origem, e foi utilizado como substituto de outros cereais na produção de xarope durante a Segunda Guerra Mundial (BATISTA, 2017); além disso, o fato de ser um cereal livre de glúten o torna atrativo como alternativa alimentícia para pessoas afetadas pela doença celíaca. Em adição ao apelo nutricional, o interesse em seu potencial energético em caráter complementar ao cultivo de cana e fonte alternativa de energia e biocombustíveis vem crescendo. No Brasil a cultura do sorgo já é implementada neste âmbito, datando do início da década de 1970, motivada pela implementação do programa de substituição de combustíveis Pró-Álcool; nesta época, desenvolveu-se a tecnologia para produção de etanol a partir de sorgo sacarino (PESSOA et al., 2011; DURÃES e PARRELLA, 2012; WANISKA et al., 2016).

Dado seu cultivo em formato de semente, o sorgo sacarino é um material granular poroso. A secagem de materiais deste tipo é complexa devido aos diversos fenômenos de

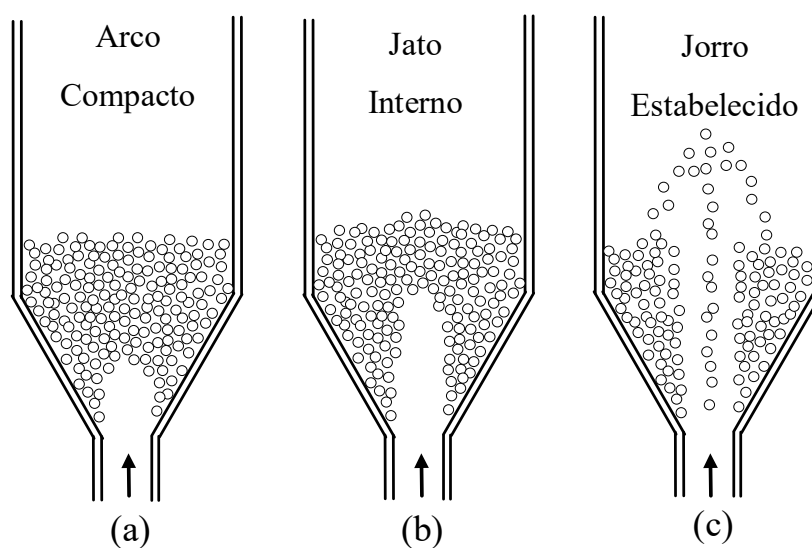
transferência de massa e calor envolvidos, fazendo-se necessário o conhecimento extenso do processo e dos principais parâmetros que o influenciam. O secador utilizado para o processo de secagem deve fornecer um contato gás-sólido eficiente, para obter maiores taxas de transferência de calor e massa. Dado o característico tamanho grosseiro das sementes e grãos de sorgo sacarino, nota-se a prevalência do leito de jorro como escolha de equipamento de secagem destes materiais.

2.2 LEITO DE JORRO

Desenvolvido em 1954 por Mathur e Gishler como uma alternativa ao leito fluidizado, o leito de jorro tem aplicabilidade principalmente na operação com partículas grosseiras (maiores que 1 mm) ou revestimento particulado, mas há esforços no sentido de aplicar o equipamento para outras atividades. Epstein et al. (2011) estudou a possibilidade de reações trifásicas, pirólise, gaseificação e combustão no equipamento.

Tradicionalmente, o leito de jorro apresenta base cônica acoplada a uma coluna cilíndrica, com entrada de gás localizada na parte inferior do leito. Melhorias consecutivas vêm sendo sugeridas ao funcionamento do equipamento, primariamente focadas na geometria e na forma como o gás é inserido no leito. Freitas e Dogan (2000) estudaram o efeito da geometria retangular para o leito de jorro com o objetivo de mitigar as dificuldades envolvidas no processo de *scale-up* do equipamento. Olazar et al. (1992) sugeriram que um leito de base cônica seria mais adequado ao lidar com partículas grosseiras e com maiores distribuições de tamanhos de partícula. O empacotamento na região cônica possibilita a operação do equipamento em uma variedade de diferentes condições, minimiza a queda de pressão e remove a restrição de altura máxima de leito estático para a condição de regime estável (EPSTEIN e GRACE, 2011).

Figura 1 – Regimes de jorro estabelecidos de acordo com a vazão de gás: a) Arco compacto; b) Jato interno; c) Jorro estabelecido.



Fonte: BÉTTEGA (2009).

A transição entre regimes de jorro ilustrada na figura 1, como descrita por Mathur e Epstein (1974), ocorre de acordo com o aumento da vazão de gás da seguinte forma:

1. Para baixas vazões, não há alterações perceptíveis na fração volumétrica de sólidos; o ar apenas percola o leito. Neste regime, a queda de pressão aumenta de maneira proporcional ao aumento da vazão de gás;

2. O aumento subsequente da vazão a partir de um certo ponto empurra as partículas próximas à entrada do leito, criando uma cavidade vazia. Forma-se um arco compacto em torno da região de entrada que comprime as partículas na região, proporcionando resistência ao escoamento. A queda de pressão segue aumentando de acordo com o aumento da vazão;

3. A cavidade do arco compacto cresce e forma um jato interno vertical. A queda de pressão atinge o valor máximo neste ponto;

4. O aumento da vazão além do ponto de jato interno faz com que a altura do jato supere a altura da fração de sólidos acima da interface gás-sólido. Neste ponto, o leito é rompido e observa-se uma diminuição na queda de pressão.

5. Com o arraste das partículas na região central, o leito se expande, chegando ao ponto de jorro incipiente. Pequenos aumentos na vazão provocam mudanças no regime do jorro e conseqüentes diminuições na queda de pressão.

6. É atingido o regime estável de jorro. Nesta etapa, a fração de sólidos no canal do jorro é pequena e aumentos subsequentes de vazão não provocam grandes alterações na queda de pressão, uma vez que o gás percorre diretamente o canal e eleva a fonte de partículas sólidas.

As características do jorro e a estabilidade da operação dependem, em maior parte, das propriedades das fases fluida e sólida, bem como da geometria do equipamento (MATHUR e EPSTEIN, 1974). Moradi e Moradi (2015) estudaram o efeito da geometria na velocidade de mínimo jorro para uma série de variações geométricas do leito de jorro e concluíram que há queda significativa na velocidade de mínimo jorro em um leito de base retangular, mas que este efeito pode ser mitigado pela inserção de placas inclinadas na região da base, tornando o leito de base retangular uma alternativa válida ao leito de base cônica.

Knežević e Povrenović (2015) analisaram a influência de parâmetros fluidodinâmicos como vazão de gás e diâmetro de partículas sobre o coeficiente de transferência volumétrica de massa em um leito experimental pseudo-2D, concluindo que o aumento de vazão de ambas as fases no leito favorece a transferência de massa.

Zhang et al. (2016) avaliaram experimentalmente a fluidodinâmica de partículas grosseiras, de cerca de 6mm de diâmetro, em um leito de jorro pseudo-bidimensional (P2DSB) utilizando a tecnologia de velocimetria por imagem de partículas (PIV). Os resultados foram utilizados na validação de simulações de CFD em estudos subsequentes, mencionados ao decorrer deste trabalho.

A fluidodinâmica do leito de jorro vem sendo amplamente estudada de forma experimental e através de simulações, com o objetivo de identificar os parâmetros com maior influência sobre os fenômenos de transporte e transferência de calor. Como mencionado anteriormente, boa parte dos estudos atribuem grande importância à geometria do leito e da entrada de gás, bem como às propriedades fluidodinâmicas de ambas as fases, sólida e gasosa.

2.3 FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

A fluidodinâmica computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) utiliza técnicas computacionais para a solução de equações de balanço para os fenômenos de transferência de calor, massa e quantidade de movimento, possibilitando simular a operação de equipamentos em geral e reproduzir fenômenos fluidodinâmicos em vários graus de complexidade, incluindo a ocorrência de fenômenos de transferência de calor e massa. Além

da ampla adesão do setor acadêmico à fluidodinâmica computacional que ocorre em paralelo à evolução da tecnologia de processamento, a CFD é hoje uma realidade também no setor industrial, principalmente em estudos de viabilidade ou *scale-up* de equipamentos, uma vez que seu caráter é complementar ao experimental e, conseqüentemente, contribui na diminuição da complexidade na criação de protótipos ou testes-piloto. Segundo Maliska (2004), uma combinação eficaz entre simulações numéricas e experimentos em laboratório resulta em projetos de maior qualidade e menor custo.

A fluidodinâmica computacional, apesar de não se restringir a um conjunto ou método numérico específico na construção de simulações, tradicionalmente utiliza os métodos de Diferenças Finitas (MDF), Volumes Finitos (MVF) e Elementos Finitos (MEF) na solução numérica das equações características. O MEF e o MDF partem de uma dedução puramente matemática e discretizada das equações constitutivas, enquanto o MVF realiza um balanço de conservação de propriedades dentro de um volume de controle delimitado de forma a obter uma equação característica aproximada e correspondente (BATISTA, 2017). Devido ao caráter iterativo das soluções numéricas, convencionou-se dividir o volume de controle a ser analisado em elementos menores (células), que constituem a malha computacional (*grid* ou *mesh*).

A representatividade e a acuidade das simulações construídas dependem amplamente da escolha correta da ferramenta numérica a ser utilizada e dos modelos utilizados na caracterização dos fenômenos, bem como do refinamento adequado da malha computacional. Há de se considerar também o custo computacional envolvido no processamento; malhas com um refinamento excessivo podem acarretar em tempos de simulação inviavelmente grandes sem que haja, necessariamente, uma melhora significativa na acuidade dos resultados. Torna-se fundamental, então, encontrar um grau de refinamento de malha que concilie uma boa representatividade dos fenômenos que ocorrem no volume de controle a um custo computacional razoável. Para isso, utiliza-se o Teste de Independência de Malha (*Grid Convergence Index*, ou GCI) proposto por Roache (1994), que relaciona, dentre malhas com distintos graus de refinamento, a qualidade da resposta da variável-objetivo em relação a uma resposta exata teórica, determinada com base na hipótese de um número infinito de células.

Em fenômenos de escoamento multifásico, convencionou-se adotar uma dentre duas possíveis abordagens. Há a abordagem Euler-Euler, onde a fase sólida é convencionada como contínua, comportando-se como um fluido; e a abordagem Euler-Lagrange, onde há a discretização das partículas e são realizados balanços de força individuais para cada elemento

da fase sólida. Uma vez que um grande número de partículas na fase dispersa acarreta um custo computacional inviavelmente alto sob a abordagem Euler-Lagrangiana, a abordagem Euler-Euler é tradicionalmente adotada na modelagem do leito de jorro (BATISTA, 2017). Neste modelo, pode-se utilizar a Teoria Cinética Granular para descrição de algumas propriedades da fase sólida, introduzindo alguns conceitos como temperatura granular, viscosidade e pressão de sólidos, de forma a viabilizar a hipótese de contínuo para a fase sólida.

O leito de jorro, por ser um equipamento naturalmente propício ao estudo da fluidodinâmica, angaria bastante popularidade no meio acadêmico. Nota-se atualmente que grande parte dos trabalhos publicados em periódicos sobre leito de jorro utiliza CFD de alguma forma. Batista (2017) avaliou o impacto da massa de sólidos e do bocal de alimentação de ar ao comportamento fluidodinâmico em transferência de calor de um leito de jorro cônico com sementes de sorgo. Para isto, utilizou a abordagem Euler-Euler na reprodução de um equipamento existente no Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química de São Carlos, comparando os resultados obtidos a dados experimentais. Na simulação, utilizou-se a suite *Ansys* de programas de CFD, obtendo resultados coerentes em uma malha bidimensional com eixo de simetria.

O mercado atual conta com uma ampla gama de *softwares* de CFD, que variam em termos de aplicabilidade, ênfase em fenômenos específicos como transferência de calor ou massa ou requisitos computacionais de uso.

Os programas *Autodesk CFD* e o *Ansys CFD*, pertencentes respectivamente à *Autodesk, Inc.* e à *Ansys, Inc.*, são menções notórias por possuírem relativa facilidade de uso e abrangerem todo o processo de criação de malha e simulação numérica. No entanto, os custos associados ao licenciamento anual de uso destes pacotes podem representar uma barreira ao seu uso para fins acadêmicos ou comerciais em pequena e média escala, motivando a divulgação e utilização de alternativas de código aberto.

2.4 OPENFOAM

Criado por Henry Weller em 1989, o OpenFOAM, inicialmente conhecido apenas por FOAM, é um *software* de código aberto para CFD distribuído em 2004 sob a Licença Pública Geral GNU com versões para Linux, macOS e Windows. Isto significa que qualquer usuário pode acessar e utilizar *software* de forma integral de forma completamente gratuita. Adicionalmente, qualquer usuário tem acesso ao código-fonte e liberdade, bem como

respaldo legal, para contribuir ao projeto de uma série de formas, seja através da criação de rotinas específicas do programa ou da integração com outros *softwares* livres ou de licença comercial. A organização responsável por concentrar os esforços de desenvolvimento do projeto, *OpenFOAM Foundation*, é uma entidade sem fins lucrativos, e todo o financiamento envolvido é feito com base em doações da comunidade e repassado diretamente aos esforços de manutenção e expansão da plataforma. O projeto conta com uma ampla comunidade de usuários e fóruns de discussão ativa sobre a resolução de problemas, guias de uso e sugestões ou implementações de programas ou rotinas adicionais ao código-base.

O pacote OpenFOAM é executado diretamente através do terminal do sistema operacional e inclui uma série de algoritmos numéricos baseados nos fundamentos de CFD. Além disso, conta com uma ferramenta de pós-processamento denominada *ParaView*, um projeto similar de código aberto que foca em renderização 3D e em facilidade de uso em sua interface. Os dados de simulação são gerados através da escrita de arquivos em um diretório determinado pelo usuário e posteriormente lidos pela ferramenta de pós-processamento, sendo possível visualizar a malha criada, gerar gráficos correlacionando variáveis, vistas 3D ou cortes na malha, animações 3D para trechos pré-estabelecidos de tempo entre outros.

