

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**AMARÍLIS SEVERINO E SOUZA**

**AVALIAÇÃO POR CFD DA FLUIDODINÂMICA E DA TRANSFERÊNCIA DE  
CALOR EM LEITOS DE JORRO PARA DIFERENTES ÂNGULOS DA BASE  
CÔNICA**

**SÃO CARLOS-SP**

**2019**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

AMARÍLIS SEVERINO E SOUZA

**AVALIAÇÃO POR CFD DA FLUIDODINÂMICA E DA TRANSFERÊNCIA DE  
CALOR EM LEITOS DE JORRO PARA DIFERENTES ÂNGULOS DA BASE  
CÔNICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de concentração de Pesquisa e Desenvolvimento de Processos Químicos.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Béttega

SÃO CARLOS-SP

2019



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

---

### Folha de Aprovação

---

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Amarílis Severino e Souza, realizada em 27/02/2019:

Prof. Dr. Rodrigo Béttega  
UFSCar

Prof. Dr. Cezar Augusto da Rosa  
FURG

Profa. Dra. Gabriela Cantarelli Lopes  
UFSCar

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Cezar Augusto da Rosa e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ao) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Prof. Dr. Rodrigo Béttega

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder os dons, as graças e a luz necessários para executar este trabalho. A Nossa Senhora por me acompanhar e consolar diante das dificuldades. Aos Anjos e Santos que intercederam por mim.

Aos meus pais, Amilton e Selma, e ao meu irmão, Vitor, por sempre me estimularem a estudar e por terem me dado todo o suporte, carinho e apoio durante esses primeiros anos fora de casa. Agradeço também a toda a minha família que rezou e torceu muito!

Ao meu orientador, Prof. Rodrigo Béttega, por toda atenção, paciência e ensinamentos. Suas correções, sugestões, conselhos e incentivo foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos professores do PPGEQ-UFSCar da área de Sistemas Particulados: Prof. José Teixeira Freire e Profa Maria do Carmo; e da área de Controle Ambiental: Profa Mônica e Profa Gabriela, pelas importantes contribuições para esta pesquisa.

A querida Profa Kássia Santos, por ter me ensinado os primeiros passos nas áreas de operações unitárias, escrita científica, planejamento de experimentos e simulações CFD.

A amiga e colega do LabSEM, Júnia Batista, agradeço por toda a disposição em explicar seu trabalho e pelo apoio durante o desenvolvimento deste.

Aos colegas e amigos do Centro de Secagem e do DEQ-UFSCar, pela disposição em ajudar e pelos momentos de descontração.

Às amigas da graduação, as “Luluzinhas”: Camila, Adí, Luana, Thessa e Jéssica, por mesmo de longe terem me incentivado e apoiado durante este mestrado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Projeto número 131745/2017-4.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

O leito de jorro é um equipamento de contato fluido-partícula que proporciona a movimentação cíclica dos sólidos em seu interior, que por sua vez é responsável por altas taxas de transferência de calor e de massa entre as fases. Devido a essa característica, pode ser utilizado em operações tais como a secagem de pastas e grãos. O ângulo da base cônica é um importante fator geométrico que afeta os fenômenos de transferência no leito. No contexto da economia de recursos energéticos, avanços no estudo da geometria deste equipamento podem resultar em operação energeticamente mais eficiente. A fluidodinâmica computacional (CFD) tem apresentado potencial para melhorar a compreensão do comportamento fluidodinâmico e térmico do leito. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar por meio de abordagem CFD e modelo Euler-Euler a influência do ângulo de cone na fluidodinâmica e na transferência de calor em leitos de jorro operando com partículas de sorgo. Foi utilizada malha 2D, considerando a simetria axial do leito de jorro. O desempenho fluidodinâmico de cada geometria foi comparado com base nas análises da circulação da fase sólida. A vazão mássica da fase sólida no canal de jorro e o tempo médio de ciclo das partículas foram utilizados para avaliar a taxa de circulação de sólidos para sete geometrias com ângulos de cone de 30° a 150° e diferentes cargas de partículas. Foi proposto e validado um método para a obtenção do tempo de ciclo da fase sólida baseado nas simulações Euler-Euler. Aplicou-se planejamento fatorial para as configurações que proporcionaram a maior circulação de sólidos, com avaliação dos efeitos das variáveis ângulo de cone, carga de sólidos e velocidade de entrada de ar sobre a circulação das partículas. Por meio de simulações, foi avaliado o “curto-circuito” da fase sólida no canal de jorro e o efeito desse fenômeno na qualidade da circulação das partículas. O modelo fluidodinâmico utilizado foi validado por comparação com dados experimentais da literatura, apresentando boa concordância. Os resultados das simulações indicam que ângulos de cone menores e velocidades de entrada de ar maiores favorecem a circulação de sólidos em leitos de jorro e podem ser utilizados para melhorar a eficiência da secagem do sorgo no equipamento. A carga de sólidos e o ângulo de cone foram as variáveis com maior efeito sobre o tempo de ciclo dos sólidos. Os menores ângulos de cone apresentaram maiores vazões de sólidos em posições próximas ao bocal de entrada de ar. O método CFD proposto para medição do tempo de ciclo pode ser aplicado para investigar a circulação de sólidos para outras partículas e geometrias do leito de jorro. Foi simulada a transferência de calor para os leitos com ângulos de cone de 30°, 45° e 60°, sendo analisada a temperatura da fase sólida e a temperatura de saída do ar. Foi proposto um método para a verificação do balanço de energia em simulações de leitos móveis e ressaltada a importância da análise dos dados de entrada e saída do simulador, de modo a verificar a coerência física do modelo.

Palavras-chave: leito de jorro; planejamento fatorial, circulação dos sólidos, secagem, sorgo, fluidodinâmica computacional.

## ABSTRACT

The spouted bed is an equipment that provides fluid-particle contact due to the cyclic movement of solids in its interior, which results in high rates of heat and mass transfer between phases. The spouted bed is used in operations that require these features, such as drying of pastes and grains. The angle of the conical base is an important geometric factor that affects the transport phenomena in the bed. In the context of energy saving, studies involving the bed geometry may result in a more energy efficient operation. Therefore, the analysis of this parameter contributes to selection and design of spouted beds. Computational fluid dynamics (CFD) has the potential to improve the understanding of the fluid dynamic and thermal behavior of the bed. Accordingly, the objective of this work was to evaluate the influence of cone angle on the fluid dynamics and heat transfer of a spouted bed operating with sorghum particles using CFD and an Euler-Euler model. A 2D-axisymmetric mesh was used. The hydrodynamic performance of each geometry was compared analyzing the solid phase circulation. The mass flow rate of the solid phase in the spout and the mean particle cycle time were used to evaluate the solids circulation rate for seven geometries with cone angles from 30° to 150° and different loads of solids. A method for obtaining the solid phase cycle time based on the Euler-Euler simulations was presented and validated. A factorial design was applied to the configurations which provided the greatest solids circulation, with evaluation of the effects of cone angle, solids load and inlet air velocity on particle circulation. The “short-circuiting” of the solid phase was evaluated using simulations in order to analyze the quality of particle circulation. The hydrodynamic model used was validated by comparison with experimental data from the literature and showed good agreement. The results of the simulations indicated that smaller cone angles and higher air inlet velocities favor the circulation of solids in spouted beds and can be used to improve the drying efficiency of sorghum in the equipment. Solids load and cone angle were the variables with the greatest effect on solids cycle time. The smaller cone angles presented higher solid flow rates in positions near the air inlet. The proposed CFD method for measurement of the particle cycle time could be applied to investigate solids circulation for other particles and spouted bed geometries. Heat transfer was simulated for the beds with cone angles of 30°, 45° and 60°, and the solid phase temperature and outlet air temperature were analyzed. A method to verify the energy balance in fluidized and spouted bed simulations was proposed. The importance of analyzing the input and output data of the simulator was discussed, emphasizing the verification of the physical consistency of the model.

Keywords: spouted bed; factorial design, solids circulation, drying, sorghum, computational fluid dynamics.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 O Leito de jorro .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 Aspectos gerais.....	3
2.1.2 A circulação dos sólidos .....	6
2.1.3 Distribuição de temperaturas .....	7
2.1.4 Simulação por CFD .....	9
<b>2.2 O estudo do ângulo da base cônica do leito de jorro .....</b>	<b>13</b>
2.2.1 Abordagens experimentais.....	15
2.2.2 Abordagens por simulação CFD .....	16
<b>2.3 Considerações.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 3 - MODELO MATEMÁTICO.....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Fluidodinâmica .....</b>	<b>19</b>
3.1.1 Conservação da massa e do movimento .....	19
3.1.2 Modelo de arraste .....	20
3.1.3 Teoria Cinética Granular .....	21
3.1.4 Turbulência .....	23
<b>3.2 Transferência de calor.....</b>	<b>26</b>
<b>3.3 Condições de contorno .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Solução numérica.....</b>	<b>29</b>
<b>CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO PARA DIFERENTES ÂNGULOS DA BASE CÔNICA POR CFD.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1 Método .....</b>	<b>31</b>
4.1.1 Condições de simulação e geometria do sistema de referência .....	31
4.1.2 Teste de valores do coeficiente de especularidade .....	33
4.1.3 Validação do modelo fluidodinâmico.....	34

4.1.4 Teste de malhas computacionais .....	35
4.1.5 Avaliação de diferentes ângulos da base cônica por CFD .....	37
4.2 Resultados e discussões .....	43
4.2.1 Teste de malhas computacionais .....	43
4.2.2 Definição do valor do coeficiente de especularidade .....	45
4.2.3 Validação do modelo fluidodinâmico.....	47
4.2.4 Validação do método de cálculo do tempo de ciclo da fase sólida.....	48
4.2.5 Fluidodinâmica do leito de jorro para diferentes ângulos de cone .....	50
<b>CAPÍTULO 5 - SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS MÓVEIS.....</b>	<b>66</b>
5.1 Método .....	66
5.1.1 Leito de jorro .....	66
5.1.2 Leito fluidizado .....	68
5.2 Resultados das simulações .....	69
5.2.1 Leito de jorro .....	69
5.2.2 Leito fluidizado .....	74
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>76</b>
6.1 Fluidodinâmica .....	76
6.2 Transferência de calor.....	77
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>APÊNDICE A – MÉTODO GCI.....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO DA FASE SÓLIDA.....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do leito de jorro: (a) Parâmetros geométricos; (b) Movimentação das partículas e regiões formadas no equipamento. ....	4
Figura 2 - Curva característica do leito de jorro: queda de pressão versus vazão de gás. ....	5
Figura 3 - Leito de jorro e bocal Venturi (dimensões em m). ....	32
Figura 4 - Flutuação da queda de pressão simulada ( $\gamma = 60^\circ$ ; $m_p = 4,0$ kg; $u = 15,7$ m/s) ....	33
Figura 5 - Representação esquemática da construção de malhas para as diferentes geometrias adotadas neste trabalho (a) Leito com cone de $60^\circ$ ; (b) Leito com cone de $150^\circ$ ....	36
Figura 6 - Esquemas de obtenção de (a) $W_s$ pelo posicionamento da linha de coleta de dados em $x = H_c$ no canal de jorro e (b) diâmetro do canal de jorro, pela posição na qual ocorre inversão no sentido axial do vetor velocidade da fase sólida. ....	38
Figura 7 - Esquema para avaliação do curto-circuito da fase sólida no leito de jorro (a) posicionamento de linhas de coleta da vazão mássica da fase sólida em diversas posições do canal de jorro; (b) balanço de sólidos no canal de jorro entre as posições $i$ e $i+1$ . ....	42
Figura 8 - Comportamento da vazão mássica de sólidos no canal de jorro com o tempo para várias condições de deslizamento da fase sólida na parede. ....	45
Figura 9 - Vetores de velocidade dos sólidos apresentados na região cônica do leito de jorro para diferentes valores do coeficiente de especularidade. Destaque para a reentrada de sólidos no canal de jorro e elevação da fase sólida na parte inferior da região anular. ....	46
Figura 10 - Curva característica experimental e simulada do leito. $\gamma = 60^\circ$ ; $H_c = 0,2$ m; $m_p = 4,0$ kg. ....	47
Figura 11 - Contornos de fração volumétrica da fase sólida ( $\gamma = 60^\circ$ ; $H_c = 0,2$ m; $m_p = 4,0$ kg). ....	48
Figura 12 - Comparação entre os dados experimentais de SPREUTELS et al. (2016) e os resultados simulados do tempo médio de ciclo da fase sólida ( $\gamma = 60^\circ$ ; $D_c = 0,62$ m; $D_i = 0,028$ m; $d_s = 3$ mm). ....	49
Figura 13 - Distribuição do tempo de residência dos sólidos no canal de jorro, na fonte, no ânulo e tempo de ciclo total dos sólidos para experimento de SPREUTELS et al (2016). ....	50
Figura 14 - Contornos de fração volumétrica da fase sólida simulados em leitos de jorro para vários ângulos de cone ( $m_p = 4,0$ kg; $u = 15,7$ m/s). ....	51

Figura 15 - Queda de pressão na entrada do leito para as simulações com diferentes ângulos de cone e massas de partículas alimentadas. ....	52
Figura 16 - Comportamento da (a) velocidade das partículas; (b) fração volumétrica da fase sólida ao longo da posição radial do canal de jorro em $x = H_c$ ; $m_p = 4,0$ kg.....	53
Figura 17 - Vazão mássica (a) e tempo de ciclo (b) dos sólidos no canal de jorro para cada condição simulada, parametrizada na velocidade de entrada do ar (15,7 m/s). ....	54
Figura 18 - Distribuição dos resíduos para a vazão mássica de sólidos no leito de jorro. ....	58
Figura 19 - Superfícies de resposta para a vazão de sólidos no canal de jorro em função de duas variáveis (as demais estão mantidas no nível central): (a) ângulo de cone e massa de sólidos; (b) ângulo de cone e velocidade de entrada de ar; (c) velocidade de entrada de ar e massa de sólidos.....	59
Figura 20 - Distribuição dos resíduos para o tempo de ciclo das partículas. ....	60
Figura 21 - Superfícies de resposta para o tempo de ciclo da fase sólida no leito de jorro em função de duas variáveis (as demais estão mantidas no nível central): (a) ângulo de cone e massa de sólidos; (b) ângulo de cone e velocidade de entrada de ar; (c) velocidade de entrada de ar e massa de sólidos. ....	61
Figura 22 - Vazão mássica da fase sólida em cada posição do canal de jorro para as configurações de leito de jorro com massa de 4,0 kg de sólidos nas velocidades de entrada de ar de (a) 15,7 m/s, (b) 16,7 m/s e (c) 17,7 m/s.....	64
Figura 23 - Malhas computacionais do sistema proposto do leito fluidizado (a) 2D com eixo de simetria e (b) 3D, vista lateral; (c) 3D, vista superior. ....	69
Figura 24 - Comportamento da (a) temperatura da fase sólida e da (b) temperatura da fase ar na saída do leito com o tempo para diferentes ângulos de cone.....	70
Figura 25 - Comparação entre as temperaturas da fase sólida e da fase ar na saída do leito em relação a (a;b) Casos 1 e 2 - correlação para cálculo do número de $Nu_s$ ; (c;d) Casos 1 e 3 ordem <i>upwind</i> para solução da equação da energia; Casos 1 e 4 - espaçamento entre nós da malha computacional (e;f).....	71
Figura 26 - Diferença entre o calor cedido pela fase ar ( $Q_{fs}$ ) e o calor recebido pela fase sólida ( $Q_{sf}$ ) para cada configuração e casos simulados. ....	73
Figura 27 - Comparação entre as temperaturas da fase sólida (a) e da fase ar na saída do leito (b) para a simulação bidimensional com simetria axial e a simulação tridimensional.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condições experimentais adotadas nas simulações.....	32
Tabela 2 - Alturas de leito estático correspondentes a cada condição de leito de jorro simulada .....	40
Tabela 3 - Comparação entre os resultados de malhas com e sem esquema de crescimento de células acima da altura de leito estático.....	43
Tabela 4 - Resultados do teste de malhas com esquema de crescimento na região cilíndrica e diferentes espaçamentos na região cônica .....	44
Tabela 5 - Valores calculados do teste GCI e erros em relação à solução assintótica. ....	44
Tabela 6 - Parâmetros de circulação dos sólidos em leito de jorro e respectivo desvio de $t_c$ em relação à correlação de SPREUTELS <i>et al.</i> (2016) para cada coeficiente de especularidade..	47
Tabela 7 - Planejamento fatorial $3^3$ : respostas das simulações CFD.....	57
Tabela 8 - Efeito das variáveis $\gamma$ ( $x_1$ ), $m_p$ ( $x_2$ ) e $u$ ( $x_3$ ) sobre a vazão mássica de sólidos no canal de jorro ( $R^2 = 0,9631$ ).....	58
Tabela 9 - Efeito das variáveis $\gamma$ , $m_p$ e $u$ sobre o tempo de ciclo das partículas ( $R^2 = 0,9858$ )	60
Tabela 10 - Posições de coleta dos dados de vazão mássica da fase sólida no canal de jorro ( $m_p = 4,0$ kg). ....	65

**LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Principais aspectos dos trabalhos presentes na literatura que estudaram o ângulo da base cônica dos leitos de jorro.....	14
Quadro 2 - Infraestrutura computacional.....	29
Quadro 3 - Características do procedimento de simulação utilizado para a simulação da fluidodinâmica e da transferência de calor do leito de jorro. ....	30
Quadro 4 - Parâmetros de simulação utilizados para cada caso. ....	68

## LISTA DE SÍMBOLOS

$Ar$	Número de Arquimedes [-]
$C_1$	Constante do modelo k- $\epsilon$
$C_2$	Constante do modelo k- $\epsilon$
$C_D$	Coefficiente de arraste [-]
$C_\mu$	Constante do modelo k- $\epsilon$
$c_{p,s}$	Calor específico fase sólida [J/(kg.K)]
$c_{p,f}$	Calor específico fase fluida [J/(kg.K)]
$C_V$	Constante do modelo k- $\epsilon$
$d_s$	Diâmetro da partícula [m]
$D_i$	Diâmetro da entrada de ar no leito [m]
$D_c$	Diâmetro da coluna cilíndrica [m]
$D_{t,sf}; D_s$	Parâmetro de turbulência
$e_{ss}$	Coefficiente de restituição sólido-sólido [-]
$g$	Aceleração gravitacional [m/s <sup>2</sup> ]
$g_0$	Função de distribuição radial
$G_{k,f}$	Termo de geração de energia cinética turbulenta
$H$	Entalpia [J/kg]
$H_c$	Altura de leito estático [m]
$H_o$	Altura da parte cônica [m]
$h_{fs}$	Coefficiente de transferência de calor entre fases [W/m <sup>3</sup> .K]
$h_\infty$	Coefficiente convectivo de transferência de calor [W/(m <sup>2</sup> .K)]
$k_{\theta s}$	Coefficiente de difusão da temperatura granular [-]
$K_{fs}$	Coefficiente de troca de momento entre fases [kg/(m <sup>3</sup> .s)]
$k_f$	Condutividade térmica da fase fluida [W/(m.K)]
$k_{f,eff}$	Condutividade térmica efetiva da fase fluida [W/(m.K)]
$k_s$	Condutividade térmica da fase sólida [W/(m.K)]
$k_{s,eff}$	Condutividade térmica efetiva da fase sólida [W/(mK)]

$\dot{m}_f$	Vazão mássica de ar [kg/s]
$m_p$	Massa de sólidos alimentada ao leito [kg]
$Nu_s$	Número de Nusselt [-]
$Pr$	Número de Prandtl [-]
$p$	Pressão [N/m <sup>2</sup> ]
$p_s$	Pressão do sólido [N/m <sup>2</sup> ]
$Q$	Vazão volumétrica de ar [m <sup>3</sup> /s]
$Q_{fs}$	Calor cedido da fase ar para a fase sólida [J]
$Q_{sf}$	Calor recebido pela fase sólida [J]
$r$	Posição radial [m]
$Re_s$	Número relativo de Reynolds da fase sólida [-]
$t_c$	Tempo médio de ciclo da fase sólida no leito [s]
$t_f$	Tempo final [s]
$T_{i,f}$	Temperatura do ar na entrada do leito [K]
$T_{o,f}$	Temperatura do ar na saída do leito [K]
$T_{i,s}$	Temperatura inicial da fase sólida [K]
$T_{o,s}$	Temperatura final da fase sólida [K]
$T_\infty$	Temperatura ambiente [K]
$T_q$	Temperatura da fase q [K]
$u_{mj}$	Velocidade do fluido na condição de mínimo jorro [m/s]
$u$	Velocidade do ar na entrada do leito [m/s]
$\vec{v}$	Velocidade da fase [m/s]
$\vec{v}_{s,w}$	Velocidade da fase sólida na parede [m/s]
$W_s$	Vazão mássica da fase sólida no canal de jorro [kg/s]
$x_1$	Forma codificada da variável $\gamma$ [-]
$x_2$	Forma codificada da variável $m_p$ [-]
$x_3$	Forma codificada da variável $u$ [-]
$\Delta P$	Queda de pressão [Pa]

#### Letras Gregas

$\alpha$	Fração volumétrica [-]
$\alpha_{s,máx}$	Fração volumétrica máxima da fase sólida [-]

$\Delta Q$	Diferença entre o módulo de $Q_{fs}$ e $Q_{sf}$ [J]
$\varepsilon$	Dissipação da energia cinética turbulenta [ $m^2/s^2$ ]
$\varepsilon_r$	Porosidade [-]
$\eta_{fs}$	Parâmetro de turbulência
$\gamma$	Ângulo da base cônica [ $^\circ$ ]
$\gamma_{\theta s}$	Dissipação de energia por efeitos de colisão [-]
$\kappa$	Energia cinética turbulenta [ $m^2/s^2$ ]
$\theta_{exp}$	Adimensional de temperatura experimental [-]
$\theta_{sim}$	Adimensional de temperatura simulada [-]
$\theta_s$	Temperatura granular [ $m^2/s^2$ ]
$\lambda$	Viscosidade <i>bulk</i> [Pa.s]
$\mu$	Viscosidade dinâmica [Pa.s]
$\prod_{\kappa,f}, \prod_{\varepsilon,f}$	Influência da fase particulada na fase contínua
$\rho$	Massa específica [ $kg/m^3$ ]
$\sigma$	Ângulo de fricção interna [ $^\circ$ ]
$\sigma_k$	Constante do modelo k- $\varepsilon$
$\bar{\tau}$	Tensor das tensões viscosas [ $N/m^2$ ]
$\bar{\tau}''$	Tensor de Reynolds [ $N/m^2$ ]
$\bar{\tau}_p$	Tensão de cisalhamento da fase sólida na parede [ $N/m^2$ ]
$\phi$	Coefficiente de especularidade [-]
$\phi_{fs}$	Troca de energia entre a fase fluida e particulada [-]

### Subscritos

$i$	Entrada
$o$	Saída
$f$	Fase fluida
$q$	Fase
$s$	Fase sólida
$t$	Turbulência

## Abreviaturas e Siglas

CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
DEM	Método dos Elementos Discretos – <i>Discrete Element Method</i>
GCI	<i>Grid Convergence Index</i>
UDF	<i>User-defined function</i>

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

O leito de jorro é um equipamento que foi desenvolvido no Canadá por MATHUR e GISHLER (1955) durante experimentos de fluidização. Em sua forma convencional, possui uma parte cilíndrica conectada sobre uma base cônica por onde fluido é injetado, o que causa a movimentação cíclica das partículas no interior do leito. Esse movimento proporciona alto contato entre as fases presentes, o que contribui para a transferência de calor e massa entre elas. Nesse sentido, os aspectos geométricos do leito são importantes por influenciarem o desempenho dos mecanismos de transporte envolvidos.