Por exigir um certo grau de familiaridade com programação, o pacote OpenFOAM não é considerado amigável a usuários-fim. De forma a divulgar a ferramenta e ampliar a base de usuários, uma série de guias independentes ou de organizações especializadas em CFD cria e publica manuais cobrindo primeiros passos, pontos de atenção e exemplos. Jordi Casacuberta, PhD em Aerodinâmica Numérica pela Delft University of Technology, criou uma série de tutoriais no website The Foam House, onde lança mão de casos-base incluídos no pacote OpenFOAM e explica peculiaridades do sistema a usuários não familiarizados.

Um ponto particular do OpenFOAM está na complexidade do sistema de geração de malhas uma vez que, por definição, todas as células são consideradas hexaédricas e precisam de uma declaração individual e perfeitamente coerente do posicionamento de seus vértices e blocos. Para malhas muito complexas, isto pode ser inviável; para contornar esta dificuldade, a comunidade vem desenvolvendo estratégias de importação de malhas geradas em outros programas como o *Gmsh*, gerador de malha de elementos finitos criado em código aberto, ou o *Meshing*, programa do pacote *Ansys* com a mesma função.

Não obstante os desafios mencionados, verifica-se uma grande adesão de usuários que empregam o OpenFOAM na produção acadêmica. Uma série de universidades de

engenharia adota, inclusive, o *software* em alguns de seus cursos de CFD, a exemplo da sueca Chalmers University of Technology, que oferece um programa de pós-doutorado em CFD exclusivamente em código aberto. Dito isto e devido às dificuldades acima mencionadas na geração de malha, nota-se uma tendência à adoção de malhas cúbicas ou de geometria altamente simplificada no estudo de fenômenos de transporte. A seguir listam-se alguns exemplos de uso do OpenFOAM ou outras alternativas em código aberto para simulação de leitos de jorro ou fluidizados em estudos e publicações recentes.

O estudo experimental de Zhang et al. (2016) para um leito de jorro pseudo-bidimensional, mencionado anteriormente, foi avaliado por uma série de estudos sequenciais no campo da CFD, no intuito de validar diferentes modelos. Hosseini et al. (2016) utilizaram a rotina de CFD de código aberto desenvolvida pelo National Energy Technology Laboratory, MFIX-CFD, para replicar o experimento, concluindo que os resultados das simulações são sensíveis aos valores escolhidos para o coeficiente de restituição, modelos de arraste e tensões friccionais. Posteriormente, Hosseini et al. (2015) replicaram o experimento utilizando o modelo Euler-Euler, ou *Two-Fluid Model* (TFM), concluindo que o modelo tende a superestimar a velocidade dos sólidos e a altura da fonte durante o jorro estável. Adicionalmente, concluiu-se que a aproximação pseudo-bidimensional de um leito de jorro é inadequada para representar os dados experimentais replicados, uma vez que os planos frontal e traseiro do equipamento têm efeito significativo na fluidodinâmica representada.

Mahmoodi, Hosseini e Ahmadi (2019) também replicaram o experimento de Zhang et al. (2016) em uma abordagem pseudo-bidimensional para simular um leito de jorro com partículas grosseiras de cerca de 6 mm utilizando o acoplamento CFD-DEM entre os *softwares* OpenFOAM e LIGGGHTS, sendo este último um projeto separado em código aberto englobando a simulação via DEM. Neste método, observa-se que a análise de partículas pelo método CFD-DEM acarreta em grande custo computacional. Como solução, adotou-se uma malha pouco refinada, com 2964 células hexaédricas. Não obstante, foi obtido um bom grau de precisão entre simulação e dados experimentais para parâmetros como queda de pressão, vetores de velocidade e velocidade da partícula.

Li, Li e Liu (2019) utilizaram o *software* ao estudar o efeito do tamanho de célula e do modelo de arraste utilizado sobre o comportamento de partículas em um leito de jorro utilizando o modelo de partículas discretas (DPM), concluindo que o modelo de Van der Hoef et al. (2005) retornou resultados mais precisos para a interação gás-partícula.

Os estudos mencionados nesta revisão bibliográfica providenciaram amplo referencial

teórico para o desenvolvimento deste trabalho. Dos tópicos cobertos, nota-se que é de particular importância a escolha adequada dos parâmetros fluidodinâmicos e da modelagem matemática, bem como a elaboração de uma malha suficientemente refinada, para a obtenção de bons resultados da simulação em relação aos dados experimentais.

3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os conceitos e equações descritos a seguir foram adaptados de ANSYS (2011) e ROACHE (1994), e fornecem a base tanto para os cálculos envolvidos na escolha da malha computacional quanto para as rotinas executadas nas simulações de ambos os *softwares*.

3.1 MALHA COMPUTACIONAL (PROCEDIMENTO GCI)

Como mencionado na seção anterior, a convergência e qualidade dos resultados simulados são fortemente dependentes das características da malha computacional. Uma malha excessivamente refinada, com pequeno tamanho de célula, pode contribuir na precisão dos resultados, mas a custo de um tempo de processamento inviavelmente grande; da mesma forma, uma malha excessivamente grosseira pode levar a divergências na simulação ou a resultados muito distantes da realidade. O *Grid Convergence Index* ou GCI, método proposto por Roache (1994), utiliza a teoria de extrapolação de Richardson para estimar a ordem de convergência e verificar a proximidade da solução gerada por uma dada malha em relação à resposta teórica assintótica, ou seja, a solução extrapolada para o cenário em que o número de células da malha tende ao infinito.

Pode-se calcular o GCI a partir da comparação entre duas malhas com diferentes graus de refinamento; no entanto, recomendam-se três malhas de refinamento progressivamente maior de forma a estimar a ordem de convergência com maior precisão (SLATER, 2008). No procedimento descrito a seguir, f_1 , f_2 e f_3 representam os valores da variável de interesse para as malhas refinada, intermediária e grosseira, respectivamente, enquanto N_1 , N_2 e N_3 descrevem o número total de elementos em cada malha.

Inicialmente, obtêm-se as razões de refinamento r_{12} e r_{23} entre as malhas através das equações (1) e (2):

$$r_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$r_{23} = \left(\frac{N_2}{N_3} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

As diferenças entre a resposta de cada malha para a variável de interesse e_{12} e e_{23} são dadas pelas equações (3) e (4):

$$e_{12} = f_2 - f_1 \quad (3)$$

$$e_{23} = f_3 - f_2 \quad (4)$$

A seguir, obtém-se a ordem do método de discretização p através do método iterativo descrito pela equação (5) e com a estimativa inicial de :

$$p = \omega \rho + (1 - \omega) \frac{\ln(\beta)}{\ln(r_{12})} \quad (5)$$

onde $\omega = 0,5$ e $\beta = \frac{(r_{12}^p - 1)e_{23}}{(r_{23}^p - 1)e_{12}}$, e a estimativa inicial ρ é calculada por

$$\rho = \frac{\ln\left(\frac{e_{23}}{e_{12}}\right)}{\ln(r_{12})} \quad (6)$$

O processo iterativo pode ser considerado convergente para valores tais que $\left| \frac{p-\rho}{p} \right| < 10^{-5}$ (ELSAYED e LACOR, 2011).

Utiliza-se a extrapolação de Richardson para estimar o valor f^{approx} quando o tamanho característico da célula tende a zero, de acordo com as equações (7) e (8) abaixo:

$$f_{12}^{approx} = f_1 + \frac{(f_1 - f_2)}{(r_{12}^p - 1)} \quad (7)$$

$$f_{23}^{approx} = f_2 + \frac{(f_2 - f_3)}{(r_{23}^p - 1)} \quad (8)$$

Os desvios relativos ϵ_{12} e ϵ_{23} entre as malhas são então calculados pelas Equações (9) e (10), respectivamente.

$$\epsilon_{12} = \left| \frac{f_2 - f_1}{f_1} \right| \quad (9)$$

$$\epsilon_{23} = \left| \frac{f_3 - f_2}{f_2} \right| \quad (10)$$

É necessário obter o desvio relativo entre a resposta teórica f^{aprox} e a resposta da malha mais fina entre as duas comparadas, como descrevem as equações (11) e (12) abaixo:

$$\epsilon_{12}^{aprox} = \left| \frac{f_{12}^{aprox} - f_1}{f_{12}^{aprox}} \right| \quad (11)$$

$$\epsilon_{23}^{aprox} = \left| \frac{f_{23}^{aprox} - f_2}{f_{23}^{aprox}} \right| \quad (12)$$

Obtém-se, enfim, o GCI, ou erro, para cada uma das malhas por meio das equações (13), (14) e (15) descritas abaixo (ROACHE, 1994):

$$GCI_{12} = \frac{1,25\epsilon_{12}}{(r_{12}^p - 1)} \quad (13)$$

$$GCI_{23} = \frac{1,25\epsilon_{23}}{(r_{23}^p - 1)} \quad (14)$$

$$GCI_3 = 1,25 \frac{\epsilon_{32} r_{23}^p}{(r_{23}^p - 1)} \quad (15)$$

Por fim, de modo a validar a malha escolhida e verificar se a solução está no intervalo assintótico ($\alpha \cong 1$), utiliza-se a equação (16):

$$\alpha = \frac{r_{12}^p GCI_{12}}{GCI_{23}} \quad (16)$$

3.2 ESCOAMENTO MULTIFÁSICO

Como mencionado anteriormente, a abordagem Euler-Euler utilizada neste trabalho interpreta as diferentes fases no escoamento como fluidos interpenetrantes entre si. Utilizando o conceito de fração volumétrica de fase, realizam-se balanços individuais para cada fase declarada, aplicando as leis de conservação de massa e quantidade de movimento. Segundo este conceito, o volume ocupado por uma dada fase q é expresso por

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (17)$$

onde α_q é a fração volumétrica da fase q , e tal que:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (18)$$

Para o presente trabalho, pode-se considerar nula a transferência de massa entre fases e a ausência de reações químicas. Desta forma, definindo a fase primária (fluido) como f e a fase secundária (granular) como s , temos as equações de continuidade individuais para cada fase na seguinte forma simplificada:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (fase\ fluida) \quad (19)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (fase\ sólida) \quad (20)$$

onde:

\vec{v}_q - velocidade da fase q ;

ρ_q - massa específica da fase q .

No formato das equações 19 e 20, o primeiro termo representa o acúmulo específico de massa, enquanto o segundo termo representa o fluxo convectivo de massa.

Quanto à conservação de quantidade de movimento, temos os seguintes balanços individuais para cada fase:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = & -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} \\ & + K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (fase\ fluida) \end{aligned} \quad (21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} - K_{fs}(\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (\text{fase s\u00f3lida}) \quad (22)$$

onde:

$\bar{\tau}_q$ - tensor das tens\u00f5es ($q=f,s$);

\vec{v}_{fs} - velocidade relativa entre fases ($\vec{v}_f - \vec{v}_s$);

p - press\u00e3o compartilhada pelas fases;

p_s - press\u00e3o da fase s\u00f3lida;

\vec{g} - vetor de campo gravitacional;

K_{fs} - coeficiente de troca de quantidade de movimento entre fases.

Da esquerda \u00e0 direita, os termos significam, em sequ\u00eancia: a taxa de ac\u00famulo de quantidade de movimento; a transfer\u00eancia de quantidade de movimento por convec\u00e7\u00e3o; o efeito do gradiente de press\u00e3o sobre o escoamento; a transfer\u00eancia de quantidade de movimento pelo mecanismo molecular; a a\u00e7\u00e3o da for\u00e7a gravitacional; a for\u00e7a de intera\u00e7\u00e3o entre as fases; e as for\u00e7as envolvidas na transfer\u00eancia de quantidade de movimento atrelada \u00e0 troca de massa entre fases.

Este trabalho considera a gravidade como \u00fanica for\u00e7a de campo atuante, sem efeito de for\u00e7as externas. Tamb\u00e9m se despreza a for\u00e7a de ascens\u00e3o devido ao seu impacto desprez\u00edvel nos escoamentos g\u00e1s-s\u00f3lido frente \u00e0 for\u00e7a de arraste. Uma vez que a densidade da fase secund\u00e1ria \u00e9 muito superior \u00e0 prim\u00e1ria, o efeito das for\u00e7as de massa virtual tamb\u00e9m s\u00e3o considerados nulos. Por outro lado, para escoamentos em leitos de jorro, \u00e9 de fundamental import\u00e2ncia contabilizar o efeito de for\u00e7as de arraste devido \u00e0 tend\u00eancia do sistema em apresentar altos gradientes de fra\u00e7\u00e3o volum\u00e9trica, principalmente nas regi\u00f5es do canal de jorro e da regi\u00e3o anular do sistema (BATISTA, 2021).

3.2.1 For\u00e7as de Arraste Entre Fases

Dentre as possibilidades de modelagem, foi escolhido o modelo de Gidaspow et al. (1992) devido \u00e0 sua versatilidade e aplicabilidade a sistemas com grandes varia\u00e7\u00f5es de fra\u00e7\u00f5es volum\u00e9tricas de fase. O modelo transiciona entre a correla\u00e7\u00e3o de Wen e Yu (1966) para fra\u00e7\u00f5es menores ou iguais a 0,8 e a equa\u00e7\u00e3o de Ergun para fra\u00e7\u00f5es maiores que 0,8, conforme as

equações 23 e 24 abaixo:

$$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65}, \quad \alpha_f > 0,8 \quad (23)$$

$$K_{sf} = K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \quad \alpha_f \leq 0,8 \quad (24)$$

O coeficiente de arraste C_D , presente na equação 23, é calculado por:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_f Re_s)^{0,687} \right] \quad (25)$$

onde o número de Reynolds para a fase sólida (Re_s) é definido por:

$$Re_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (26)$$

3.2.2 Tensões de Viscosidade

O equacionamento para as tensões viscosas utiliza o modelo Newtoniano para cada uma das fases, segundo as equações (26) e (27):

$$\bar{\tau}_f = \alpha_f \mu_f (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) + \alpha_f \left(\lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f \right) \nabla \cdot \vec{v}_f \bar{I} \quad (fase\ fluida) \quad (27)$$

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left(\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (fase\ sólida) \quad (28)$$

onde:

μ_q - viscosidade da fase q (s,f);

λ_q - viscosidade *bulk* da fase q (s,f);

\bar{I} - tensor unitário

Alguns parâmetros, como viscosidade *bulk*, são determinados pela utilização do conceito da teoria cinética granular.

3.2.3 Teoria Cinética Granular

Descrita em detalhes por Lun et al. (1984), a teoria cinética granular introduz os conceitos de viscosidade e pressão dos sólidos, bem como temperatura granular, em uma analogia à teoria cinética dos gases. Para a CFD, este conceito é particularmente útil na abordagem Euleriana para a fase granular, uma vez que possibilita o acoplamento pressão-velocidade na resolução da pressão. Por esta razão é importante notar que, apesar dos balanços fenômenos de transferência de calor não terem sido analisados dentro do escopo deste trabalho, as variáveis pertinentes à teoria cinética granular ainda são calculadas nas iterações numéricas das simulações.

A temperatura granular θ_s é uma variável auxiliar, associada por definição à flutuação c da velocidade da fase sólida como indicado na equação 29:

$$\theta_s = \frac{1}{3} (c^2) \quad (29)$$

A equação da conservação da temperatura granular é representada pela equação 30:

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{fs} \quad (30)$$

onde:

$(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$ - termo de geração de energia pelo tensor tensão da fase sólida;

k_{θ_s} - coeficiente de difusão da temperatura granular;

γ_{θ_s} - dissipação de energia ocasionada pelas colisões;

ϕ_{fs} - troca de energia entre a fase sólida e fluida.

Gidaspow et al. (1992) propõe uma equação para o coeficiente de difusão k_{θ_s} conforme a equação 31 abaixo:

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{(\theta \pi)}}{384(1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (31)$$

$$+2\alpha_s^2 \rho_s d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}}$$

A dissipação de energia devido às colisões pode ser descrita pela expressão de Lun et al. (1984) descreve o termo de dissipação de energia por colisões γ_{θ_p} segundo a equação (32) abaixo:

$$\gamma_{\theta_p} = \frac{12(1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (32)$$

onde:

e_{ss} - coeficiente de restituição

$g_{0,ss}$ - função de distribuição radial

Gidaspow et al. (1992) propõe a seguinte equação para o termo ϕ_{qp} que descreve a transferência de energia cinética por efeito das flutuações aleatórias de velocidade das partículas para a fase fluida:

$$\phi_{qp} = -3K_f s \theta_s \quad (33)$$

Lun et al. (1984) introduz o conceito de viscosidade *bulk*, parâmetro que descreve efeitos de compressibilidade da fase particulada:

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_s) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (34)$$

Para o cálculo da viscosidade *bulk*, é necessário lançar mão do coeficiente de restituição e_s que, por sua vez, depende do grau elástico do choque entre partículas. Esta elasticidade depende da função de distribuição radial g_0 descrita pela equação (34):

$$g_0 = \frac{s + d_s}{s} \quad (35)$$

onde s corresponde à distância entre as partículas.

Observando a equação (35), nota-se que para valores muito baixos de empacotamento $s \rightarrow \infty$; logo, $g_0 \rightarrow 1$. Da mesma forma, à medida que a fase sólida se aproxima do limite de

empacotamento, $s \rightarrow 0$ e $g_0 \rightarrow \infty$. Na literatura são encontrados diferentes valores para g_0 ; neste trabalho, utilizou-se a proposta por Lun et al. (1984):

$$g_{0,ss} = \left(1 - \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}}\right)^{-2,5\alpha_{s,max}} \quad (36)$$

onde $\alpha_{s,max}$ corresponde ao fator de empacotamento máximo do leito.

3.2.4. Pressão e viscosidade da fase sólida

Quando há a possibilidade de regime compressível em escoamentos granulares, deve-se calcular a pressão da fase sólida individualmente e considerá-la no balanço quantidade de movimento para a fase granular sob o termo ∇p_s . Lun et al. (1984) propõe a seguinte equação para o termo de pressão sólida:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (37)$$

onde há, respectivamente, um termo cinético e um termo relativo à colisão de partículas.

O termo de tensão de cisalhamento da fase granular considera a viscosidade molecular e a viscosidade *bulk*, esta última mencionada anteriormente como parte da teoria cinética granular e associada às colisões entre partículas. É considerada a soma das contribuições individuais dos efeitos de colisão, cinéticos e de atrito, termos respectivamente enunciados conforme a equação 38:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (38)$$

Os primeiros dois termos à direita da igualdade, associados à colisão e ao efeito cinético, foram equacionadas por Gidaspow et al. (1992) de acordo com as equações 39 e 40:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (39)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96\alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss})\right]^2 \quad (40)$$

É importante notar que, para regiões em fase densa onde o fator de empacotamento se aproxima do limite máximo, os efeitos das colisões instantâneas são desprezíveis frente às

tensões friccionais entre partículas em contato. Para estes casos, em vez da teoria cinética granular acima mencionada, utilizou-se a equação de Schaeffer (1987):

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \text{ sen } \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (41)$$

onde:

ϕ - ângulo de fricção interna;

I_{2D} - segunda invariante do tensor de tensões.

3.3 TURBULÊNCIA

Dadas as altas velocidades aplicadas e o caráter da operação do leito de jorro, torna-se fundamental contabilizar o efeito de turbulência na modelagem matemática. Para isto, utilizou-se o modelo k - ε padrão para a fase dispersa, recomendável em situações onde há baixa concentração da fase secundária e o efeito do choque entre partículas sobre a distribuição aleatória das partículas é pequeno frente à turbulência da fase primária. A modelagem matemática utilizada para descrever a turbulência da fase dispersa parte da teoria de dispersão de partículas proposta por Hinze (1975).

3.3.1. Turbulência na Fase Fluida

A equação 42 determina o tensor de tensões de Reynolds utilizado no balanço de quantidade de movimento realizado para a fase fluida:

$$\bar{\tau}_f = -\frac{2}{3}(\alpha_f \rho_f \kappa_f + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} \nabla \cdot \vec{v}_f) \bar{I} + \alpha_f \rho_f \mu_{f,t} (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) \quad (42)$$

onde κ_f representa a propriedade característica de turbulência κ e $\mu_{f,t}$ representa a viscosidade turbulenta, calculada por meio da equação 43:

$$\mu_{f,t} = \rho_f C_\mu \frac{\kappa_f^2}{\varepsilon_f} \quad (43)$$

onde ε_f corresponde à propriedade característica ε da turbulência e C_μ é o parâmetro adimensional fixo da turbulência ($C_\mu = 0,09$).

As equações X e Y abaixo descrevem os efeitos da turbulência na fase fluida:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \kappa_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \kappa_f) &= \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_\kappa} \nabla \kappa_f \right) \\ + \alpha_f G_{\kappa,f} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + \alpha_f \rho_f \prod_{\kappa,f} \end{aligned} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \varepsilon_f) &= \nabla \cdot \left(\alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_f \right) \\ + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} (C_1 G_{\kappa,f} - C_2 \rho_f \varepsilon_f) + \alpha_f \rho_f \prod_{\varepsilon,f} \end{aligned} \quad (45)$$

onde:

$\prod_{\kappa,f}$ - influência da fase dispersa na propriedade κ fase fluida;

$\prod_{\varepsilon,f}$ - influência da fase dispersa na propriedade ε fase fluida, e

$G_{\kappa,f}$ - termo de geração de energia cinética turbulenta.

Estes termos são respectivamente obtidos pelas equações (46), (47) e (48) abaixo:

$$\prod_{\kappa,f} = \frac{K_{fs}}{\alpha_f \rho_f} (\kappa_{fs} - 2\kappa_f + \vec{v}_{fs} \cdot \vec{v}_{dr}) \quad (46)$$

$$\prod_{\varepsilon,f} = C_3 \frac{\varepsilon_f}{\kappa_f} \prod_{\kappa,f} \quad (47)$$

$$G_{\kappa,f} = \mu_{f,t} \left(\nabla \vec{v}_f + (\nabla \vec{v}_f)^T \right) : \nabla \vec{v}_f \quad (48)$$

onde:

K_{fs} - coeficiente de troca de quantidade de movimento entre fases;

κ_{fs} - parâmetro de covariância entre as velocidades de flutuação das fases;

\vec{v}_{fs} - velocidade relativa;

\vec{v}_{dr} - velocidade *drift*;

C_3 - parâmetro adimensional fixo da turbulência ($C_3 = 1,3$).

3.3.2. Turbulência na Fase Granular

Convenciona-se utilizar parâmetros característicos de tempo para caracterizar a interação entre os movimentos de oscilação das partículas. O tempo característico $\tau_{F,sf}$ correspondente à entrada da partícula no vórtice pelo movimento contínuo do fluido é descrito pela equação 49 abaixo:

$$\tau_{F,sf} = \alpha_s \rho_s K_{fs}^{-1} \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} + C_V \right) \quad (49)$$

onde C_V corresponde ao parâmetro adimensional da turbulência ($C_V=0,5$).

O intervalo de tempo de interação entre vórtice e partícula é definido pela equação 50 abaixo:

$$\tau_{t,sf} = \frac{\tau_{t,s}}{\sqrt{(1 + C_\beta \xi^2)}} \quad (50)$$

onde:

$$\xi = \frac{|\vec{v}_{fs}| \tau_{t,s}}{L_{t,f}} \quad (51)$$

$$C_\beta = 1,8 - 1,35 \cos^2 \theta \quad (52)$$

Na equação 52, θ indica o ângulo entre os vetores velocidade média da partícula e velocidade relativa. A razão entre os dois parâmetros característicos de tempo é definida por:

$$\eta_{sf} = \frac{\tau_{t,fs}}{\tau_{F,fs}} \quad (53)$$

Esta razão entre parâmetros é utilizada nas estimativas das quantidades turbulentas, coeficientes de dispersão e energia cinética turbulenta para a fase dispersa definidas por Simonin e Viollet (1990). As correlações a seguir apresentam estas estimativas:

$$\kappa_s = \kappa_f \left(\frac{b^2 + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (54)$$

$$\kappa_{sf} = 2\kappa_f \left(\frac{b + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (55)$$

$$D_{t,sf} = \frac{1}{3} \kappa_{sf} \tau_{t,sf} \quad (56)$$

$$D_s = D_{t,sf} + \left(\frac{2}{3} \kappa_s - b \frac{1}{3} \kappa_{sf} \right) \tau_{F,sf} \quad (57)$$

$$b = (1 + C_V) \left(\frac{\rho_s}{\rho_f} + C_V \right)^{-1} \quad (58)$$

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção será subdividida em três partes: a descrição do experimento em laboratório, onde foram gerados os dados de queda de pressão em função da velocidade no equipamento real; a construção de malhas de diferentes graus de refinamento e a validação da malha escolhida para a simulação via método GCI; e, finalmente, a simulação da fluidodinâmica do leite de jorro a ser comparada com os dados experimentais e a uma simulação análoga utilizando a mesma malha computacional, mas calculada com *software* comercial.

4.1 EXPERIMENTO

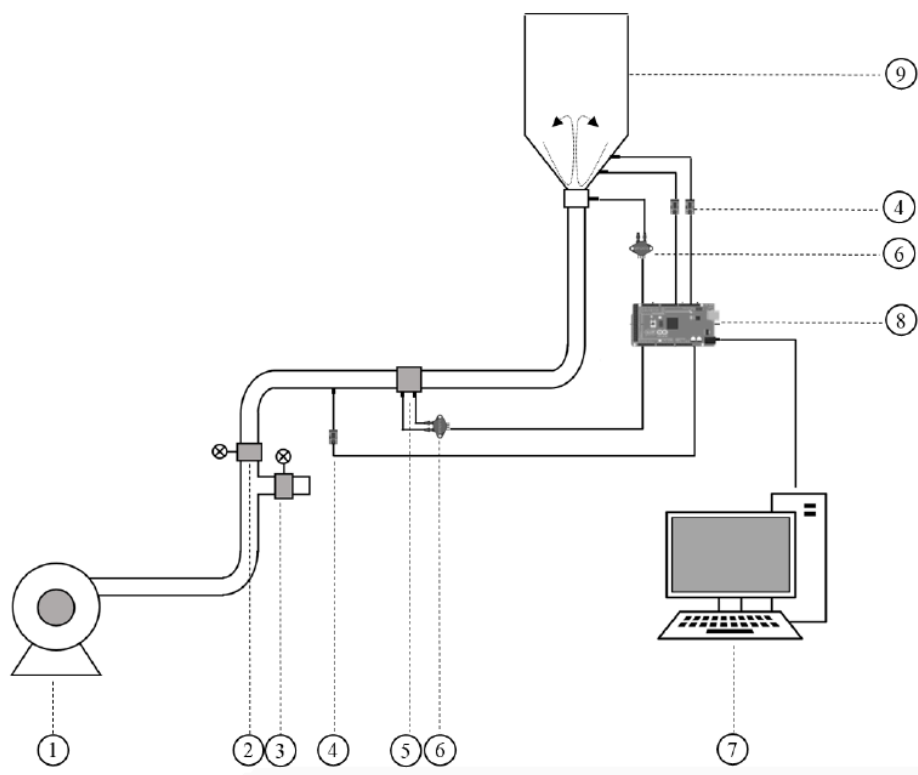
Para a etapa experimental deste trabalho, utilizou-se uma unidade experimental do Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos.

4.1.1 Equipamento e Materiais Utilizados

A Figura 2 a seguir representa a unidade experimental utilizada neste trabalho. Utilizou-se um soprador [1] da marca Siemens, com potência efetiva de 0,36 hp, para a alimentação de ar. A vazão é ajustada por meio de uma válvula principal [2] e uma válvula auxiliar de *by-pass* [3], sendo estimada indiretamente através da queda de pressão medida em uma placa de orifício

[5]. A queda de pressão é medida por um sensor de pressão MPX5010DP, NPX/Freescale® [6], instalado após a tela de retenção de partículas. Os dados coletados pelos sensores são transmitidos a um computador acoplado ao sistema [7] por meio de um microcontrolador Mega 2560 R3, Arduino® [8], intermediado pela interface *add-in* Parallax® Data Acquisition tool (PLX-DAQ). Foram obtidos 9 valores por segundo, armazenados em uma planilha do *software* Microsoft Excel por meio de uma rotina desenvolvida no *software* Arduino IDE 1.8.5.