O ângulo de abertura da base cônica é um importante parâmetro geométrico que afeta a operação do leito de jorro. Em trabalhos experimentais presentes na literatura nos quais foram estudados e comparados vários ângulos de cone, os autores apresentaram para quais faixas de parâmetros geométricos e propriedades das partículas ocorria jorro estável (OLAZAR *et al.*, 1994; SAN JOSÉ, *et al.*, 1996). Também foi observado que tal parâmetro afeta a forma do jorro e a altura da fonte (HOSSEINI *et al.*, 2010), bem como influencia na ocorrência de zonas mortas e na distribuição de temperaturas no leito (HOSSEINI *et al.*, 2016). Ademais, PERAZZINI *et al.* (2015) destacaram a influência e importância do ângulo de cone sobre a capacidade de secagem do equipamento. Esses estudos mostraram que o ângulo de cone é um fator que afeta consideravelmente as condições operacionais e os fenômenos de transferência no leito de jorro.

Embora seja uma abordagem que trouxe importantes contribuições para a área, utilizar a via experimental para estudar a influência do ângulo de cone no desempenho de leitos de jorro possui algumas desvantagens. O elevado custo para construir bases diferentes, bem como o tempo de análise requerido, são fatores que desencorajam a avaliação desse parâmetro experimentalmente, sobretudo quando necessário avaliar uma ampla gama de ângulos de cone. Outra desvantagem de técnicas experimentais é o custo dos equipamentos de medição, bem como a dificuldade na obtenção de algumas medidas, tais como velocidade e fração volumétrica das fases. Mais ainda, SANTOS *et al.* (2012) constatou que a inserção de sondas no leito de jorro perturba o escoamento original. Por isso, o uso de ferramentas de simulação por fluidodinâmica computacional (CFD-*Computational Fluid Dynamics*) torna-se interessante para o estudo do ângulo de cone em leitos de jorro, pois fornecem os perfis fluidodinâmicos e térmicos no leito para diferentes geometrias a um custo relativamente baixo, possibilitando

encontrar configurações e condições de operação que favoreçam o desempenho do equipamento na aplicação desejada.

A abordagem Euler-Euler com modelo Granular Euleriano para a fase sólida tem sido amplamente utilizada para avaliar escoamentos gás-sólido em leitos de jorro. Com o avanço da capacidade de processamento dos computadores e as melhorias nos modelos e procedimentos numéricos adotados para sistemas multifásicos e de fluidização, os resultados atualmente obtidos por CFD têm demonstrado que as simulações são capazes de prever de forma satisfatória o comportamento experimental do leito quando analisadas, por exemplo, a vazão e queda de pressão de jorro mínimo (DUARTE *et al.*, 2009; SANTOS *et al.*, 2009), a velocidade de sólidos (BÉTTEGA *et al.*, 2010; HOSSEINI *et al.*, 2014) e o perfil de temperaturas no leito (DA ROSA, 2010; HOSSEINI *et al.*, 2016). Tais resultados estimulam a utilização da CFD para a otimização de processos e projeto de unidades, já que informações sobre a operação do equipamento são obtidas com custo e tempo de projeto reduzidos.

Sendo assim, esta dissertação teve por objetivo avaliar por CFD o efeito do ângulo do cone sobre a fluidodinâmica e a transferência de calor em leito de jorro operando com grãos de sorgo, utilizando a abordagem Euler-Euler com modelo Granular Euleriano para a fase sólida. O *software* ANSYS Fluent 14.0 foi utilizado nas simulações. Para a fluidodinâmica, foi analisado o efeito da geometria cônica sobre a circulação da fase sólida no leito. Nesse sentido, um método para obter o tempo de circulação de partículas foi apresentado e validado. A influência das variáveis ângulo de cone, massa de sólidos e velocidade de entrada de ar no tempo de ciclo da fase sólida e na vazão mássica de sólidos no canal de jorro foi investigada por respostas de simulações orientadas por um planejamento fatorial. As configurações que promoveram a maior circulação da fase sólida foram simuladas envolvendo transferência de calor, nas quais vários parâmetros de simulação foram testados a fim de verificar o balanço de energia. Por meio das análises, buscou-se obter o ângulo de cone mais indicado para a operação de secagem de grãos de sorgo no leito de jorro.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção são apresentados aspectos teóricos relacionados ao leito de jorro, enfatizando questões relacionadas à circulação de sólidos e à distribuição de temperaturas. Em seguida, são discutidos alguns estudos de simulação via CFD que previram adequadamente o comportamento experimental do equipamento. Posteriormente, são expostos os principais trabalhos científicos que estudaram o efeito do ângulo de abertura da base cônica sobre a operação do leito de jorro por métodos experimentais e/ou por simulações.

#### **2.1 O Leito de jorro**

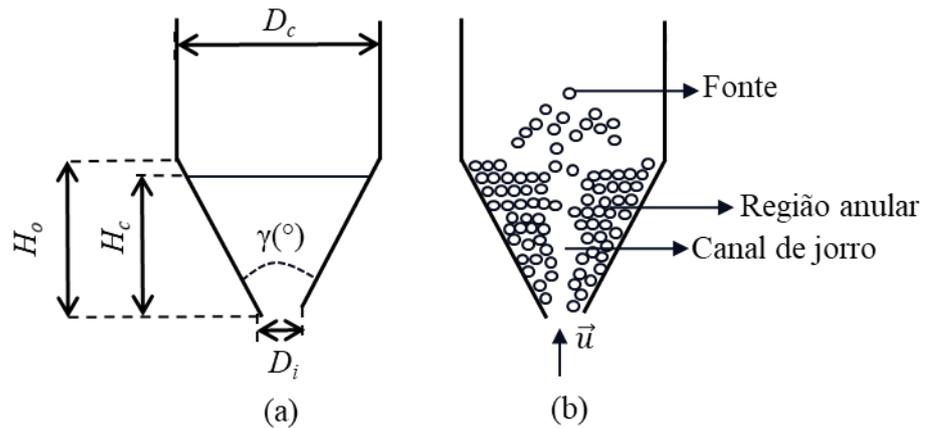
##### **2.1.1 Aspectos gerais**

O leito de jorro é um equipamento que promove o contato entre duas fases: particulada e fluida. Por meio da injeção de ar em um orifício na sua base, usualmente cônica, ocorre a movimentação cíclica das partículas em seu interior, o que resulta em altas taxas de transferência de calor e massa. Tal característica faz com que o equipamento possa ser aplicado em operações de secagem, recobrimento de partículas, granulação, bem como em reações catalíticas (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

O leito de jorro foi desenvolvido por Mathur e Gishler em 1955 durante experimentos de fluidização com partículas grosseiras. A movimentação das partículas, antes aleatória, passou a ser cíclica, dando origem a três comportamentos específicos que definem as regiões anular, de jorro e de fonte. Na região central é estabelecido o jorro, onde o gás e as partículas sobem a alta velocidade, tornando baixa a concentração de partículas. No topo do jorro, encontra-se a região de fonte, onde as partículas lançadas do canal de jorro distribuem-se e iniciam movimento descendente, similar a uma fonte, caindo sobre a superfície do ânulo, localizado entre o jorro e a parede do equipamento. No ânulo as partículas movimentam-se lentamente para baixo, numa região de baixa porosidade em relação às demais. Na Figura 1 pode-se observar as dimensões características e as principais regiões formadas durante o funcionamento do leito de jorro.

O leito de jorro convencional possui uma base cônica, sobre a qual um cilindro é acoplado (Figura 1). O equipamento é chamado leito de jorro cônico-cilíndrico quando a altura de leito estático compreende sua porção cônica e cilíndrica. Se o leito estático corresponder apenas à região cônica, ele é denominado leito de jorro cônico. A base cônica do leito pode apresentar diferentes aberturas, representadas pelo parâmetro ângulo de cone ( $\gamma$ ).

Figura 1 - Desenho esquemático do leito de jorro: (a) Parâmetros geométricos; (b) Movimentação das partículas e regiões formadas no equipamento.



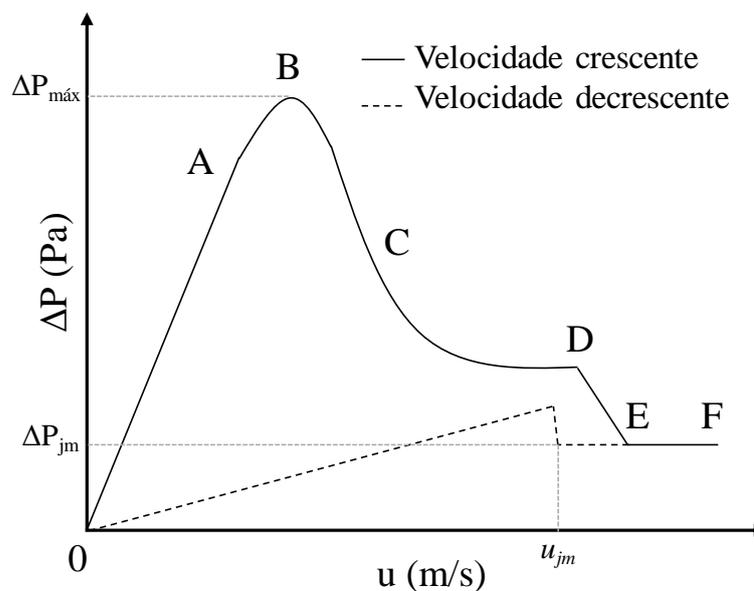
Fonte: Acervo pessoal.

A curva característica do leito de jorro fornece parâmetros importantes para o estudo fluidodinâmico do equipamento. Ela consiste em um gráfico que relaciona a vazão ( $Q$ ) ou velocidade de entrada de ar ( $u$ ) com a queda de pressão ( $\Delta P$ ) correspondente no leito, pelo qual pode-se obter a velocidade de jorro mínimo ( $u_{jm}$ ), a queda de pressão na condição de jorro mínimo ( $\Delta P_{jm}$ ) e a máxima queda de pressão ( $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ). A Figura 2 ilustra uma curva característica de leito de jorro, indicando qualitativamente o comportamento da queda de pressão pela vazão de gás.

Por meio da curva característica, pode-se observar a transição entre o regime de leito estático para o de um leito em operação de jorro. MATHUR e EPSTEIN (1974) descreveram esse mecanismo de transição em algumas etapas que podem ser identificadas na curva e observadas na Figura 2. Primeiramente, o leito se comporta como leito estático ou fixo, no qual o gás que entra a baixas velocidades percola a região porosa sem movimentar as partículas. Assim, a queda de pressão aumenta com o aumento da velocidade do gás (A). Após a velocidade do ar ser suficiente para o início do arraste das partículas, ocorre a formação de uma pequena cavidade côncava pouco acima do bocal de entrada de gás. As partículas ficam comprimidas

nessa região, o que provoca diminuição na porosidade, dificultando a passagem de ar. Dessa forma, a queda de pressão continua aumentando (B). Aumentando-se a velocidade do gás, a altura da cavidade interna torna-se maior que a altura de sólidos empacotados logo acima, o que diminui a resistência ao escoamento do gás. Assim, a pressão cai (C). Com o aumento da velocidade de gás, ocorre o rompimento da camada de partículas, resultando na queda de pressão e no início do jorro (D-E). Para maiores velocidades de gás o ar passa pela região de jorro, o que provoca elevação da fonte, afetando pouco a queda de pressão (F).

Figura 2 - Curva característica do leito de jorro: queda de pressão versus vazão de gás.



Fonte: Acervo pessoal.

Devido ao maior empacotamento das partículas no início da operação (vazão crescente), é necessária uma maior vazão de ar para rompimento do leito e início do jorro. Portanto, a obtenção das condições de jorro mínimo ( $\Delta P_{jm}$  e  $u_{jm}$ ) é feita analisando a velocidade decrescente de ar, cujos resultados são reproduzíveis (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Além das condições de mínimo jorro e máxima queda de pressão, há outros parâmetros relevantes para o estudo do leito de jorro, tais como a velocidade das partículas, a altura da fonte, o diâmetro e a porosidade do canal de jorro. Tais parâmetros afetam a circulação de sólidos no leito e dependem das características do material particulado utilizado, da geometria do equipamento e das condições operacionais empregadas.

### 2.1.2 A circulação dos sólidos

Determinar a circulação das partículas no leito de jorro é fundamental para estabelecer comparações sobre seu desempenho em diferentes geometrias, bem como avaliar a eficiência do equipamento na transferência de calor e massa (ALTZIBAR *et al.*, 2013).