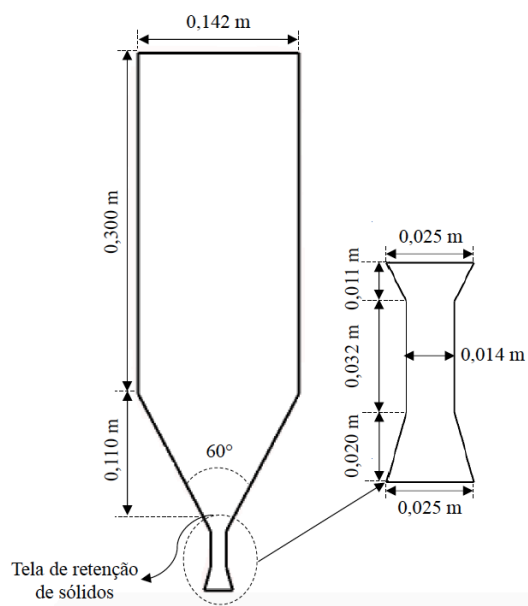
Figura 2 – Esquema da unidade experimental utilizada no trabalho. (1) soprador; (2) válvula principal; (3) válvula by-pass; (4) termopar (não utilizado neste trabalho); (5) placa de orifício; (6) sensor de pressão; (7) computador; (8) microcontrolador Arduino; (9) leito de jorro.



Fonte: BATISTA (2021).

O leito de jorro utilizado no trabalho apresenta base cônica e foi construído em material acrílico. Para melhor distribuição do na entrada do leito, empregou-se um bocal tipo Venturi. Toda a tubulação da unidade experimental é construída em PVC de 2,54cm (1 polegada). As dimensões de ambas as partes do leito de jorro estão relatadas na figura 3 a seguir.

Figura 3 – Dimensões do leito de jorro utilizado no experimento.



Fonte: BATISTA (2021).

4.1.2 Metodologia

O experimento foi conduzido de acordo com a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974), que consiste em medir e correlacionar os valores de queda de pressão obtidos no equipamento a faixas crescentes de velocidades, partindo do regime de leito estático até o jorro estável e, posteriormente, reduzindo a velocidade do jorro estável até o leito fixo. Nesta última parte do experimento também se determina a velocidade de mínimo jorro (V_{MJ}), valor relativo à última faixa de velocidades obtida antes do fechamento do leito.

A massa de 500g de sorgo, correspondente a aproximadamente de 21370 partículas, foi pesada e alimentada ao leito, onde preencheu toda a base cônica. Aferiu-se a medida experimental da altura do leito estático e aterrou-se a ligação elétrica do equipamento de forma a remover o efeito estático do experimento. Não foi necessário realizar o experimento com o jorro vazio ("ensaio do branco"), uma vez que a tomada de pressão está localizada após a tela de retenção de sólidos. A válvula de vazão de ar foi aberta progressivamente em intervalos similarmente espaçados, resultando em 15 pontos consecutivos com diferentes vazões onde, após notar-se um comportamento estável para a faixa de velocidade estabelecida, foram aferidos valores de velocidade e queda de pressão. Após atingir o máximo de vazão permitido pelo equipamento, realizou-se a volta do experimento, aferindo outros 16 pontos de velocidade e queda de pressão de forma análoga com fechamentos progressivos da válvula. Buscou-se aferir mais pontos próximos à região de mínimo jorro, dado o caráter sensível da transição entre

comportamentos do leito ao longo do experimento. Os pontos foram aferidos em triplicata.

4.2 GERAÇÃO, ESCOLHA E VALIDAÇÃO DA MALHA COMPUTACIONAL

4.2.1 Infraestrutura Computacional e *Softwares* Utilizados

O presente trabalho busca avaliar as sensibilidades e limitações do programa OpenFOAM frente à performance de *softwares* de licença comercial. Visando obter a comparação mais direta possível, as malhas computacionais foram geradas no *software Meshing* e exportadas ao OpenFOAM via rotina de importação nativa ao programa.

Para a geração da malha, foi utilizado um computador de mesa com processador Intel® Core™ i7 4,00 GHz, com 8 núcleos de processamento, e frequência-base 4.00GHz, placa de vídeo Nvidia GeForce GTX 750 Ti, com sistema operacional Windows 7 (64-bit).

Para as simulações de escoamento de ar utilizadas na etapa de escolha e validação da malha, foi utilizado um computador portátil de modelo Dell Inspiron, com processador Intel® Core™ i3-4005U, com 4 núcleos de processamento e frequência-base 1.70GHz, placa de vídeo Intel® Haswell Mobile, com sistema operacional Linux Ubuntu 18.04.2 LTS 64-bit.

4.2.2 Geração das Malhas

Foram criadas três malhas computacionais tridimensionais, estruturadas utilizando o formato "*O-Grid*" para a seção circular do leito de jorro, variando o tamanho da célula em relação ao diâmetro da partícula. As malhas denominadas "AF" na tabela abaixo são as geradas no programa *Meshing* e utilizadas nas simulações do *software* Ansys Fluent, e as denominadas "OF" denotam as suas respectivas importações no *software* OpenFOAM, enquanto o sufixo "DP" denota a relação entre o tamanho da célula e o tamanho da partícula.

Tabela 1 – Malhas computacionais geradas no estudo.

Malha	Espaçamento entre nós (m)	Número de Células
AF-2DP	0,003-0,006	90117
AF-2.5DP	0,003-0,0075	52164
AF-3DP	0,003-0,009	34560
OF-2DP	0,003-0,006	90117
OF-2.5DP	0,003-0,0075	52164
OF-3DP	0,003-0,009	34560

4.2.3 Escolha e Validação da Malha

Construídas e importadas as malhas, foram conduzidas simulações de escoamento de ar a velocidades próximas às experimentais no *software* OpenFOAM de forma a avaliar o

grau de precisão da variável-objetivo queda de pressão e o tempo de simulação decorrentes de cada malha. Utilizou-se como base a estrutura de caso "pitzDaily" presente nos tutoriais que fazem parte do pacote OpenFOAM.

Os detalhes das simulações de teste estão dispostos a seguir nas tabelas 2 e 3. É importante destacar que, mesmo especificando uma situação isotérmica e desativando o balanço de energia para as iterações, é necessário especificar todas as propriedades pedidas pelo OpenFOAM para o início da simulação.

Tabela 2 – Parâmetros e propriedades fluidodinâmicas do ar adotados às simulações de teste via método GCI.

Parâmetro	Descrição	Fonte	Valor
ρ_f	Massa específica ar	Çengel (2011)	1,204 kg m ⁻³
μ_f	Viscosidade ar	Çengel (2011)	1,825x10 ⁻⁵ kg m ⁻¹ s ⁻¹
$c_{p,f}$	Calor específico ar	Çengel (2011)	1007 J kg ⁻¹ K ⁻¹
k_f	Condutividade térmica ar	Incropera (2008)	0,0257 W m ⁻¹ K ⁻¹

Tabela 3 – Modelos e parâmetros de solução numérica adotados nas simulações de teste via método GCI.

Condições de Contorno (GCI)	Entrada: velocidade do ar fixa a 22 m/s no eixo Y (<i>fixedValue</i>). Saída: condição de pressão prescrita a 1 atm (<i>fixedValue</i>). Parede: velocidade nula (<i>fixedValue</i>).
Método de Solução	Acoplamento pressão-velocidade: PISO. Interpolação: linear Upwind (<i>Gauss linearUpwind</i>). Formulação Transiente: Implícita de 1ª ordem.
Modelo de Turbulência	<i>kOmegaSST</i> .
Passo no tempo	Variável, com o valor inicial de 0,00001 e ajustável pelo valor máximo definido para o número de Courant;
Courant Máximo	1
Nº máximo de iterações por passo	1000
Parâmetro de relaxação	Pressão: 0,7 Velocidade: 0,3

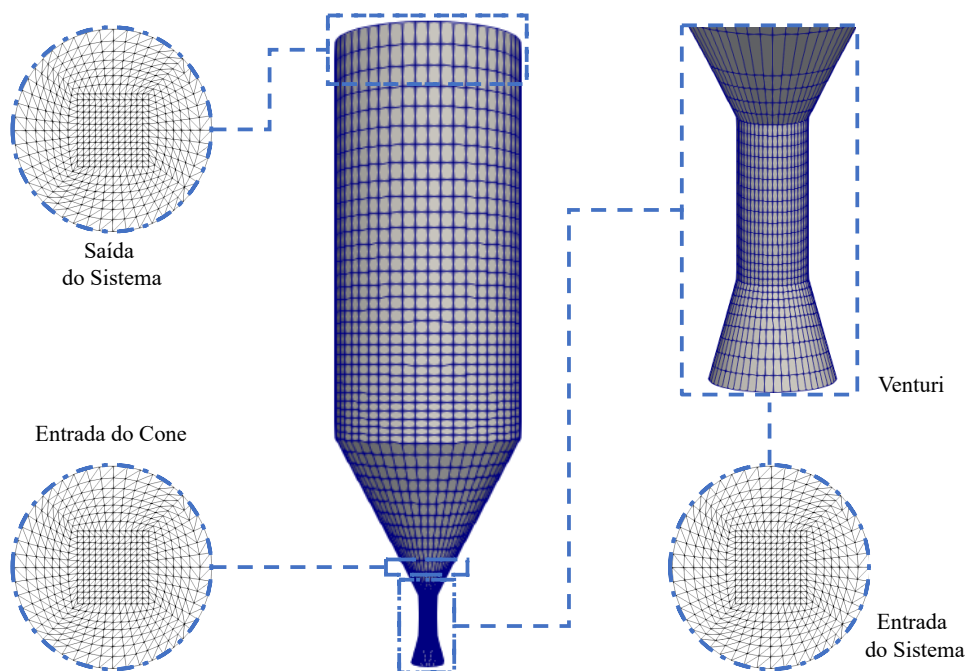
Os resultados desta etapa preliminar de simulações para cada malha estão dispostos a seguir na tabela 4. A variável queda de pressão do equipamento foi escolhida como base para o cálculo do GCI.

Tabela 4 – Resultados das simulações de teste via método GCI.

Malha	Número de Células	f^{aprox} ΔP (Pa)	Desvio (%)	Tempo de Simulação (h)
OF-2DP	90117		6,77	72,57
OF-2.5DP	52164	52,7	8,26	46,7
OF-3DP	34560		8,67	33,79

Observando os resultados acima dispostos verifica-se que as três malhas apresentaram desvios aceitáveis para a variável de interesse em relação à resposta teórica, mas que a malha OF-3DP, com menor número de células dentre as avaliadas, tem o benefício de um tempo de simulação consideravelmente menor. Desta forma, as malhas análogas AF-3DP e OF-3DP foram escolhidas para a etapa subsequente do trabalho, onde mudou-se a estrutura de caso e foram inseridas as partículas sólidas. A malha OF-3DP, bem como seus cortes horizontais, é demonstrada na figura 4 abaixo.

Figura 4 – Malha OF-3DP utilizada nas simulações do OpenFOAM.



Fonte: Acervo próprio.

4.3 SIMULAÇÃO DO LEITO DE JORRO VIA ABORDAGEM EULER-EULER

Definida a malha a ser utilizada para cada simulação, foram realizadas simulações considerando o aumento progressivo de vazão de ar e a presença de sementes de sorgo no leito,

partindo do regime de leito estático e seguindo até a desenvoltura do jorro estável plenamente desenvolvido. Visando a qualidade da comparação de dados, as simulações foram conduzidas em paralelo nos dois *softwares*, Ansys Fluent e OpenFOAM, em computadores de capacidade de processamento similar.

4.3.1 Ansys Fluent

No *software* Ansys Fluent, de licença comercial, as simulações foram conduzidas de forma a reproduzir a metodologia experimental, utilizando parâmetros e modelos baseados no trabalho feito por Batista (2021) para o mesmo equipamento; isto é, para a faixa experimental de velocidades de ar, foram realizados vários ensaios consecutivos utilizando a abordagem Euler-Euler de dois fluidos, variando a vazão de ar declarada na entrada, partindo do limite máximo permitido pelo equipamento e diminuindo progressivamente até o mínimo permitido pelo *software*. A simulação seguiu pelo tempo necessário para cada faixa de velocidade até que fosse atingido um regime pseudo-estacionário.

O pós-processamento das simulações foi realizado no respectivo ambiente do *software* Ansys Fluent. O computador de mesa utilizado para estas simulações possui processador Intel® Core™ i7 4,00 GHz, com 8 núcleos de processamento, e frequência-base 4.00GHz, placa de vídeo Nvidia GeForce GTX 750 Ti, com sistema operacional Windows 7 (64-bit).

As propriedades de fases, condições de contorno e modelos de solução numérica estão dispostos a seguir nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Parâmetros e propriedades fluidodinâmicas de fase adotados às simulações de leito de jorro com sementes de sorgo sacarino no software Ansys Fluent.

Parâmetro	Descrição	Fonte	Valor
α_s	Fração volumétrica de sólidos para o leito empacotado	Experimental	0,65
φ	Esfericidade	Experimental	0,79
d_s (mm)	Diâmetro sorgo	Experimental	3,13
ρ_s (kg m ⁻³)	Massa específica sorgo	Experimental	1197
$c_{p,s}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Calor específico sorgo	Brooker (1992)	1422,2
k_s (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Condutividade térmica sorgo	Brooker (1992)	0,0991
$e_{s,s}$	Coefficiente de Restituição	Béttega (2009)	0,9
ρ_f (kg m ⁻³)	Massa específica ar	Çengel (2011)	1,204
μ_f (kg m ⁻¹ s ⁻¹)	Viscosidade ar	Çengel (2011)	1,825x10 ⁻⁵
$c_{p,f}$ (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Calor específico ar	Çengel (2011)	1007
k_f (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Condutividade térmica ar	Incropera (2008)	0,0257

Fonte: Adaptado de Batista (2017).

Tabela 6 – Modelos e parâmetros de solução numérica adotados nas simulações de leito de jorro com sementes de sorgo sacarino no software Ansys Fluent.

Condições de Contorno (Fluidodinâmica)	Entrada do sistema: condição de velocidade do ar prescrita Posição de saída: condição de pressão prescrita. Parede: condição de não deslizamento para ambas as fases. Eixo de axissimetria foi incorporado ao sistema.
Método de Solução	Esquema de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE. Interpolação: Upwind de 1ª ordem. Formulação Transiente: Implícita de 1ª ordem.
Critério de Convergência	Equação continuidade e movimento: 1×10^{-4} .
Modelo de Turbulência	$k-\varepsilon$ padrão para fase dispersa.
Passo no tempo	0,0001
Número de passos no tempo	80 000
Nº máximo de iterações por passo	100
Parâmetro de relaxação	Quantidade de movimento: 0,7 Fração de volume: 0,5

Fonte: Adaptado de Batista (2021).

4.3.2 OpenFOAM

No *software* OpenFOAM, a estrutura do caso foi completamente revisada tomando como base o conjunto de arquivos "fluidisedBed" que faz parte dos tutoriais disponibilizados no pacote OpenFOAM. Os parâmetros fluidodinâmicos, condições de contorno, modelos de arraste e turbulência e ferramental de solução numérica foram declarados buscando a maior proximidade possível aos utilizados por Batista (2021) em sua simulação Euler-Euler do mesmo equipamento no *software* Ansys Fluent. Foi atingido alto grau de equivalência, uma vez que o OpenFOAM possui rotinas idênticas ou análogas para a maioria dos casos; no entanto, foram feitos alguns ajustes nos parâmetros de simulação e soluções numéricas de forma a viabilizar a convergência da simulação em um tempo factível. Uma diferença notável é a adoção de um passo de tempo variável atrelado ao número de Courant, indicador de convergência normalmente utilizado em CFD; esta função é nativa e programável no OpenFOAM, e auxilia consideravelmente na redução dos tempos de simulação sem abrir mão da estabilidade das iterações.

As simulações foram realizadas em caráter cumulativo, correndo pelo tempo necessário até que se observe um regime pseudo-estacionário de forma análoga às simulações realizadas

no Ansys Fluent; no entanto, as corridas seguiram no sentido inverso ao realizado no *software* comercial, partindo do limite mínimo permitido pela simulação e aumentando incrementalmente até que se atingisse o limite máximo do equipamento. Adicionalmente, realizou-se a volta do experimento reduzindo progressivamente a velocidade declarada, com o objetivo de determinar a velocidade de mínimo jorro e identificar se a ferramenta captura diferenças físicas entre regimes de vazão crescente e decrescente ao longo do processo.

O equipamento utilizado para as simulações do leito de jorro foi um computador portátil de modelo Dell Inspiron, com processador Intel® Core™ i3-4005U, com 4 núcleos de processamento e frequência-base 1.70GHz, placa de vídeo Intel® Haswell Mobile, com sistema operacional Linux Ubuntu 18.04.2 LTS 64-bit. Utilizou-se a versão 5.0 do pacote OpenFOAM para a simulação, enquanto o pós-processamento foi realizado com a ferramenta acoplada de código aberto ParaView 5.6.0, fornecido juntamente com a distribuição básica desta mesma versão do OpenFOAM.

Foram utilizadas as mesmas propriedades de fase relatadas na tabela 5 relatada anteriormente, sendo importante ressaltar que as propriedades térmicas, apesar de não terem sido utilizadas dada a desativação o balanço de energia para as iterações, foram declaradas por exigência da estrutura de caso no *software*. A tabela 7 a seguir relata o conjunto de condições de contorno e soluções numéricas utilizados nas simulações.

Tabela 7 – Modelos e parâmetros de solução numérica adotados nas simulações de leito de jorro com sementes de sorgo sacarino no software OpenFOAM.

Condições de Contorno (Fluidodinâmica)	Entrada: velocidade do ar no eixo Y declarada como valor fixo para diferentes faixas (<i>fixedValue</i>). Saída: condição de pressão prescrita a 1 atm (<i>fixedValue</i>). Parede: velocidade nula (<i>noSlip</i>).
Método de Solução	Acoplamento pressão-velocidade: PIMPLE. Interpolação: linear Upwind (<i>Gauss linearUpwind</i>). Formulação Transiente: Implícita de 1ª ordem.
Modelo de Turbulência	<i>k-ε</i> padrão para fase dispersa.
Passo no tempo	Variável, com o valor inicial de 0,00001 e ajustável pelo valor máximo definido para o número de Courant;
Courant Máximo	1
Nº máximo de iterações por passo	1000
Parâmetro de relaxação	Pressão: 0,7 Velocidade: 0,3

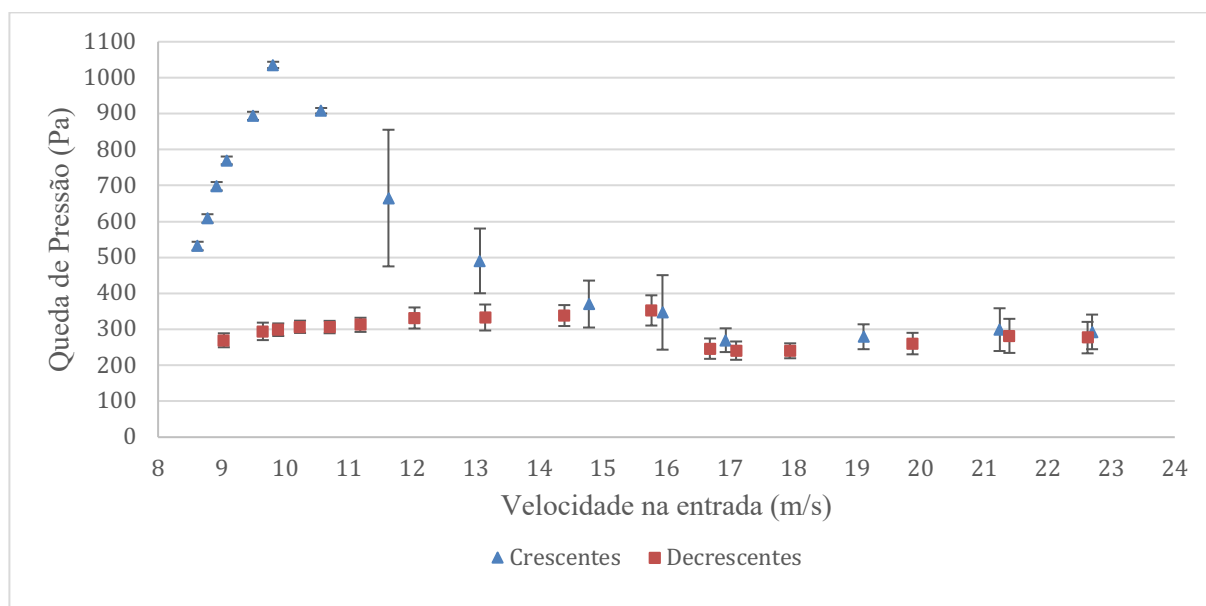
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na seção a seguir estão dispostos os resultados obtidos neste trabalho para as seguintes etapas, em ordem respectiva: processo de validação do modelo, análises fluidodinâmicas via experimento em laboratório, simulação conduzida no *software* Ansys Fluent e simulação equivalente no *software* OpenFOAM. Foram conduzidas comparações e discussões relevantes a cada aspecto das simulações.

5.1 EXPERIMENTAL

A figura 5 abaixo ilustra os pontos obtidos para o experimento realizado com 500g de sorgo sacarino na unidade experimental de acordo com a metodologia proposta por Mathur e Epstein (1974). O experimento foi realizado em triplicata; no entanto, dada a coesão dos dados obtidos e a reprodutibilidade do experimento, e visando facilitar a visualização dos comportamentos no gráfico, foram utilizados os valores médios com os respectivos desvios-padrão.

Figura 5 – Curva fluidodinâmica característica experimental para a massa de 500g de sorgo.



Fonte: Acervo próprio.

Observa-se um comportamento dentro do esperado, de acordo com o descrito por Mathur e Epstein (1974): partindo do leito estático, observa-se um aumento da queda de pressão proporcional ao aumento da vazão de gás. Verifica-se, também, que alguns pontos na região intermediária da curva de vazões crescentes apresentam maior desvio-padrão; isto se dá pela transição entre regimes de arco compacto, jato interno e jorro estabelecido. Após o rompimento do leito, nota-se uma diminuição na queda de pressão e estabilização do valor

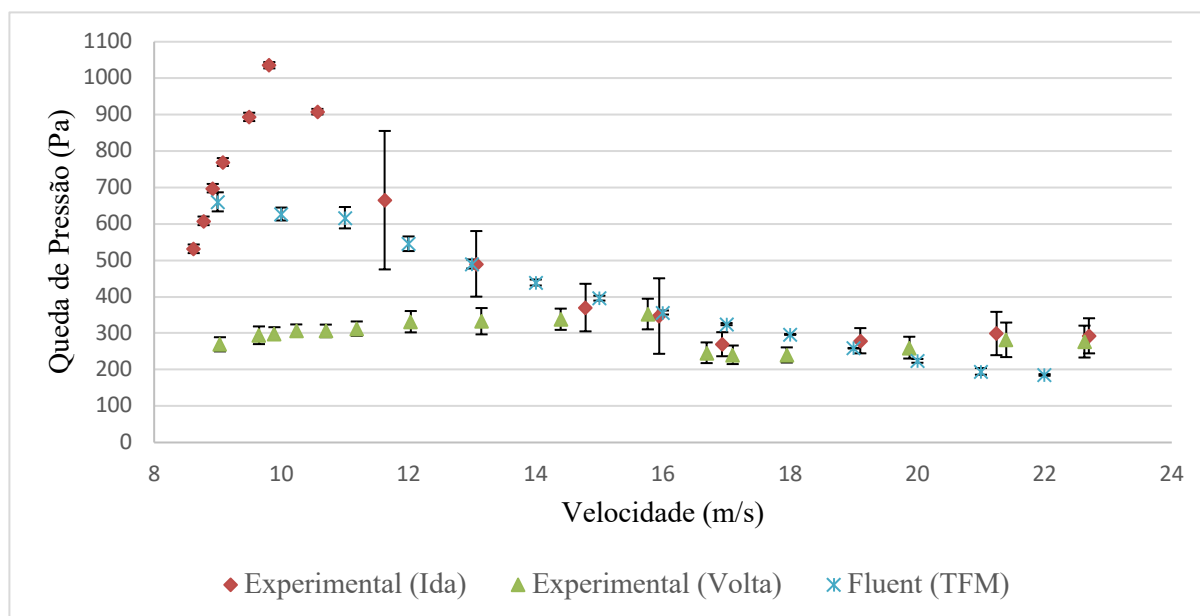
para velocidades mais altas.

Na curva de vazões decrescentes, onde se parte do jorro estabelecido e a vazão de gás é diminuída progressivamente, observa-se pouca variação na queda de pressão. A velocidade de mínimo jorro, importante parâmetro operacional obtido através do ponto de mínimo desta curva, é de $17,10 \pm 0,20$ m/s. Para este mesmo equipamento, Batista (2021) determina uma altura experimental de leito de 14,54cm.

5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO NO SOFTWARE *ANSYS FLUENT*

A figura 6 a seguir compara os dados obtidos na simulação via Ansys Fluent aos dados experimentais.

Figura 6 – Valores experimentais e simulados via Ansys Fluent para a queda de pressão em função da velocidade para a massa de 500g de sorgo no leito de jorro.



Fonte: Acervo próprio.

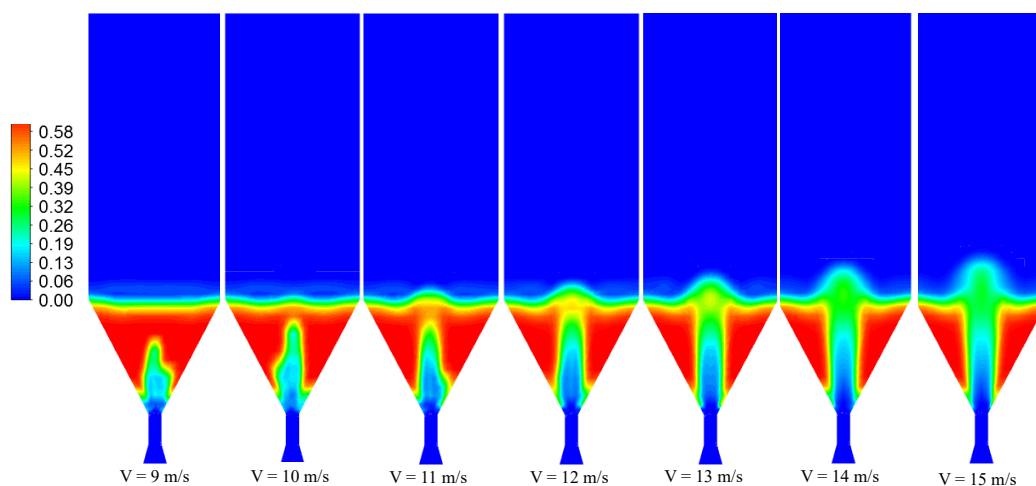
Verifica-se que a ordem de grandeza dos dados simulados é comparável ao observado experimentalmente e que há similaridade nos pontos obtidos, principalmente próximos à região de altas velocidades; no entanto, o comportamento da curva simulada difere do observado experimentalmente, apresentando uma curva estritamente decrescente e de caráter quase linear, com pequenos valores de desvio-padrão frente aos experimentais. Adicionalmente, como o *software* não captura a diferença observada entre as curvas de vazão crescente e decrescente obtidas no experimento, tem-se apenas uma curva onde os valores de queda de pressão diminuem proporcionalmente ao aumento da vazão.