Os autores que avaliaram a circulação das partículas no leito de jorro utilizaram diversas abordagens: obter visualmente o tempo em que uma partícula demarcada demora para aparecer e reaparecer na fonte (ALTZIBAR *et al.*, 2013; SALDARRIAGA *et al.*, 2015); utilizar simulações para fazer um rastreamento mais preciso da movimentação da partícula (GOLSHAN *et al.*, 2017); ou então determinar a vazão mássica de partículas no canal de jorro por meio do perfil axial de velocidade dos sólidos e porosidade, obtidos pela solução numérica de equações de balanço de massa e quantidade de movimento (DAY e LITTMAN, 1987).

SPREUTELS *et al.* (2016) mediram o tempo de circulação das partículas em um leito de jorro utilizando uma partícula-traçador carregada com radiação. Detectores de radiação foram posicionados ao longo da parte externa do cone e traçaram o movimento de uma única partícula ao longo das regiões de jorro, fonte e ânulo. O valor médio dos tempos de ciclo foi obtido para várias alturas de leito estático e velocidades de entrada de ar. O uso dessa técnica não-intrusiva possibilitou a determinação das porcentagens do tempo de ciclo total que a partícula permaneceu em cada região do leito.

Existem algumas complicações para obter o tempo de ciclo da fase sólida diretamente. Quando esse parâmetro é medido experimentalmente pela observação do tempo necessário para uma partícula aparecer e reaparecer na fonte, existem grandes variações nos valores dos resultados coletados, por exemplo, 11,8 s a 22,6 s em ALTZIBAR *et al.* (2013). Devido às diversas trajetórias que o sólido pode descrever no interior do equipamento, são necessárias várias medidas para se obter uma média representativa, como apresentado por SALDARRIAGA *et al.* (2015) e SPREUTELS *et al.* (2016) que fizeram 120 e 500 medições para cada configuração, respectivamente. Partículas com menor granulometria também apresentam complicações na medida de seu tempo de ciclo devido à dificuldade em identificá-las e monitorá-las visualmente. Outra alternativa é medir a velocidade das partículas e a porosidade no canal de jorro usando técnicas como a inserção de sondas ou o uso do leito de jorro semicilíndrico, porém esses métodos podem ser inadequados já que alteram o escoamento original (BÉTTEGA *et al.*, 2010; SANTOS *et al.*, 2012).

Além das avaliações quantitativas da circulação de sólidos, dadas pelo tempo de ciclo da partícula e pela vazão de sólidos no canal, também pode-se analisar a qualidade dessa circulação. Uma das limitações apresentadas pela configuração convencional do leito de jorro é o “curto-circuito” das partículas, ou seja, o retorno de sólidos que estão na região anular para a região de jorro antes de atingirem as posições mais próximas ao bocal de entrada de ar e completarem um ciclo completo. Esse fenômeno ocasiona uma maior distribuição do tempo de residência das partículas, tendo como consequência um produto heterogêneo (MATHUR e EPSTEIN, 1974; VIEIRA NETO, 2007; SANTOS, 2008).

O tubo *draft* consiste em um tubo que é inserido na posição do canal de jorro e canaliza o ar para essa região. O uso desse tubo é a solução usual para impedir o “curto-circuito” das partículas na interface jorro-ânulo, bem como para possibilitar a operação do leito utilizando menores vazões de gás (MATHUR e EPSTEIN, 1974). No entanto, a utilização de tubos *draft* ocasiona a diminuição da recirculação de sólidos no leito e um menor contato entre as fases fluida e sólida. Conseqüentemente, leitos de jorro sem tubo *draft* apresentam melhores performances em operações de secagem (OLAZAR *et al.*, 2012).

De acordo com os estudos apresentados, a vazão mássica de sólidos no canal de jorro, o tempo de ciclo da fase sólida, bem como o fenômeno do “curto-circuito” das partículas foram fatores considerados por diversos autores como diretamente relacionados à circulação da fase sólida no leito de jorro. A circulação dos sólidos, por sua vez, está envolvida na transferência de calor e massa entre as fases no leito.

### 2.1.3 Distribuição de temperaturas

Estudar o mecanismo pelo qual ocorre a transferência de calor entre o fluido e o leito de sólidos é um passo essencial para a compreensão de interações mais complexas envolvidas em processos de secagem em leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

MATHUR e EPSTEIN (1974) analisaram os aspectos gerais da transferência de calor no leito de jorro. Como no canal de jorro o gás assume maiores velocidades, bem como há uma maior porosidade, o coeficiente de transferência de calor na região do jorro é muito maior que no ânulo, podendo assumir diferentes valores conforme as propriedades do material particulado, a escala do equipamento e os parâmetros operacionais utilizados. O ânulo, por sua vez, é a região que recebe as partículas aquecidas no canal de jorro que se depositam na sua parte superior. Tais partículas transferem calor por condução ao seu reunirem às demais, bem como

trocam calor com o ar que percola essa região. Assim, o ânulo possui uma função indireta na transferência de calor, funcionando como um dissipador de calor (“*heat sink*”) para os sólidos que circulam. Ainda segundo os autores, o gás no ânulo atinge o equilíbrio térmico com o leito de sólidos a poucos centímetros acima de sua posição de entrada no leito. Já para o gás no canal de jorro, a distância necessária para ocorrer esse equilíbrio térmico com os sólidos seria de uma ordem de magnitude uma ou duas vezes maior. Tais fatores reforçam a importância da circulação da fase sólida para a transferência de calor no leito, já que envolve a frequência e posição (altura) da passagem de sólidos no canal de jorro.

FREITAS e FREIRE (2001) determinaram os coeficientes de transferência de calor gás-sólido em leito de jorro cônico-cilíndrico ( $H_o = 15$  cm;  $D_c = 20$  cm) com tubo *draft*, alimentado com esferas de vidro. Os autores obtiveram os perfis de temperatura do ar no canal de jorro, bem como a temperatura do ar e do sólido no ânulo. A temperatura do ar foi medida por termopares, enquanto a temperatura do sólido foi medida por uma técnica calorimétrica. No ânulo, a temperatura do ar apresentou variação de cerca de 1 °C, indicando que ela permanece aproximadamente constante nessa região ao longo da operação. Os perfis de temperatura confirmaram que a transferência de calor gás-sólido ocorre principalmente na região central do canal de jorro. Os resultados mostraram que o número de Nusselt em leitos de jorro pode ser correlacionado como função do número de Reynolds e da fração volumétrica de partículas.

BROWN e LATTIMER (2013) estudaram as características da transferência de calor gás-sólido em um leito de jorro pseudo-2D utilizando uma câmera de infravermelho que obtinha a temperatura dos sólidos de forma global e local pela medição da radiação térmica. O leito possuía 5,6 cm de comprimento por 5,0 cm de largura, com altura de leito estático de 5,0 cm composta por esferas de vidro de 550  $\mu$ m. As maiores temperaturas foram observadas no canal de jorro, pouco acima da posição de entrada, como também no centro da fonte. O ânulo apresentou temperatura aproximadamente constante. O coeficiente de transferência de calor foi calculado ao longo do eixo axial do leito, apresentando os maiores valores entre a altura correspondente ao leito estático e o centro da fonte.

Ressalta-se que pela via experimental existe uma dificuldade na obtenção de parâmetros de interesse tanto para a circulação dos sólidos quanto para a distribuição de temperaturas no leito, tais como o perfil de fração volumétrica e a velocidade de sólidos no canal de jorro, o diâmetro e o formato do canal de jorro, como também a distribuição local e global de temperaturas no leito. Essa dificuldade reside no elevado custo de equipamentos de medida não-intrusivos ou que não perturbem o escoamento original do leito. O estudo do leito de jorro

por meio de CFD tem sido importante alternativa para a obtenção dos parâmetros de operação a custos menores. Desde que haja adequada validação dos dados simulados com os experimentais disponíveis, essa ferramenta faz boa previsão dos fenômenos de transporte que ocorrem no leito.

#### 2.1.4 Simulação por CFD

Há duas abordagens que são normalmente utilizadas nas simulações do escoamento multifásico do leito de jorro por CFD: Euler-Euler e Euler-Lagrange. A principal diferença entre as abordagens está no tratamento da fase sólida.

Nas simulações Euler-Euler ambas as fases são tratadas como contínuas e interpenetrantes, cuja soma das frações volumétricas ocupadas é igual a 1 (um), e são modeladas pela aplicação das leis de conservação de massa e momento. Incluído nessa abordagem, o modelo Euleriano Granular é frequentemente utilizado para representar a dinâmica da fase sólida no leito de jorro, de acordo com o modelo granular proposto por LUN *et al.* (1984).

A abordagem Euler-Lagrange também trata a fase fluida como contínua, cujo movimento é descrito pelas equações de Navier-Stokes. No entanto, a fase sólida é modelada individualmente, sendo possível incluir efeitos de interação entre partículas com base em balanços de força aplicados a cada uma. Portanto, essa abordagem resulta em um elevado número de equações para sistemas com muitas partículas. Para o leito de jorro, é importante considerar as interações partícula-partícula já que na região do canal do jorro ocorre a fluidização da fase sólida. Uma forma de resolver computacionalmente as interações citadas é pelo Método dos Elementos Discretos (DEM).

Como as simulações pelo acoplamento CFD-DEM preveem o movimento individual de cada partícula, a principal desvantagem dessa abordagem é o elevado esforço computacional e os problemas de convergência, sobretudo para domínios computacionais de maior escala nos quais há elevada quantidade de sólidos. Por essas razões, a maioria dos trabalhos que simularam leitos de jorro por CFD utilizaram o modelo Euleriano para a fase granular.

MOLINER *et al.* (2018) compararam o uso do DEM e do modelo granular Euleriano para simulações CFD da fase sólida em leitos de jorro, apontando as vantagens e desvantagens de cada abordagem. Ambos os modelos previram a fluidodinâmica do leito de jorro, sendo possível identificar as regiões características. O CFD-DEM reproduziu com maior precisão a fração volumétrica e a velocidade dos sólidos no leito. No entanto, os autores ressaltaram que

utilizar o modelo granular Euleriano é mais indicado para simular geometrias maiores, com grande quantidade de partículas.

Nesta seção são apresentados apenas trabalhos de simulação que utilizaram o modelo Euleriano Granular por ter sido essa a abordagem empregada neste trabalho. São descritos trabalhos que mostraram boa concordância entre os dados experimentais e simulados, bem como informações importantes para a definição do modelo matemático empregado nas simulações desta dissertação.

#### *Determinação de parâmetros e procedimentos para a simulação*

DU *et al.* (2006) estudaram o efeito de modelos de arraste sobre a fluidodinâmica de leitos de jorro por meio de CFD, comparando as respostas das simulações com os resultados experimentais obtidos por HE *et al.* (1994) para a porosidade e velocidade das partículas em várias posições do leito. A análise quantitativa dos resultados mostrou que o modelo de arraste provoca diferenças consideráveis no comportamento da fase sólida nas simulações. O modelo de GIDASPOW *et al.* (1992) apresentou a melhor concordância dos dados experimentais e simulados de modo quantitativo e qualitativo. Após o estudo de DU *et al.* (2006), houve frequente utilização do modelo de arraste de GIDASPOW *et al.* (1992) para leitos de jorro (SANTOS, 2008; BÉTTEGA *et al.*, 2009; ZHANG *et al.*, 2013; HOSSEINI *et al.*, 2016).

BÉTTEGA *et al.* (2009a) avaliaram a influência do coeficiente de especularidade nos parâmetros de operação de um leito de jorro semi-cilíndrico por meio de CFD, verificando assim a importância da inserção do efeito do atrito entre a fase particulada e a parede plana em simulações. O autor concluiu que o coeficiente possui forte influência sobre o comportamento dinâmico da fase particulada, influenciando a altura máxima da fonte e a velocidade dos sólidos. Entretanto, a variação do coeficiente de especularidade entre os valores de 0 a 0,2 teve efeito pouco pronunciado na pressão estática, na fração de sólidos no canal de jorro e na velocidade da fase fluida no leito.

SOBIESKI (2010) discutiu os principais aspectos para desenvolver a simulação de um leito de jorro para análise de sua fluidodinâmica. Entre as observações do autor sobre a malha computacional, houve a conclusão de que a forma das células pouco influencia os resultados finais da simulação, no entanto, a quantidade de células afeta a fração volumétrica da fase particulada e a altura da fonte.

*Estudo da fluidodinâmica*

LOURENÇO (2006) realizou estudo experimental e de simulação envolvendo operação de leito de jorro com partículas de soja. Foi obtida boa concordância entre dados experimentais e simulados para a curva característica de queda de pressão *versus* vazão de ar. Para a altura de leito estático de 0,19 m, o desvio entre a vazão de jorro mínimo experimental e simulada foi de 1,9%, já para a queda de pressão de jorro mínimo, esse desvio foi de 8,5%. Não foram incorporados modelos de turbulência.

SANTOS *et al.* (2009) realizaram simulações tridimensionais da fluidodinâmica do leito de jorro convencional e do leito de jorro com tubo *draft* nas mesmas condições experimentais de DUARTE (2006), LOURENÇO (2006) e VIEIRA NETO (2007), respectivamente. Os resultados foram comparados com os dados experimentais da literatura e, também, com as simulações com domínio 2D axissimétrico realizadas por cada um dos autores. As simulações tridimensionais previram satisfatoriamente a curva característica de queda de pressão *versus* vazão de ar, apresentando boa concordância com os dados experimentais de vazão decrescente de ar para ambos os casos. A previsão da vazão de jorro mínimo por meio de simulações apresentou baixo desvio relativo aos dados experimentais tanto para simulações 3D quanto para simulações 2D, embora a simulação 3D tenha apresentado menor desvio. Já para a identificação da queda de pressão de jorro mínimo, as simulações 3D mostraram desvios relativos menores que os obtidos nas simulações 2D, indicando maior precisão da abordagem tridimensional para prever a queda de pressão no leito de jorro convencional e no leito de jorro com tubo *draft*.

BÉTTEGA *et al.* (2010) compararam a fluidodinâmica de um leito de jorro semicilíndrico com a de um leito de jorro cilíndrico convencional por meio de testes experimentais e simulações CFD. Foi verificado que a inclusão da parede no centro do leito provoca uma redução na velocidade das partículas na região de jorro, porém não altera significativamente a porosidade do leito nas posições mais distantes do canal central. Os valores de pressão estática apresentaram pequena variação entre ambos os sistemas. Os autores ainda salientaram que o uso do leito de jorro semicilíndrico não deve ser feito para prever experimentalmente a altura da fonte de um leito de jorro cilíndrico, já que a fricção das partículas na parede ocasiona uma diminuição significativa no valor desse parâmetro.

HOSSEINI *et al.* (2014) simularam a fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo *draft* pelo modelo Euleriano incorporando a teoria cinética do escoamento granular. O modelo proposto apresentou boa concordância com dados experimentais dentro de uma ampla gama de vazões de gás e parâmetros geométricos, como o diâmetro e altura do tubo *draft*.

SANTOS *et al.* (2015) estudaram o comportamento fluidodinâmico de um leito de jorro operando com mistura binária de partículas de mesma densidade e diâmetros diferentes por meio de testes experimentais e simulação CFD. Utilizaram o método de superfície de resposta para quantificar o efeito das variáveis composição da mistura e altura de leito estático sobre a condição de mínimo jorro, bem como sobre o fenômeno de segregação. O modelo utilizado nas simulações via CFD mostrou-se adequado para prever a hidrodinâmica e a condição de jorro mínimo em leitos de jorro, sendo uma ferramenta que pode ser aplicada em leitos operando em processos que envolvam mistura de partículas.

#### *Avaliação de aspectos geométricos e de aumento de escala*

BÉTTEGA *et al.* (2009b) reportaram que embora seja desejável utilizar o mesmo fluido e partícula ao realizar a operação de aumento de escala de um equipamento, o leito de jorro requer que as propriedades da fase fluida e sólida sejam diferentes em cada escala para ser possível atender a todas as relações de similaridade. Portanto, realizaram estudo de aumento de escala de leitos de jorro por meio da CFD empregando as relações de similaridade, provenientes de análises dimensionais propostas por HE *et al.* (1997). As relações de aumento de escala foram bem representadas pelas simulações CFD, indicando a capacidade dessa ferramenta avaliar o método de similaridade. Foi verificado que quando não são atendidas todas as relações de aumento de escala, ou seja, o aumento de escala é feito utilizando as mesmas propriedades do fluido e da partícula, podem ocorrer situações nas quais a velocidade de entrada de ar é subestimada ou superestimada, o que provoca uma entrada de ar fisicamente incoerente ou jorro instável.

SANTOS *et al.* (2012) investigaram possíveis perturbações causadas no escoamento em leitos de jorro devido à inserção de sondas de fibra óptica via experimental e por simulações. Para todas as condições operacionais estudadas, a introdução da sonda no leito causou perturbações no escoamento, diminuindo a altura máxima da fonte e deslocando esta em relação ao eixo axial do leito, na direção oposta ao local de inserção da sonda.

BATISTA *et al.* (2018) apresentaram simulações CFD Euler-Euler em leito de jorro operando com diferentes distribuidores de ar: tubo reto e Venturi. Os perfis fluidodinâmicos obtidos mostraram que, apesar de promover uma maior queda de pressão no leito, o bocal tipo Venturi distribuiu o ar de maneira mais uniforme na entrada, além de apresentar um jorro mais estável quando comparado ao tubo reto.

### *Transferência de calor*

DA ROSA (2010) estudou os fenômenos de transferência de momento, calor e massa em leite de jorro contínuo com alimentação de partículas pela base por meio de simulações CFD utilizando abordagem Euler-Euler. Foi possível prever de modo quantitativo e qualitativo o comportamento fluidodinâmico e de transferência de calor entre fases no leite. O autor utilizou a correlação de KMIEC (1980) para estimar o número de Nusselt, bem como implementou o conceito de condutividade térmica efetiva das fases (KUIPERS *et al.* 1992) em suas simulações.

FATTAHI *et al.* (2016) estudaram o coeficiente de transferência de calor entre gás e partícula em regimes de jorro e fluidizado, empregando simulações por modelo Euleriano. Também avaliaram o coeficiente de especularidade, concluindo que tal parâmetro possui um elevado efeito sobre o comportamento das partículas e sobre a formação de jorro instável. Os autores também constataram que os resultados da CFD para o comportamento fluidodinâmico e de transferência de calor no leite são bastante sensíveis em relação ao valor do coeficiente de especularidade.

BATISTA (2017) realizou simulações de transferência de quantidade de movimento e calor em leite de jorro, analisando o efeito da altura de leite estático. O modelo foi validado pelos dados de BRITO *et al.* (2016), que fizeram estudos experimentais de secagem de grãos de sorgo. As simulações nas quais foram empregadas as correlações de GUNN (1978) e KMIEC (1980) para cálculo do número de Nusselt apresentaram coerência com os dados experimentais para várias temperaturas de entrada de ar e alturas de leite estático analisadas.

Os trabalhos de simulação apresentados reforçam que a CFD é uma poderosa ferramenta para estudos da fluidodinâmica do leite de jorro para diferentes geometrias. Após a validação dos dados simulados com os experimentais, pode-se obter resultados detalhados sobre a movimentação do fluido e das partículas no leite, bem como a distribuição de temperaturas no sistema.

## **2.2 O estudo do ângulo da base cônica do leite de jorro**

No Quadro 1 constam alguns trabalhos que estudaram o emprego de diferentes ângulos da base cônica dos leitos de jorro, no qual pode ser observado o tipo de leite estudado, a forma de abordagem (experimental ou por simulação), a natureza da partícula utilizada e os diferentes ângulos estudados.

Quadro 1 - Principais aspectos dos trabalhos presentes na literatura que estudaram o ângulo da base cônica dos leitos de jorro.

Trabalhos que estudaram ângulo de cone	Leito de Jorro			Abordagem		Partícula		Ângulos da base estudados
	Cônico-cilíndrico	Cônico	Base retangular	Experimental	Simulação	Inorgânicas/Inertes	Orgânicas	
OLAZAR <i>et al.</i> (1992)								28°, 33°, 36°, 39°, 45°
OLAZAR <i>et al.</i> (1994)								28°, 33°, 36°, 39°, 45°
SAN JOSÉ <i>et al.</i> (1996)								30°, 50°, 50°, 90°, 120°, 150°
RAGHAVAN <i>et al.</i> (1998)								30°, 60°, 180°
OLAZAR <i>et al.</i> (2001)								30°, 45°, 60°, 120°, 180°
SAN JOSÉ <i>et al.</i> (2005)								30°, 45°, 60°, 120°, 180°
HOSSEINI <i>et al.</i> (2010)								30°, 60°, 90°
SARI <i>et al.</i> (2012)								30°, 45°, 60°
ALTZIBAR <i>et al.</i> (2013)								28°, 36°, 45°
ZHANG <i>et al.</i> (2013)								30°, 60°, 90°
LIU <i>et al.</i> (2014)								30°, 60°, 90°, 105°, 120°, 150°, 180°
LÜLE <i>et al.</i> (2015)								30°, 45°
MOSTOUFI <i>et al.</i> (2015)								30°, 45°, 60°
PERAZZINI <i>et al.</i> (2015)								45°, 60°, 75°
SALDARRIAGA <i>et al.</i> (2015)								28°, 33°, 36°, 45°
HOSSEINI <i>et al.</i> (2016)								60°, 180°
GOLSHAN <i>et al.</i> (2017)								20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°
SETAREHSHENAS <i>et al.</i> (2017)								30°, 45°

Os primeiros estudos sobre o ângulo de cone do leito de jorro incluem trabalhos experimentais, nos quais diferentes cones foram utilizados e testados no equipamento. Devido à melhoria na capacidade de processamento dos computadores e ao avanço dos modelos matemáticos que geraram boa concordância dos resultados simulados com os valores experimentais, a literatura mais recente passou a apresentar estudos desse parâmetro por meio de simulações empregando CFD. Também pode-se observar a escassez de trabalhos que

utilizaram partículas de material orgânico, predominando os trabalhos que empregaram materiais como esferas de vidro, polietileno e zircônia.

CUI e GRACE (2008) apresentam uma revisão sobre os principais estudos até então elaborados na área de operação de biomassa em leito de jorro. Nesse estudo, o conceito de biomassa refere-se a toda matéria orgânica de origem vegetal. Os autores alertaram que a complexidade e ampla variedade de partículas de biomassa faz com que testes experimentais sejam requeridos em quase todos os casos. No entanto, ressaltam que a CFD é uma ferramenta útil, sobretudo para estudos de aumento de escala do equipamento, desde que sejam incorporados modelos de interação entre partículas adequados.

Nas seções seguintes serão apresentados trabalhos que estudaram o ângulo de cone em leito de jorro, como também os estudos de simulação que foram utilizados para o embasamento teórico desta dissertação.

### **2.2.1 Abordagens experimentais**

OLAZAR *et al.* (1992) compararam os resultados de diversas correlações para cálculo da velocidade de mínimo jorro com dados experimentais para diferentes geometrias, ângulos de cone e material particulado. Concluíram que para leitos cônicos rasos o diâmetro de entrada de ar é o aspecto geométrico que possui maior influência na fluidodinâmica do leito. No entanto, para alturas de leito estático elevadas, o efeito do ângulo de cone torna-se tão importante quanto o do diâmetro de entrada. O valor de  $28^\circ$  foi apontado como limite inferior para o ângulo de cone a fim de que ocorra jorro estável.

SAN JOSÉ *et al.* (1996) estudaram a influência de fatores geométricos da base cônica na fluidodinâmica do leito de jorro, bem como diferentes diâmetros de esferas de vidro, delimitando os intervalos desses parâmetros para os quais fosse possível uma operação estável do equipamento. Os autores calcularam correlações para o cálculo da velocidade de jorro mínimo, a queda de pressão em operação estável, a queda de pressão máxima e a porosidade do leito quando o jorro é mínimo. Os autores indicaram que à medida que o ângulo da base aumenta, a velocidade de jorro mínimo e a queda de pressão no leito diminuem.