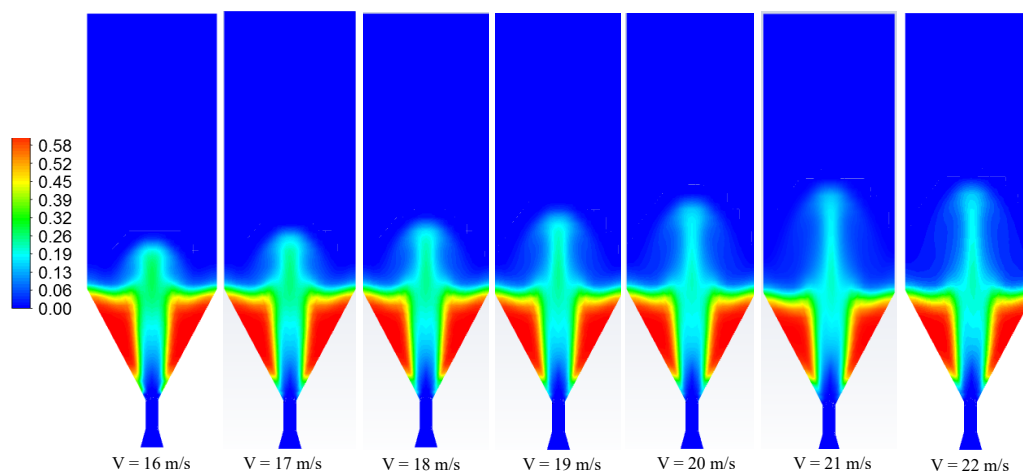
Estas divergências entre comportamento simulado e experimental são atribuídas à natureza da abordagem Euler-Euler de dois fluidos (TFM); ao interpretar a fase sólida como um fluido, são desconsiderados alguns efeitos importantes na fluidodinâmica do leito de jorro, como a influência do empacotamento e interações entre as fases e, particularmente, da fase sólida com a parede.

Batista (2021) determinou que, apesar de ser necessário o uso de malhas mais grosseiras devido ao alto custo computacional característico da abordagem Lagrangeana, simulações por acoplamento CFD-DEM capturam o comportamento experimental com maior precisão se comparadas à abordagem TFM, devido à consideração dos efeitos acima mencionados nos balanços de massa e quantidade de movimento. É importante ressaltar, no entanto, que o desenvolvimento da CFD se intensificou consideravelmente ao longo dos anos recentes com a rápida evolução capacidade de processamento dos computadores e que, antes da adoção em maior escala da abordagem DEM, os comportamentos observados no modelo TFM eram considerados como um bom referencial dentro do que se fazia possível.

A figura 7 abaixo dispõe os contornos de fração volumétrica de sólidos obtidos para diferentes faixas de velocidade na entrada.

Figura 7 – Fração volumétrica de sólidos simulada via Ansys Fluent para 500g de sorgo em diversas faixas de velocidade.





Fonte: Acervo próprio.

Verifica-se alto grau de representatividade na evolução dos regimes de jorro relativo ao descrito por Mathur e Epstein (1974), havendo uma expansão progressiva do jorro de acordo com o aumento da vazão de gás; Também nota-se menor fração volumétrica de sólidos ao longo do canal e na região de interface entre a fase fluida e a fase sólida na região anular, efeito este que também é observado no experimento.

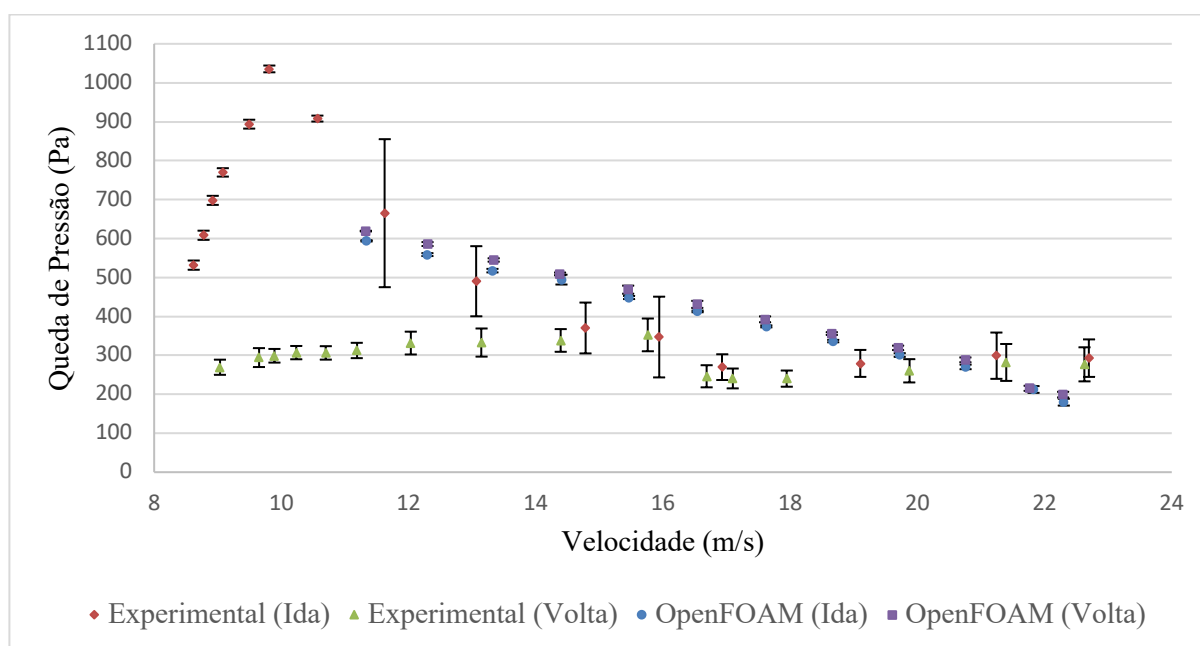
Devido ao caráter linear da curva fluidodinâmica característica simulada, não se pôde obter o valor de velocidade de mínimo jorro por análise quantitativa como se fez no experimento; o valor foi determinado junto à altura do jorro em regime estável através da análise da fração volumétrica de sólidos. Foram obtidos valores de 12,46 cm para a altura do jorro em regime estável e 11 m/s para a velocidade de mínimo jorro, com desvios respectivos de 14,31% e 35,67% em relação aos dados experimentais. Estes valores altos de desvio indicam baixo grau de representatividade do modelo TFM utilizado neste trabalho, conduzidos através do *software Ansys Fluent* em relação aos parâmetros característicos obtidos experimentalmente.

Analisando os resultados obtidos, nota-se que o modelo TFM aplicado ao *software Ansys Fluent* é capaz de capturar com fidelidade as transições no regime de jorro de acordo com o aumento de vazão, mas apresenta baixo grau de precisão em relação à curva fluidodinâmica característica e aos parâmetros característicos obtidos experimentalmente. Esta primeira divergência é majoritariamente atribuída à natureza da abordagem Euler-Euler, enquanto a segunda pode ser explicada por diferenças na aplicação dos métodos numéricos entre *softwares*, uma vez que valores mais precisos para os parâmetros da simulação foram obtidos na simulação equivalente no *software OpenFOAM*.

5.3 VALIDAÇÃO DO MODELO NO *SOFTWARE* OPENFOAM

A figura 8 abaixo relata a comparação do comportamento simulado pelo *software* OpenFOAM em relação aos dados experimentais obtidos. Conforme mencionado na seção 4.3.2, após atingir a velocidade máxima permitida pelo equipamento, foram simulados dados adicionais reduzindo progressivamente a velocidade declarada na entrada de volta ao limite mínimo, com o objetivo de determinar a velocidade de mínimo jorro de maneira qualitativa e identificar se a ferramenta captura as diferenças entre curvas de vazão crescente e decrescente observadas fisicamente.

Figura 8 – Valores experimentais e simulados via OpenFOAM para a queda de pressão em função da velocidade para a massa de 500g de sorgo no leito de jorro.



Fonte: Acervo próprio.

Nota-se que, assim como observado na validação do modelo no *software* Ansys Fluent, a ordem de grandeza para os valores simulados de queda de pressão é condizente com a observada nos dados experimentais; no entanto, não se observa o comportamento característico do leito de jorro refletido na curva experimental. A curva de dados simulados apresenta caráter altamente linear; isto se dá devido à abordagem da fase sólida como um fluido característica do modelo TFM, que simplifica os efeitos exercidos pelo empacotamento do leito ou pelas interações entre fase particulada e a fase fluida ou com a parede do equipamento, fatores que exercem influência considerável sobre a fluidodinâmica do leito de jorro.

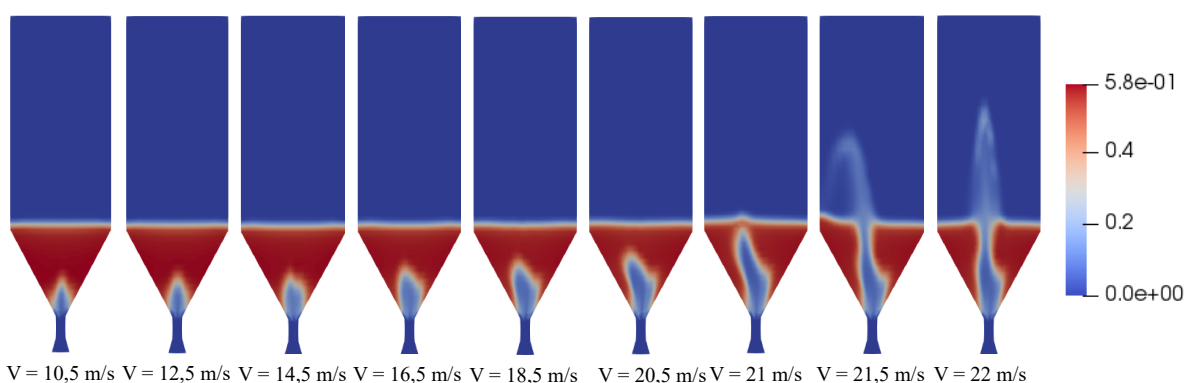
O caráter linear decrescente da curva característica, no entanto, é condizente com o observado na literatura; Mahmoodi (2018) e Batista (2021) obtiveram comportamentos

similares em seus respectivos estudos da abordagem TFM para leitos de jorro. Verifica-se também que os valores de desvio-padrão observados nos dados simulados são pequenos se comparados aos obtidos experimentalmente, atingindo um máximo de 12 Pa frente a desvios da ordem de 190 Pa nos dados experimentais.

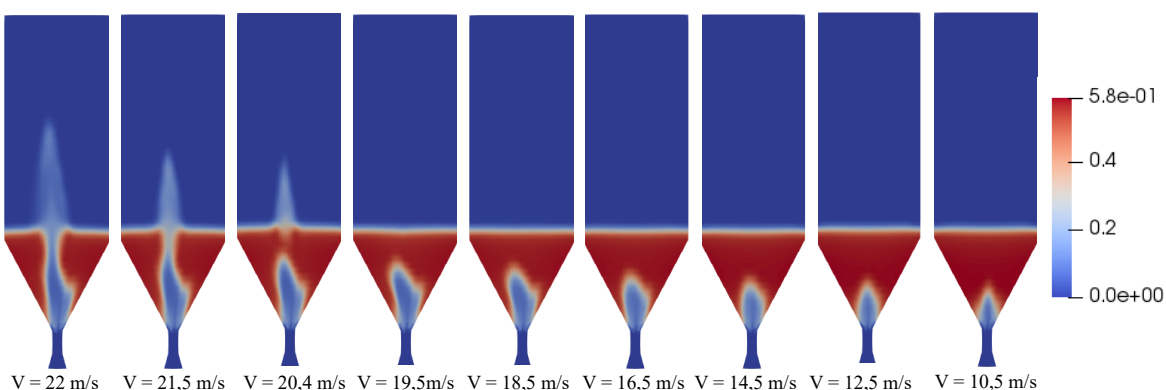
Também devido ao caráter linear dos dados simulados, não foi possível determinar a velocidade de mínimo jorro de maneira quantitativa; o parâmetro foi determinado qualitativamente através da observação da fração de sólidos segundo ilustram os itens a) e b) da figura 9 abaixo, onde o item a) representa o aumento de vazões e o item b) a diminuição.

Figura 9 – Fração volumétrica de sólidos simulada via OpenFOAM para 500g de sorgo em diversas faixas de velocidade.

a)



b)



Fonte: Acervo próprio.

A velocidade de mínimo jorro foi observada no momento de fechamento do leito, aos 20,4 m/s. Este valor apresenta um desvio de 19,3% em relação ao valor de 17,10 m/s obtido experimentalmente; apesar do valor relativamente alto para o desvio, a velocidade está consideravelmente mais próxima da realidade se comparada à obtida via Ansys Fluent, além

de superestimar o valor ao invés de subestimá-lo como faz o *software* de licença comercial. Também foi mensurado um valor de 14,50cm para a altura do jorro em regime estável; este valor apresenta desvio quase nulo (0,27%) em relação ao experimental, indicando alta fidelidade da simulação para esta variável.

É de particular interesse observar as diferenças entre vazões crescentes e decrescentes nesta simulação. Na figura 8, nota-se que os valores obtidos para vazões crescentes e decrescentes no experimento são essencialmente os mesmos; no entanto, observando as frações volumétricas relativas às velocidades mínimas nos itens a) e b) da figura 9, pode-se verificar que a altura do leito fechado na curva de vazões decrescentes é ligeiramente superior à da curva de vazões crescentes; esta diferença é mensurada em 5mm pelo *software* de pós-processamento e faz sentido físico, uma vez que os efeitos de empacotamento são conhecidamente menores após o estabelecimento do jorro. Uma vez que a simulação no OpenFOAM buscou cobrir as vazões crescentes e decrescentes reproduzidas no experimento em uma única corrida, utilizando os resultados das faixas de velocidade anterior para as iterações seguintes, pode-se afirmar que este caráter cumulativo é condizente com a diferença observada nas alturas dos leitos.