Segundo MATHUR e GISHLER (1955), acredita-se que as partículas no ânulo movem-se verticalmente para baixo e radialmente para o centro, seguindo um caminho aproximadamente parabólico. Sendo assim, EVIN *et al.* (2008) realizaram testes experimentais com leitos de jorro nas formas parabolóide, esférica e convencional para estudar a influência

das diferentes geometrias da base do leito sobre a secagem de trigo. O volume das três bases era o mesmo. Para os testes hidrodinâmicos, utilizaram a mesma altura de leito estático. Para os testes de secagem, mantiveram a mesma massa de sólidos (5 kg). O leito de jorro com base paraboloide obteve a maior taxa de secagem.

ALTZIBAR *et al.* (2013) e SALDARRIAGA *et al.* (2015) estudaram a influência do diâmetro do bocal de entrada de ar, geometria e posicionamento do tubo *draft*, bem como do ângulo de cone sobre o tempo de ciclo das partículas em leito de jorro cônico. Foi observado experimentalmente o tempo decorrido para uma partícula desaparecer e reaparecer na fonte. Os autores concluíram que o tempo de ciclo dos sólidos tornou-se menor à medida que se diminuiu o ângulo de cone. Como foi mantida a mesma altura de leito estático para cada experimento, os autores observaram que tal resultado também ocorreu devido à diminuição da massa de sólidos alimentados para os leitos com menores ângulos. Por exemplo, o leito com cone de 45° apresentou carga de sólidos 70% maior que aquela alimentada no leito com cone de 28°.

PERAZZINI *et al.* (2015) realizaram estudos de secagem de leite desnatado em leito de jorro com diferentes ângulos de cone (45°, 60° e 75°) e configurações de bocal de entrada de ar tipo tubo reto e Venturi. Os autores concluíram que o bocal tipo Venturi promoveu uma melhor estabilidade no leito. Além disso, o ângulo de cone de 45° associado ao bocal Venturi proporcionou uma maior capacidade de secagem. Os autores ressaltaram a importância de não limitar os estudos de secagem apenas às características do material ou partícula empregado, em vista da importância das características geométricas e operacionais do equipamento.

### 2.2.2 Abordagens por simulação CFD

Considerando a facilidade de modificar a geometria do leito por simulação CFD, além do menor custo, alguns autores têm estudado a influência do ângulo de cone do equipamento por técnicas computacionais. De modo geral, nesses trabalhos o modelo matemático é validado com dados experimentais para apenas uma configuração e então utilizado novamente para outras geometrias de modo a prever o comportamento fluidodinâmico e térmico do leito nessa nova condição. Serão apresentados alguns trabalhos que utilizaram esse método.

ZHANG *et al.* (2013) investigaram a influência do ângulo de cone, tamanho de partícula, diâmetro do cilindro e altura de leito estático sobre a dinâmica do leito de jorro utilizando o Modelo Euleriano Granular. Analisaram a influência desses parâmetros sobre a movimentação das partículas, altura de fonte, porosidade do leito e velocidade das partículas

na região de jorro. Os autores utilizaram modelos matemáticos previamente validados em outros trabalhos por dados experimentais para então estender a simulação para outras condições. Foram avaliados ângulos de cone de 30°, 60° e 90°. Para uma mesma velocidade de entrada de ar e altura de leito estático, foi observado jorro instável para o ângulo de 30° e jorro estável para o de 60°. Para o ângulo de cone de 90°, foi necessária uma maior velocidade entrada de ar para ocorrer o jorro.

LIU *et al.* (2014) avaliaram o efeito da geometria da parte cônica de leitos de jorro cônico-cilíndricos no escoamento gás-sólido por CFD com malhas tridimensionais, utilizando modelo Euleriano. Foram simulados 7 diferentes ângulos de cone, variando de 30° a 180° e mantendo a mesma velocidade de entrada de ar para cada simulação. Foi encontrado que para ângulos de cone menores que 30° ocorreu jorro instável. O ângulo de  $\gamma = 105^\circ$  para a base cônica do leito de jorro apresentou-se como valor limite para o comportamento fluidodinâmico do jorro, já que para  $\gamma < 105^\circ$  houve diminuição da altura da fonte, velocidade das partículas e porosidade na região de jorro, enquanto que o comportamento inverso foi observado para  $\gamma > 105^\circ$ . O ângulo de 105° apresentou a menor porosidade quando comparado aos demais ângulos de cone em uma mesma altura. Por essa razão, os autores inferiram que nesse ângulo a maioria das partículas foram envolvidas e carregadas pela corrente de gás, explicando as menores velocidades de partícula e altura de fonte para essa condição.

GOLSHAN *et al.* (2017) estudaram a velocidade de jorro mínimo e os perfis laterais e axiais de velocidade de esferas de vidro em leitos de jorro cônicos para seis diferentes ângulos de cone ( $\gamma = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$  e  $70^\circ$ ) via simulações CFD-DEM. Para todas as simulações, foi mantida a altura de leito estático de 10 cm. Os autores observaram que a velocidade de jorro mínimo obtida nas simulações aumentou à medida que maiores ângulos de cone foram utilizados. Foi observado um aumento da taxa de circulação de sólidos com o aumento do ângulo de cone, embora o tempo de um ciclo (movimento da partícula da fonte até sua reentrada na região de jorro pela base do leito) tenha sido menor para o ângulo de 50°. Os autores observaram que para ângulos mais fechados menos partículas percorreram um ciclo completo (descendo até próximo à região de entrada de gás), pois as partículas entravam na região de jorro em posições mais elevadas.

HOSSEINI *et al.* (2016) investigaram a fluidodinâmica e o coeficiente de transferência de calor transiente gás-partícula em um leito de jorro 2D retangular para ângulos de cone de 60° e 180°, utilizando o modelo Euleriano. O efeito da função de distribuição radial de partículas também foi avaliado. O modelo de LUN e SAVAGE (1986) mostrou melhor

concordância com dados experimentais de BROWN e LATTIMER (2013) para temperaturas próximas à parede, enquanto o modelo de MA e AHMADI (1986) e IDDIR e ARASTOPOUR (2005) mostraram melhores previsões na região de fonte. A mudança de ângulo de cone de  $180^\circ$  para  $60^\circ$  promoveu alta redução das zonas mortas, mantendo jorro estável e uniforme.

Segundo os trabalhos apresentados, pode-se observar que a circulação dos sólidos e a distribuição de temperaturas no leito de jorro foram importantes aspectos avaliados a fim de comparar o desempenho do equipamento para diferentes ângulos de cone.

### 2.3 Considerações

Analisando os resultados dos trabalhos que avaliaram o ângulo de cone do leito de jorro tanto experimentalmente quanto por simulação, pode-se observar que ainda são necessários mais estudos sobre esse parâmetro geométrico e seu efeito no comportamento do equipamento. Dependendo da configuração do leito abordada por cada autor, bem como o método empregado, diferentes ângulos foram recomendados como mais adequados para a melhor circulação dos sólidos no leito, *e.g.*  $105^\circ$  conforme LIU *et al.* (2014) e  $50^\circ$  para GOLSHAN *et al.* (2017). Ademais, foi observado que os trabalhos anteriores procuraram comparar o efeito do ângulo de cone na circulação da fase sólida considerando uma mesma altura de leito estático (ALTZIBAR *et al.*, 2013; SALDARRIAGA *et al.*, 2015). Conseqüentemente, a massa de sólidos alimentados foi diferente para cada geometria, o que interferiu na comparação do tempo de ciclo da fase sólida. A abordagem CFD-DEM apresenta-se como alternativa interessante para a obtenção do tempo de ciclo dos sólidos, no entanto, possui limitações computacionais quando utilizado um número elevado de partículas. Constatam-se ainda os poucos trabalhos que estudaram a influência do ângulo de cone do leito de jorro na transferência de calor entre as fases.

Portanto, observam-se lacunas no estudo desse parâmetro relacionadas ao comportamento fluidodinâmico e térmico do leito. Nesse sentido, este trabalho avaliou as diferentes geometrias com base em uma massa fixa, possibilitando comparar a quantidade de energia requerida por essa carga, tendo como base uma operação de secagem de grãos.

Os estudos que envolveram CFD apresentados nessa seção foram utilizados como referência para a definição do modelo matemático e para a elaboração do método desta dissertação.

## CAPÍTULO 3

### MODELO MATEMÁTICO

Para descrever as fases fluida e sólida nas simulações, foi utilizado o modelo multifásico Euleriano Granular. Como ambas as fases são tratadas como contínuas e interpenetrantes, cujo movimento é descrito pelas equações de conservação, a solução numérica do modelo torna-se viável em domínios computacionais de maior escala e elevado número de partículas, como é o caso dos sistemas de leito de jorro envolvidos neste trabalho (SANTOS *et al.*, 2009). Nesta seção são apresentadas as principais equações que foram empregadas nas simulações apresentadas nesta dissertação, como também as condições de contorno e o procedimento de solução numérica.

#### 3.1 Fluidodinâmica

Na abordagem Euler-Euler, as equações de conservação possuem uma estrutura similar para cada fase. Essas equações são resolvidas com a adição de relações constitutivas provenientes de modelos empíricos e da aplicação da Teoria Cinética de Escoamentos Granulares.

##### 3.1.1 Conservação da massa e do movimento

A equação da continuidade para as fases fluida ( $f$ ) e sólida ( $s$ ) é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (3.2)$$

$$\alpha_s + \alpha_f = 1 \quad (3.3)$$

Em que  $\alpha_q$ ,  $\rho_q$ , e  $\vec{v}_q$  são a fração volumétrica, densidade e velocidade da fase  $q$ , respectivamente. As frações volumétricas são funções contínuas no tempo e no espaço, cuja soma é igual a um. Os balanços de momento para cada fase são dados pelas equações:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} - K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (3.5)$$

Em que  $p$  é a pressão,  $p_s$  é a pressão dos sólidos,  $\bar{\tau}_q$  é o tensor das tensões viscosas da fase  $q$ , e  $K_{fs}$  coeficiente de troca de momento entre fases. O termo  $(\vec{v}_f - \vec{v}_s)$  indica a velocidade relativa entre as fases.

O tensor das tensões viscosas para cada fase é definido por:

$$\bar{\tau}_f = \alpha_f \mu_f (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) + \alpha_f \left( \lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f \right) \nabla \cdot \vec{v}_f \bar{I} \quad (3.6)$$

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \alpha_s \left( \lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (3.7)$$

Em que  $\mu_f$  é a viscosidade cisalhante do gás,  $\mu_s$  é a viscosidade cisalhante granular,  $\lambda_f$  é a viscosidade bulk do gás,  $\lambda_s$  é a viscosidade bulk granular e  $\bar{I}$  é o tensor unitário. Os termos granulares (referentes à fase sólida) são descritos na Teoria Cinética Granular, apresentada na seção 3.1.3.

### 3.1.2 Modelo de arraste

O leito de jorro apresenta regiões onde o comportamento fluidodinâmico de cada fase é bastante distinto. No canal de jorro, o ar e o sólido encontram-se a altas velocidades, porém, na região anular essas fases estão a baixas velocidades. Além disso, há alta fração volumétrica da fase sólida no ânulo quando comparada à baixa fração no canal de jorro. Considerando essas características, o arraste entre fases é um fenômeno cuja descrição é importante em simulações do leito de jorro. O coeficiente de troca de momento entre fases inclui o fator de arraste que, de acordo com o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992), apresenta a forma:

$$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65}, \quad \alpha_f > 0,8 \quad (3.8)$$

$$K_{sf} = K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \quad \alpha_f \leq 0,8 \quad (3.9)$$

Em que  $d_s$  é o diâmetro da partícula e  $C_D$  é o coeficiente de arraste, baseado no número relativo de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} \left[ 1 + 0,15 (\alpha_f Re_s)^{0,687} \right] \quad (3.10)$$

$$Re_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (3.11)$$

### 3.1.3 Teoria Cinética Granular

Com a finalidade de descrever a pressão e as viscosidades cisalhante e bulk para a fase sólida que estão presentes no tensor de sólidos, LUN *et al.* (1984) desenvolveram a Teoria Cinética Granular, que se baseia na Teoria Cinética dos Gases. O conceito de temperatura granular é definido nessa teoria de forma análoga à temperatura termodinâmica para gases, sendo proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas.

$$\theta_s = \frac{1}{3} (c^2) \quad (3.12)$$

Em que  $c$  é a flutuação da velocidade para a fase sólida.