Ainda analisando os contornos obtidos para a fração volumétrica dos sólidos na figura 9, observa-se, no momento de transição do regime de arco compacto para o regime de jato interno que ocorre a partir do contorno de 14,5 m/s, um desvio do arco no sentido negativo do eixo Z do sistema de coordenadas, que se propaga na mesma direção para velocidades maiores e resulta em um jorro horizontalmente deslocado. Com o aumento progressivo das velocidades, o jorro se estabiliza e torna-se essencialmente simétrico, apesar de afunilado próximo à região de rompimento. Na curva de vazões decrescentes no experimento, percebe-se o fechamento do leito no mesmo ponto da sua abertura na curva de vazões crescentes, e o desvio lateral observado inicialmente persiste até o retorno à estabilização em regime de arco compacto ao fim da simulação.

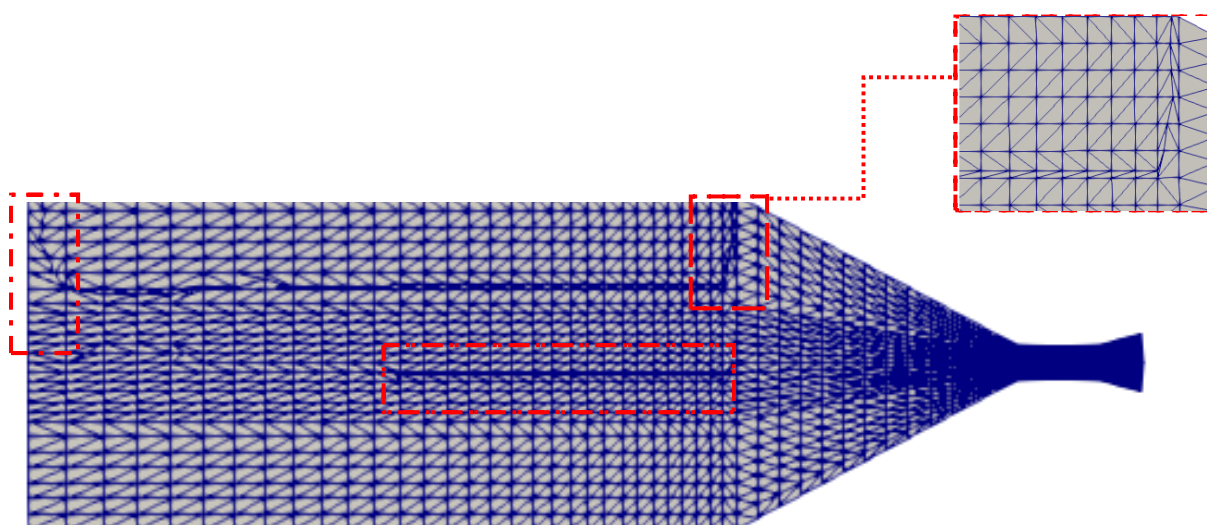
Este comportamento diverge fortemente do que é observado no experimento em laboratório e da simulação do Fluent, ilustrado na figura 6 previamente apresentada neste trabalho; em ambos os casos mencionados, o diâmetro do jato preserva-se constante com o aumento de vazão até o rompimento do leito. O jorro se inicia, então, de forma simétrica e aumenta em altura e amplitude até a estabilização em velocidades maiores.

Supõe-se que esta discordância do comportamento do OpenFOAM em relação ao observado na simulação do Ansys Fluent seja majoritariamente atribuída a incongruências na

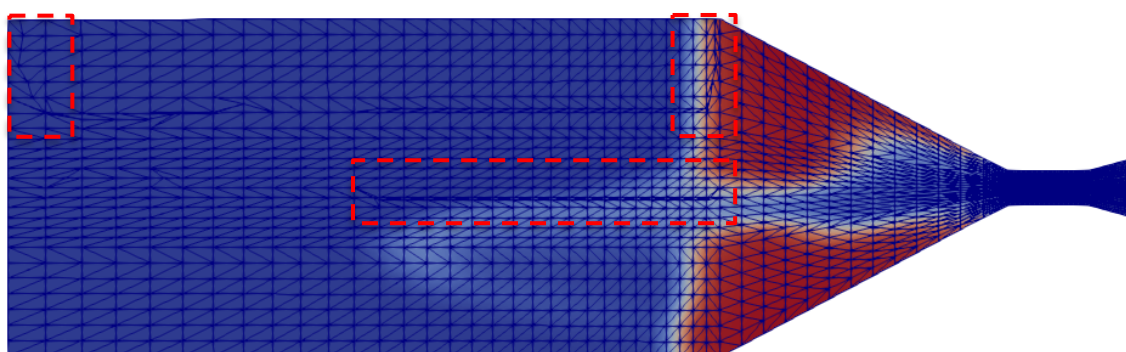
malha e colapsos localizados na malha. Por definição, no momento da importação, o *software* reinterpreta as coordenadas de cada célula triangular ou quadrangular criada no programa *Meshing* como uma célula hexaédrica; para malhas tridimensionais complexas com alto número de células, como a utilizada neste trabalho, isto pode gerar distorções como representado no corte transversal da malha importada na figura 10 a seguir.

Figura 10 – Corte transversal da malha feita no *software Meshing* e importada ao OpenFOAM ilustrando pontos de colapso localizado. a) Visualização da malha; b) Sobreposição da malha ao contorno de fração volumétrica sólidos no momento da distorção do jorro.

a)



b)



Fonte: Acervo próprio.

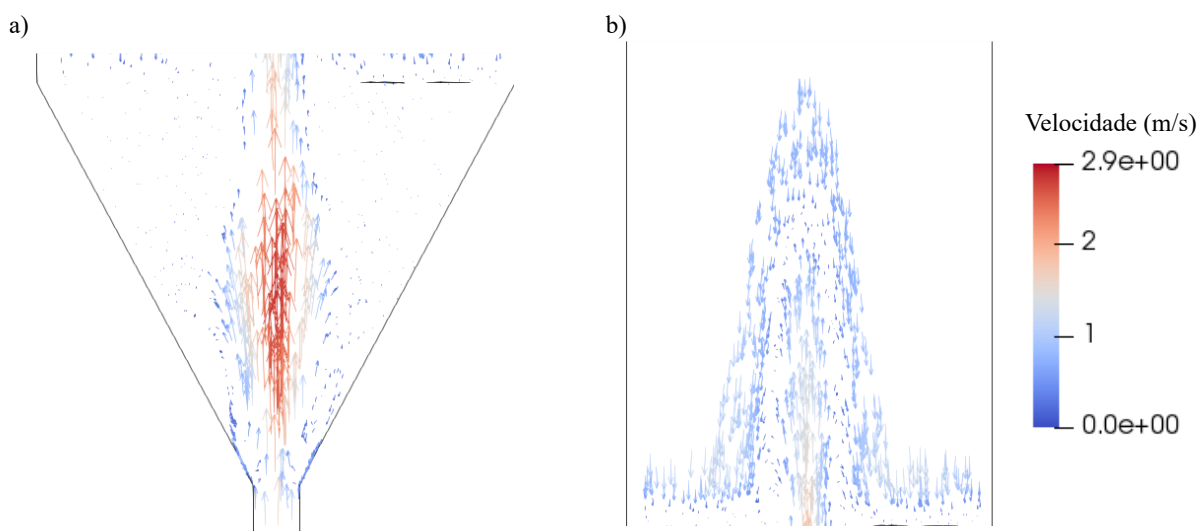
A região ampliada no item a) é de particular interesse, uma vez que é localizada na saída do cone, na interface entre o leito estático e a fase fluida. Um colapso nesta região pode provocar um comportamento inesperado nas interações entre a fase sólida, a parede e a fase fluida, resultando em desvios do jorro na direção oposta como observado nos contornos de fração volumétrica. Outras regiões de colapso potencialmente problemáticas estão demarcadas

no item a) ao longo da região central e do topo do leito; no entanto, supõe-se que o impacto de colapsos nestas regiões seja reduzido, uma vez que há menor presença da fase dispersa.

O item b) sobrepõe a ilustração da malha à fração volumétrica dos sólidos no momento em que se observa o jorro distorcido; verifica-se que a região distorcida apresenta células distorcidas de maior comprimento e menor largura próximas à região de colapso e que o jorro tende ao sentido contrário.

A figura 11 a seguir ilustra a trajetória das partículas por meio dos vetores velocidade obtidos na malha 3D. Por facilidade de visualização, as principais regiões foram destacadas; o item a) ilustra a região do cone, enquanto o item b) ilustra a região central do leito.

Figura 11 – Trajetória das partículas da fase sólida pelos vetores velocidade na simulação em malha 3D no OpenFOAM.



O comportamento observado na trajetória das partículas corresponde ao observado no experimento, com maiores velocidades observadas na região do jato central e uma distribuição simétrica das partículas. Simulações com alto grau de representatividade física, como a conduzida por Batista (2021) utilizando CFD-DEM, preveem uma amplitude maior do jorro, distribuída ao longo de todo o diâmetro do leito; no entanto, os contornos de fração volumétrica de sólidos simulados pelo *Ansys Fluent* neste trabalho condizem com o ilustrado, com um jorro de menor amplitude no centro da malha e menor presença de partículas no raio externo do leito cilíndrico. O comportamento afunilado do jato também pode ser explicado pelos pontos relativos à malha levantados anteriormente.

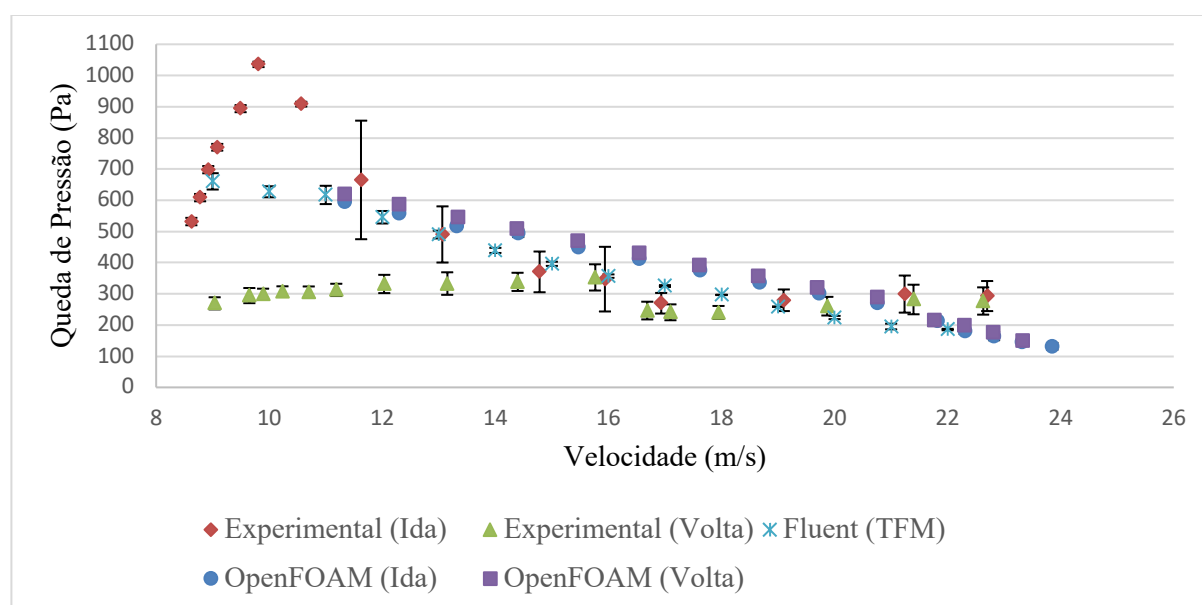
Apesar das limitações apresentadas em relação à importação de malhas e das divergências observadas visualmente nos contornos de fração volumétrica de sólidos e vetores velocidade, verificou-se um bom grau de concordância da simulação do OpenFOAM tanto em

relação à simulação conduzida no *Ansys Fluent* quanto aos dados experimentais, sendo importante ressaltar dois pontos de atenção: a influência das particularidades da abordagem Euler-Euler (TFM) no caráter linear dos dados de queda de pressão, e a importância de uma malha coesa e livre de colapsos ou estrangulamentos de célula para a obtenção de dados representativos.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE *SOFTWARES*

Após a comparação entre os dados obtidos a partir dos dois softwares em relação aos dados experimentais, é de grande interesse comparar a performance de ambos os *softwares* ao simular o experimento conduzido. O gráfico representado na figura 12 a seguir recapitula e compara a curva fluidodinâmica obtida por cada software aos dados experimentais.

Figura 12 – Valores experimentais e simulados via *Ansys Fluent* e *OpenFOAM* para a queda de pressão em função da velocidade para a massa de 500g de sorgo no leito de jorro.

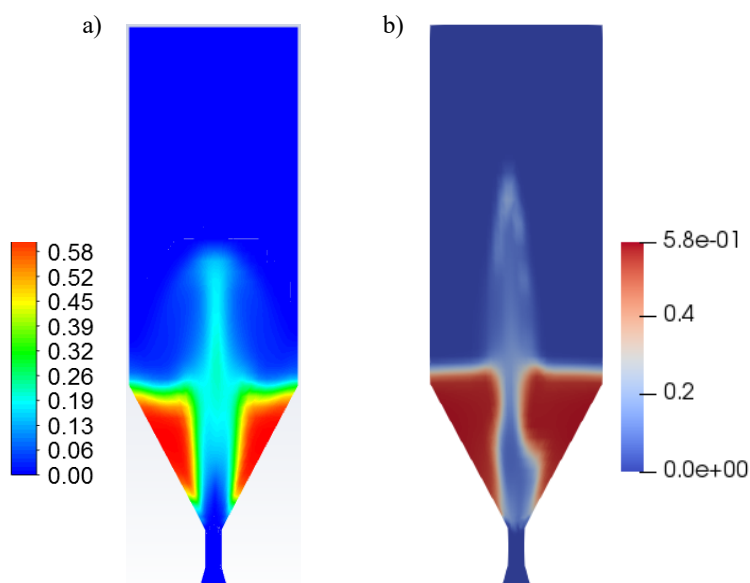


Como constatado na seção de validação de modelos, ambas as curvas fluidodinâmicas geradas pelos dois *softwares* fogem ao observado na curva experimental, apesar de apresentarem valores de queda de pressão na mesma ordem de grandeza. Isto se dá, principalmente, às simplificações características à abordagem Euler-Euler utilizada nas duas simulações. Entre as duas curvas simuladas não se notam grandes diferenças, exceto por uma aproximação ligeiramente maior da curva gerada pelo *Ansys Fluent* de um ajuste quadrático, enquanto os pontos gerados pelo *OpenFOAM* são essencialmente lineares. Em termos de comparação aos dados experimentais, verifica-se uma maior precisão dos dados gerados pelo *OpenFOAM*, uma vez que os desvios-padrão são consistentemente menores principalmente na

região de maiores velocidades.

A figura 13 a seguir ilustra nos itens a) e b) os contornos de fração volumétrica de sólidos obtidos, respectivamente, no Ansys Fluent e no OpenFOAM.

Figura 13 – Comparação entre contornos de fração volumétrica de sólidos obtidos em regime de jorro estável para a massa de 500g de sorgo via Ansys Fluent e OpenFOAM para a velocidade de 22 m/s.



Há similaridade entre ambos os contornos, principalmente quanto ao perfil de frações volumétricas de sólidos observado nas regiões características do leito e na altura de jorro observada. No entanto, como mencionado anteriormente, o colapso localizado da malha na região à direita do leito ilustrado em b) causa uma distorção no jato que não é observada em a). Adicionalmente, verifica-se um perfil mais acentuado e coeso de distribuição em a), onde há menor concentração de sólidos nas regiões de interface com o fluido, enquanto em b) este gradiente é menos explícito e há um maior afunilamento do jato na região de rompimento do leito, além de uma altura de jorro ligeiramente maior. Estas distorções passam a impressão de que há maior volume de sólidos no leito simulado pelo OpenFOAM; no entanto, dado o uso de uma mesma geometria e mesma condição de recheio do leito utilizada nos dois casos, pode-se afirmar que a quantidade de sólidos existente é a mesma em ambas as situações.

É interessante ressaltar, também, que a ferramenta de pós-processamento do OpenFOAM usa uma paleta de cores mais restrita, com menos cores de referência, o que pode impactar nas diferenças de visualização mencionadas anteriormente. De forma geral, no entanto, conclui-se que o contorno representado em a) é mais coerente com o observado na realidade.

A tabela 8 a seguir compara, entre os dois softwares, tempos médios transcorridos para 1 segundo simulado e os parâmetros característicos queda de pressão estável, altura do jorro e velocidade de mínimo jorro, bem como seus respectivos desvios em relação aos dados experimentais.

Tabela 8 – Comparação de parâmetros diversos entre Ansys Fluent e OpenFOAM.

Software	T_{MED} (h:min)	ΔP_{EST} (Pa)	Desvio (%)	H_J (cm)	Desvio (%)	V_{MJ} (m/s)	Desvio (%)
Fluent	54:46	185,41	33,03	12,46	14,30	11,0	35,67
OpenFOAM	11:31	199,19	28,06	14,50	0,27	20,4	19,30

Verifica-se que os desvios de queda de pressão no regime estável, quando não há mais grande variação de queda de pressão com o aumento da velocidade, são similares, apesar de observar-se um desvio ligeiramente menor no valor obtido pelo OpenFOAM. De maneira similar, observa-se menores desvios em relação à altura do jorro e à velocidade de mínimo jorro, que é um parâmetro particularmente importante para a operação do equipamento. Também é importante destacar o tempo médio de simulação do OpenFOAM como quase 5 vezes mais rápido que o Fluent para a mesma geometria e condições similares de simulação, o que é uma grande vantagem do *software* de código aberto uma vez que custos computacionais constituem uma variável importante na viabilidade das simulações.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal validar o modelo de dois fluidos (TFM) na fluidodinâmica do leito de jorro através de dois *softwares*, um de licença comercial e um de código aberto, visando comparar suas respectivas performances e analisar vantagens e desvantagens através da obtenção de curvas e parâmetros operacionais característicos do escoamento no leito de jorro.

Neste aspecto, o *software* de código aberto OpenFOAM se provou capaz de reproduzir resultados comparáveis e, em parte, superiores aos obtidos pelo *software* comercial Ansys Fluent nas condições avaliadas neste trabalho, principalmente no tangente a parâmetros operacionais como altura de jorro estável e velocidade de mínimo jorro. Suas principais vantagens estão na gratuidade de uso e nos tempos reduzidos de simulação observados, pontos relevantes do ponto de vista da CFD. Suas maiores desvantagens são relativas à alta complexidade de uso, exigindo conhecimentos básicos de programação devido à ausência de

uma interface amigável ao usuário, e ao tema de geração de malhas, uma vez que o procedimento nativo ao programa é inviável para a geração de malhas complexas e as rotinas internas de importação de malhas geradas em outros *softwares* ainda possuem limitações e ocasionalmente geram colapsos localizados, o que pode comprometer a qualidade dos resultados obtidos.

O *software* comercial Ansys Fluent, por sua vez, conta com maior facilidade de uso e obtenção de dados no pós-processamento, demandando menos esforço do usuário em aprender suas particularidades; além disso, a *suite* Ansys conta com o programa *Meshing*, que simplifica consideravelmente o processo de geração de malha, atendendo a uma das maiores limitações apresentadas no *software* de código aberto analisado. Adicionalmente, o *software* se mostrou mais representativo da realidade na visualização dos escoamentos por meio da comparação entre contornos de fração volumétrica de sólidos, sendo esta uma grande vantagem na análise qualitativa e no entendimento visual da fluidodinâmica envolvida no escoamento.

Ambos os programas tiveram comportamentos similares em relação à abordagem de dois fluidos (TFM), ressaltando o ponto de que as limitações em representar a os fenômenos observados experimentalmente são majoritariamente atribuídas à natureza da modelagem matemática, apesar de notar-se certa influência dos *softwares* principalmente na obtenção de parâmetros operacionais. Vale ressaltar que as malhas utilizadas neste trabalho apresentam complexidade e número de células consideravelmente maiores do que o que é normalmente observado nos artigos que simulam leitos de jorro utilizando CFD e que, observados os resultados, foi obtido um grau adequado de coerência com ótimos custos computacionais considerado o escopo apresentado.

Também é importante ressaltar que este trabalho buscou reproduzir as simulações no maior grau de equivalência possível de forma a comparar a performance dos *softwares* de maneira justa; no entanto, sem uma comparação entre códigos-fonte e uma análise detalhada de como cada *software* implementa os métodos numéricos, não é possível afirmar completamente quais são as maiores fontes de erro. Futuras sugestões de como evoluir esta análise envolvem uma análise mais aprofundada de sensibilidade entre variáveis e métodos numéricos em cada simulação, bem como análises de qualidade de malha propriamente ditas de forma a investigar os colapsos localizados e seu real impacto nas simulações.

Este é um dos primeiros trabalhos conduzidos pelo Departamento de Engenharia Química que utiliza o OpenFOAM na análise de um leito de jorro, havendo bastante espaço para crescimento e análise da ferramenta sob outros contextos. Algumas sugestões de trabalhos

futuros para o leito de jorro incluem:

- Estudar o acoplamento CFD-DEM feito por meio do *software* adicional LIGGGHTS para a fluidodinâmica;
- Realizar a análise das transferências de calor e massa por meio das estruturas de caso já disponíveis no *software* atual;
- Estudar a influência da geometria do leito e de diferentes formatos de alimentação de gás, tendo como base estudos já realizados no DEQ para equipamentos similares.

REFERÊNCIAS

1. BATISTA, J. N. M. et al. Estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro operando com diferentes distribuidores de ar utilizando CFD. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21., 2016, Fortaleza. Anais... Fortaleza: 2016.
2. BATISTA, J. N. M. **Fluidodinâmica e Transferência de Calor em Leitos de Jorro Visando a Secagem de Grãos de Sorgo: Análise Experimental e Simulação Numérica por CFD-DEM**. Tese (Doutorado). 2021. 142f. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.
3. BATISTA, J. N. M., **Análise da fluidodinâmica e da transferência de calor em leito de jorro operando com sementes de sorgo utilizando CFD**. 2017. 153f. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
4. BATISTA, J. N. M.; BRITO, R. C.; BÉTTEGA, R. Influence of inlet air distributor geometry on the fluid dynamics of conical spouted beds: A cfd study. **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly** [s. l.], v. 24, n. 4, p. 369–378, 2018. Disponível em: <http://www.ache.org.rs/CICEQ/>. Acesso em 25 Abr 2021.
5. BATISTA, J. N. M.; SANTOS, D. A.; BÉTTEGA, R. Determination of the physical and interaction properties of sorghum grains: Application to computational fluid dynamics–discrete element method simulations of the fluid dynamics of a conical spouted bed. **Particuology**, [s. l.] v. 54, p. 91-101, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S173946205720571>. Acesso em 27 Abr 2021.
6. BATISTA, J.N M. BÉTTEGA, R. Evaluation of different mathematical models in the CFD-DEM simulation of conical spouted bed fluid dynamics, **Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly** [s. l.], v.27, p. 2-2, 2021. Disponível em: <http://www.ache.org.rs/CICEQ/>. Acesso em 27 Abr 2021.
7. BÉTTEGA, R. et al. Fluid Dynamic Study of a Semicylindrical Spouted Bed: Evaluation of the Shear Stress Effects in the Flat Wall Region Using Computational Fluid Dynamics. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.] v. 48, n. 24, p. 11181–11188, 2009.
8. BÉTTEGA, R., **Contribuições ao Estudo da Fluidodinâmica em Leitos de Jorro utilizando-se CFD**. 2009. 135f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.
9. BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Three-Dimensional Numerical Simulation of Semi-Cylindrical and Cylindrical Spouted Bed Hydrodynamics. **Drying Technology**, [s. l.], v. 28, n. 11, p. 1266–1276, 2010.
10. BUIJTENEN, M. S. BÖRNER, M. DEEN, N. G. HEINRICH, S. ANTONYUK, S. KUIPERS, J. A. M. An experimental study of the effect of collision properties on spout fluidized bed dynamics. **Powder Technology**, v.206, p. 139-148, 2011.
11. CASACUBERTA, J. **The Foam House**. Disponível em: <https://the-foam-house5.webnode.es/>. Último acesso em 25 Abr 2021.
12. ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMGH, 2011. 679p.

13. EPSTEIN, N.; GRACE, J. R.; **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. 340 p.
14. FATTAHI, M.; HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G. CFD simulation of transient gas to particle heat transfer for fluidized and spouted regimes. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.] v. 25, p. 1–12, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S175926502766021759>. Acesso em 26 Abr 2021.
15. FREITAS, L.A.P.; DOGAN, O.M., LIM, C.J., GRACE, J.R.,; LUO, B. Hydrodynamics and stability of slot rect-angular spouted beds. Part 1: Thin bed, **Chem. Eng. Commun.**, v. 181, p. 243, 2000.
16. HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G.; OLAZAR, M. CFD simulation of cylindrical spouted beds by the kinetic theory of granular flow. **Powder Technology**, v. 246, p. 303–316, 2013.
17. KNEZEVIC, M. POVRENOVIC, D. Influence of fluid-mechanical parameters on volumetric mass transfer coefficient in a spout–fluid bed with a draft tube. **Chemical Engineering Science**, [s. l.] v. 134, 2015, p. 129-137. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S17502750926502759>. Acesso em 26 Abr 2021.
18. LYCZKOWSKI, R. W. The History of Multiphase Computational Fluid Dynamics. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.] v. 11, p. 49, 2010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591016307999>. Acesso em 27 Abr 2021.
19. MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004, 453 p.
20. MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974.
21. MORADI, S.; MORADI, S. 3D simulation of effect of geometry on minimum fluidization velocity and flow regimes in a spout-fluidized bed. **Theoretical Foundations of Chemical Engineering**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 508–514, 2017.
22. OLAZAR, M.,; SAN JOSÉ, M. J.; BILBAO, J. Conical spouted beds. In: **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. p. 82-104.
23. OLAZAR, M. et al. Stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [s. l.], v. 31, p. 1784–1792, 1992.
24. OLAZAR, M., San José, M.J., Aguayo, A.T., Arandes, J.M.,and Bilbao, J., Stable operation conditions for gas solidcontact regimes in conical spouted beds, **Ind. Eng.Chem. Res.**, [s. l.], vol. 31, no. 7, p. 1784, 1992.
25. PÁDUA, T. F. de, **Simulação de um alimentador Venturi em trecho ascendente no transporte pneumático de sólidos**. 2012. Tese (Doutorado). 142f. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
26. PARRELLA, N. N. L. D.; PARRELLA, R. A. C. Produção de sementes de sorgo sacarino. **Agroenergia em Revista**, Brasília, ano 2, n. 3, p. 14–15, 2011.
27. ROACHE, P. J. Perspective: A Method for Uniform Reporting of Grid Refinement Studies. **Journal of Fluids Engineering**, [s. l.], v. 116, n. 3, p. 405–413, 1994.
28. SANTOS, R.F. dos; PLACIDO, H.F.; GARCIA, E.B.; CANTÚ, C.; ALBRECHT, A.J.P.; ALBRECHT, L.P.; FRIGO, K.D. de A. Sorgo sacarino na produção de agroenergia. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s. l.] v.4, p. 01- 12, 2015.

29. SARI, S.; KULAH, G.; KOKSAL, M. Characterization of gas-solid flow in conical spouted beds operating with heavy particles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [s. l.], v. 40, p. 132–139, 2012.
30. ZHANG, H. LIU, M. LI, T. HUANG, Z. SUN, X. BO, H. DONG, Y. Experimental investigation on gas-solid hydrodynamics of coarse particles in a two-dimensional spouted bed. **Powder Technology**, v.307, p. 175-183, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S00348205820582064>. Acesso em 28 Abr 2021.