A equação do transporte segundo a Teoria Cinética Granular é representada por DING e GIDASPOW (1990):

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{fs} \quad (3.13)$$

Aqui,  $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão da temperatura granular;  $\gamma_{\theta_s}$  é a dissipação de energia ocasionada pelas colisões e  $\phi_{fs}$  é a troca de energia entre a fase sólida e fluida. O termo  $(-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s) : \nabla \vec{v}_s$  é definido como a geração de energia pelo tensor tensão da fase sólida.

O coeficiente de especularidade ( $\phi$ ) é um valor que representa o atrito da fase sólida no contorno da parede. Na Teoria Cinética Granular, seu valor está incluído na descrição da tensão de cisalhamento da fase sólida na parede ( $\bar{\bar{\tau}}_p$ ), conforme Equação 3.14 (JOHNSON e JACSON, 1987). Esse valor de tensão substitui o tensor da fase sólida  $\bar{\bar{\tau}}_s$  da equação 3.13 em regiões próximas à parede. O valor de  $\phi$  varia entre 0 e 1, representando as condições de mínimo e

máximo atrito das partículas na parede, respectivamente.

$$\bar{\tau}_p = -\frac{\pi}{6} \sqrt{3} \phi \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \rho_s g_0 \sqrt{\theta_s} \vec{v}_{s,w} \quad (3.14)$$

O termo de pressão nos sólidos define a pressão exercida pela fase sólida para escoamentos granulares em regime compressível, que é calculada independentemente e usada no termo do gradiente de pressão (Equação 3.13). A equação (LUN *et al.*, 1984) para a pressão dos sólidos apresenta termos para a cinética e para a colisão entre partículas:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1+e_{ss}) \alpha_s^2 g_0 \theta_s \quad (3.15)$$

Em que  $g_0$  é a função de distribuição radial e  $e_{ss}$  é o coeficiente de restituição sólido-sólido. Esse coeficiente varia de 0 a 1 e determina a elasticidade do choque, sendo que para o valor 1 o choque é totalmente elástico e para o valor 0 o choque é totalmente inelástico.

A função de distribuição radial ( $g_0$ ) descreve as modificações que ocorrem no transporte cinético das partículas de acordo com o empacotamento local. OGAWA *et al.* (1980) propuseram uma função para descrever o movimento característico de materiais sólidos em estado de fluidização:

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.16)$$

A difusão de energia é quantificada pelo termo  $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$ , no qual  $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão (GIDASPOW *et al.*, 1982):

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384(1+e_{ss})g_0} \left[ 1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_0 (1+e_{ss}) \right]^2 + 2\alpha_s^2 \rho_s d_s (1+e_{ss}) g_0 \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.17)$$

A dissipação de energia devido às colisões entre partículas é dada pela equação de LUN *et al.* (1984).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_0}{d_s\sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (3.18)$$

A troca de energia cinética devido às flutuações aleatórias na velocidade das partículas entre as fases sólida e fluida é quantificada por GIDASPOW *et al.* (1992).

$$\phi_{fs} = -3K_{fs}\theta_s \quad (3.19)$$

O tensor tensão da fase sólida contém as viscosidades *bulk* e cisalhantes oriundas da troca de momento entre sólidos devido aos movimentos translacional e de colisão.

A viscosidade *bulk* leva em conta a resistência das partículas à compressão e expansão e é dada segundo LUN *et al.* (1984):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1+e_s) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.20)$$

A viscosidade cisalhante para a fase sólida é o resultado da soma dos termos de colisão, cinético e de fricção. As duas primeiras parcelas foram equacionadas segundo GIDASPOW *et al.* (1992). O componente de fricção leva em conta as tensões resultantes do atrito entre partículas quando a fase sólida atinge sua fração volumétrica máxima. A equação de SCHAEFFER (1987) foi utilizada para descrever esse efeito.

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.21)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1+e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.22)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96\alpha_s (1+e_{ss})g_0} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1+e_{ss})\right]^2 \quad (3.23)$$

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \text{sen } \phi_\sigma}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (3.24)$$

### 3.1.4 Turbulência

O modelo de turbulência k-ε atua resolvendo duas equações de transporte separadas, que são baseadas em considerações fenomenológicas e empirismo: uma para a energia cinética

turbulenta ( $k$ ) e outra para a taxa de dissipação ( $\varepsilon$ ). Para esse modelo, destacam-se a robustez, economia de tempo e precisão razoável para uma ampla gama de escoamentos turbulentos (FLUENT THEORY GUIDE, 2011).

Há três variações do modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$ : Mistura, disperso e por fase. O Modelo de mistura é indicado para escoamentos multifásicos estratificados, por exemplo, quando há líquido escoando no fundo de um tubo e gás escoando ao longo do topo. O modelo disperso é adequado quando há uma fase primária contínua, na qual há uma fase secundária dispersa diluída. Nesse caso, movimento aleatório das partículas é definido pela turbulência da fase primária. Já o modelo por fase (*per phase*) é indicado para sistemas em que a transferência de momento turbulento entre as fases é dominante.

A região de jorro em que a velocidade das partículas gera escoamento turbulento é a região de jorro, na qual há baixa porosidade e onde ocorre maior transferência de momento entre as fases (SANTOS, 2008). Assim, o modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$  para a fase dispersa foi adotado nas simulações.

A descrição da turbulência da fase dispersa é realizada a partir da teoria de Tchen (HINZE, 1975) para a dispersão de partículas. As equações que descrevem o modelo são apresentadas conforme o FLUENT THEORY GUIDE (2011).

#### 3.1.4.1 Turbulência na fase fluida

Segundo o modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$ , o tensor das tensões de Reynolds para a fase fluida aplicado na equação da conservação da quantidade de movimento é da forma:

$$\bar{\tau}_f'' = -\frac{2}{3}(\rho_f \kappa_f + \rho_f \mu_{f,t} \nabla \cdot \vec{v}_f) \bar{I} + \rho_f \mu_{f,t} (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) \quad (3.25)$$

Em que  $\kappa_f$  é a energia cinética turbulenta na fase fluida e  $\mu_{f,t}$  é a viscosidade turbulenta.

A viscosidade turbulenta é escrita em termos da energia cinética da fase fluida:

$$\mu_{f,t} = \rho_f C_\mu \frac{\kappa_f^2}{\varepsilon_f} \quad (3.26)$$

Em que  $\varepsilon_f$  é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta na fase fluida e  $C_\mu$  é um parâmetro da turbulência ( $C_\mu = 0,09$ ).

Os efeitos da turbulência na fase fluida são obtidos conforme:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \kappa_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \kappa_f) = \nabla \cdot \left( \alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_k} \nabla \kappa_f \right) + \alpha_f G_{\kappa,f} - \alpha_f \rho_f \varepsilon_f + \alpha_f \rho_f \Pi_{\kappa,f} \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \varepsilon_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \varepsilon_f) = \nabla \cdot \left( \alpha_f \frac{\mu_{t,f}}{\sigma_k} \nabla \varepsilon_f \right) + \alpha_f \frac{\varepsilon_f}{k_f} \left( C_1 G_{k,f} - C_2 \rho_f \varepsilon_f \right) + \alpha_f \rho_f \Pi_{\varepsilon,f} \quad (3.28)$$

Em que  $\Pi_{\kappa,f}$  e  $\Pi_{\varepsilon,f}$  representam a influência da fase dispersa na propriedade  $\kappa$  e na propriedade  $\varepsilon$  da fase fluida, respectivamente;  $G_{\kappa,f}$  é o termo de geração de energia cinética turbulenta e  $C_1$  e  $C_2$  são parâmetros de turbulência ( $C_1 = 1,44$ ;  $C_2 = 1,92$ ).

#### 3.1.4.2 Turbulência na fase sólida

O tempo característico de relaxação da partícula relacionado aos efeitos inerciais agindo na fase dispersa é definido como:

$$\tau_{F,sf} = \alpha_s \rho_s K_{fs}^{-1} \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} + C_V \right) \quad (3.29)$$

Em que  $C_V$  é um parâmetro da turbulência ( $C_V = 0,5$ ).

Segundo SIMONIN e VIOLLET (1990), as quantidades referentes à turbulência para a fase discreta são:

$$\kappa_s = \kappa_f \left( \frac{b^2 + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (3.30)$$

$$\kappa_{sf} = 2 \kappa_f \left( \frac{b + \eta_{sf}}{1 + \eta_{sf}} \right) \quad (3.31)$$

$$D_{t,sf} = \frac{1}{3} \kappa_{sf} \tau_{t,sf} \quad (3.32)$$

$$D_s = D_{t,sf} + \left( \frac{2}{3} \kappa_s - b \frac{1}{3} \kappa_{sf} \right) \tau_{F,sf} \quad (3.33)$$

$$b = (1 + C_V) \left( \frac{\rho_s}{\rho_f} + C_V \right)^{1/2} \quad (3.34)$$

Em que  $\eta_{fs}$  é a razão entre o tempo integral Lagrangeano ( $\tau_{t,sf}$ ) calculado ao longo da trajetória das partículas e o tempo característico de relaxação da partícula ( $\tau_{F,sf}$ ).

### 3.2 Transferência de calor

No modelo Euleriano, as partículas são tratadas como uma fase contínua, deixando de ser abordadas em sua individualidade. Assim, o perfil de temperaturas no interior de uma partícula não é considerado pelo modelo, mas sim, a média local da temperatura de um conjunto de partículas. Nas simulações de transferência de calor do escoamento gás-sólido do leito de jorro, a resistência à transferência de calor por convecção do gás para a fase sólida é considerada muito maior que a resistência a transferência de calor em seu interior (DA ROSA, 2010; MATHUR e EPSTEIN, 1974).

As equações de conservação de energia para as fases fluida e sólida são dadas por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f H_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f H_f) = -\alpha_f \frac{\partial p_f}{\partial t} + \bar{\tau}_f : \nabla \vec{v}_f - \nabla \cdot \alpha_f k_{f,eff} \nabla T_f + h_{fs} (T_s - T_f) \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s H_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s H_s) = -\alpha_s \frac{\partial p_s}{\partial t} + \bar{\tau}_s : \nabla \vec{v}_s - \nabla \cdot \alpha_s k_{s,eff} \nabla T_s - h_{fs} (T_s - T_f) \quad (3.36)$$

Em que  $\bar{\tau}_q : \nabla \vec{v}_q$  é o termo referente à dissipação viscosa. O terceiro termo do lado direito da equação refere-se ao fluxo de calor por condução, enquanto o quarto termo representa a transferência de calor entre as fases, descrita conforme o mecanismo convectivo.  $H_q$  e  $k_{q,eff}$  são a entalpia e a condutividade térmica efetiva da fase  $q$  (sólida ou fluida), respectivamente, e  $h_{fs}$  é o coeficiente convectivo de transferência de calor entre as fases.

A variação da condutividade térmica da fase fluida ( $k_f$ ) com a temperatura foi considerada por meio de uma UDF (*User Defined Function*). A UDF é uma função escrita em linguagem C que é interpretada pelo *software* Fluent a fim de implementar propriedades, equações empíricas ou comportamentos das variáveis que não estão disponíveis na interface padrão.

A entalpia da fase  $q$  é obtida pela Equação 3.27:

$$H_q = \int c_{p,q} dT_q \quad (3.37)$$

Em que  $c_{p,q}$  é o calor específico da fase  $q$ . Neste trabalho, o valor de  $c_p$  foi considerado constante para ambas as fases.

De acordo com a correlação utilizada para cálculo do número de Nusselt, o valor de  $h_{fs}$  é obtido por diferentes equações. O modelo de GUNN (1978) para  $Nu_s$  para a transferência de calor entre fases foi usado e é da forma:

$$Nu_s = (7 - 10\alpha_f + 5\alpha_f^2) \left( 1 + 0,7Re_s^{0,2}Pr_s^{\frac{1}{3}} \right) + (1,33 - 2,4\alpha_f + 1,2\alpha_f^2) Re_s^{0,7} Pr_s^{\frac{1}{3}} \quad (3.38)$$

Para o qual o coeficiente de transferência de calor por unidade de volume é dado por:

$$h_{fs} = \frac{6k_f\alpha_s Nu_s}{d_s^2} \quad (3.39)$$

Segundo a correlação de KMIEC (1980), o  $Nu_s$  e o  $h_{fs}$  são calculados pelas equações:

$$Nu_s = 0,0451 Re_s^{0,644} Pr_s^{0,333} Ar^{0,226} \left( \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right)^{-0,852} \left( \frac{H_c}{d_s} \right)^{-1,47} \left( \frac{D_c}{d_s} \right)^{0,947} \xi^{2,304} \quad (3.40)$$

$$h_{fs} = \frac{6k_f\alpha_s Nu_s}{d_s^2} \quad (3.41)$$

Em que  $Ar$  é o número de Archimedes;  $\gamma$  é ângulo da base cônica;  $H_c$  é a altura de leito estático e  $\xi$  é o fator de forma das partículas.

Para descrever a transferência de calor pelo modelo Euleriano, a condutividade térmica para a fase fluida e para a fase sólida deve ser interpretada como uma propriedade de transporte efetivo. Sendo assim, não se pode utilizar o valor da condutividade térmica específica para cada componente ( $k_f$  e  $k_s$ ), já que a condutividade no leito também dependerá da porosidade. O modelo de ZEHNER e SCHLÜNDER (1970) foi empregado por KUIPERS *et al.* (1992) para obter uma equação para a condutividade térmica efetiva do leito. O modelo foi originalmente desenvolvido para ser utilizado em leitos fixos, mas também foi aplicado para estimar a condutividade em leitos de jorro (DA ROSA, 2010; FATTAHI *et al.*, 2016). Segundo os autores, a condutividade térmica efetiva no leito para a fase fluida é da forma:

$$k_{f,eff} = \frac{\left( 1 - \sqrt{1 - \alpha_f} \right)}{\alpha_f} k_f \quad (3.42)$$

Em que  $k_{f,eff}$  tende a  $k_f$  quando  $\alpha_f \rightarrow 1$ .

A condutividade térmica efetiva da fase particulada depende do contato entre as partículas no leito e é obtida pela equação:

$$k_{s,eff} = \frac{\sqrt{(1-\alpha_f)}}{\alpha_s} k_f (\omega A + (1-\omega)\Gamma) \quad (3.43)$$

$$\Gamma = \frac{2}{1-\frac{B}{A}} \left[ \frac{B(A-1)}{A \left(1-\frac{B}{A}\right)^2} \ln\left(\frac{A}{B}\right) - \frac{(B-1)}{1-\frac{B}{A}} - \frac{(B+1)}{2} \right]$$

Considerando partículas esféricas, tem-se os termos:

$$A = \frac{k_s}{k_f}, B = 1,25 \left[ \frac{(1-\alpha_f)}{\alpha_f} \right]^{\frac{10}{9}}; \omega = 7,26 \cdot 10^{-3}$$

A implementação dos termos de condutividade efetiva para as fases fluida e sólida nas simulações foi feita por meio de uma UDF (DA ROSA, 2010).

### 3.3 Condições de contorno

Para a fluidodinâmica, foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Entrada de fluido: Entrada de ar na direção axial com perfil uniforme de velocidade;
- Saída: Pressão atmosférica prescrita.
- Simetria axial;
- Parede: Não-deslizamento para a fase fluida. Deslizamento parcial para a fase sólida.

Para os contornos de entrada e saída referentes à turbulência, foi utilizado o método de intensidade de turbulência (I) e escala de comprimento (L), cujos parâmetros foram calculados por meio das Equações 3.34 e 3.35, disponíveis no FLUENT USER'S GUIDE (2011). Na entrada, foram definidos I=4,42%; L=0,0021 m e na saída I=5,61%; L=0,021 m, com comprimento de escala calculado como proporcional ao menor diâmetro do bocal de entrada (Venturi) e ao diâmetro da parte cilíndrica, respectivamente.

$$I = 0,16 \text{ Re}^{-1/8} \quad (3.44)$$

$$\ell = 0,07L \quad (3.45)$$

Para a transferência de calor, foram definidas as condições de contorno:

- Entrada: Temperatura uniforme da fase fluida;
- Saída: Calor é transferido por convecção ( $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$ );
- Simetria axial;
- Parede: Adiabática.

### 3.4 Solução numérica

Para resolução das equações do modelo, foi empregado o *software* de CFD ANSYS Fluent 14.0. Nesse código computacional, as equações de balanço de massa, energia e quantidade de movimento são discretizadas no domínio e então resolvidas pelo método dos volumes finitos. O Quadro 2 mostra o *hardware* utilizado neste trabalho.

Quadro 2 - Infraestrutura computacional.

Etapa do trabalho	Plataforma	Núcleos	Características principais
Estudo de parâmetros de simulação	Windows 32 bits	4	Intel Core 2 Extreme 3.0 GHz 4 GB RAM Nvidia GeForce 8500 GT
Simulações 2D de Fluidodinâmica e Transferência de calor	Windows 64 bits	8	Intel Core i5-3450 3.1 GHz 8 GB RAM AMD Radeon HD 7500 Series
	Windows 64 bits	8	Intel Core i7-7700K 4.2 GHz 16 GB RAM Intel HD Graphics 630

O Quadro 3 contém a estrutura do modelo empregado e os parâmetros de simulação para modelagem fluidodinâmica e de transferência de calor.

Quadro 3 - Características do procedimento de simulação utilizado para a simulação da fluidodinâmica e da transferência de calor do leito de jorro.

Aspecto da simulação	Fluidodinâmica	Transferência de calor
Passo no tempo (s)	$10^{-5}$	$10^{-4}$
Número máximo de iterações por passo no tempo	100	100
Método de solução	Acoplamento pressão-velocidade pelo esquema SIMPLE Discretização <i>Upwind</i> de 2ª ordem para o momento; <i>Upwind</i> de 1ª ordem fração volumétrica e turbulência; <i>Upwind</i> de 1ª ordem para energia Formulação transiente: Implícita de 1ª ordem	
Critério de convergência	$10^{-4}$ para a continuidade $10^{-3}$ para as demais equações.	
Parâmetros de relaxação	Entre 0,2 e 1	
Coefficiente de restituição sólido-sólido	0,9	

## CAPÍTULO 4

### **AVALIAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA DO LEITO DE JORRO PARA DIFERENTES ÂNGULOS DA BASE CÔNICA**

O procedimento de avaliação da fluidodinâmica do leito de jorro para diferentes ângulos da base cônica consistiu em algumas etapas. Primeiro, foram construídas e testadas as malhas computacionais. Em seguida, o modelo computacional foi validado por meio da comparação das respostas das simulações com os resultados experimentais de um leito de jorro com cone de 60°. Considerando que houve descrição satisfatória do comportamento do leito, o mesmo modelo foi utilizado para prever o comportamento de geometrias com diferentes ângulos de cone e condições operacionais. O método e os resultados das simulações referentes à parte de transferência de calor encontram-se no Capítulo 5.

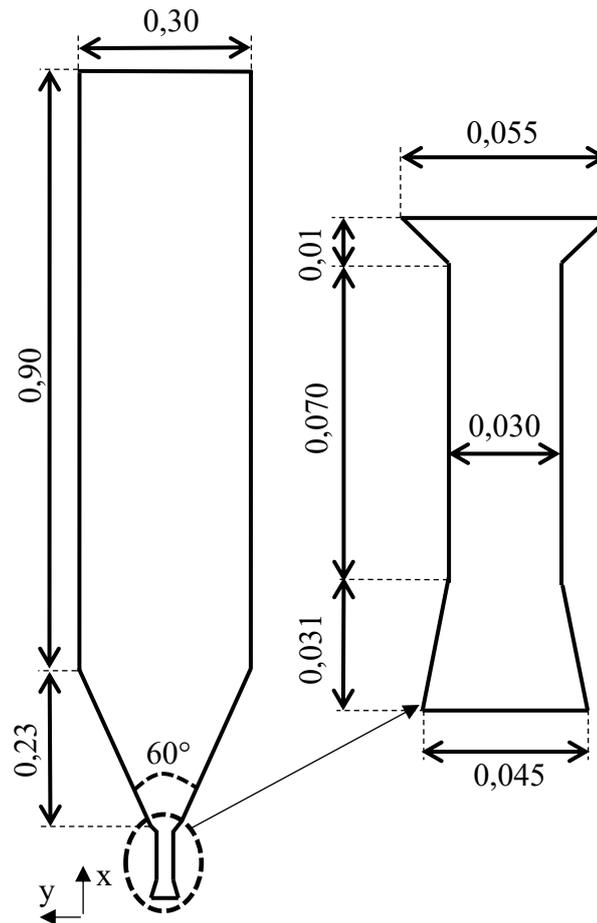
#### **4.1 Método**

##### **4.1.1 Condições de simulação e geometria do sistema de referência**

O comportamento fluidodinâmico e térmico do leito de jorro foi simulado com base na mesma unidade experimental utilizada por BRITO *et al.* (2016), BRITO *et al.* (2017) e BATISTA (2017). As dimensões do leito são apresentadas na Figura 3. O bocal Venturi foi incluído no domínio computacional das simulações deste trabalho para a alimentação do ar no leito, visto que garante uma melhor distribuição de gás para a região anular e maior estabilidade do equipamento (BATISTA *et al.*, 2018).. Para avaliar os diferentes ângulos de cone, foram mantidas as mesmas dimensões do Venturi e da parte cilíndrica, fazendo a alteração somente da altura e do ângulo da base cônica.

Os parâmetros físicos, bem como as propriedades das partículas e do fluido que foram adotados nas simulações estão contidos na Tabela 1. Ressalta-se que os parâmetros referentes à parte térmica foram utilizados somente nas simulações de transferência de calor.

Figura 3 - Leito de jorro e bocal Venturi (dimensões em m).



Fonte: Acervo pessoal

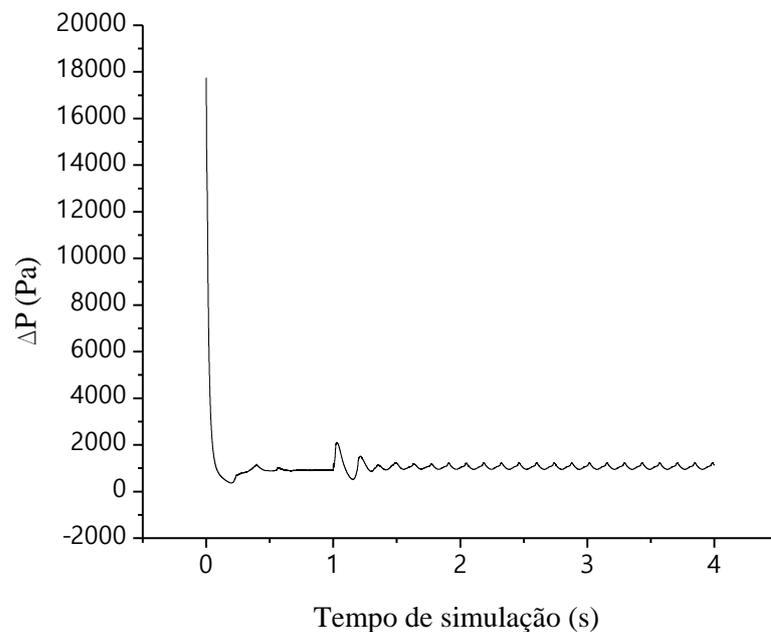
Tabela 1 - Condições experimentais adotadas nas simulações.

Parâmetro	Descrição	Valor adotado nas simulações
$\alpha_{s,máx}$	Fração volumétrica de sólidos máxima	0,63 <sup>[1]</sup>
$d_s$ (m)	Diâmetro médio da partícula (sorgo)	$3,13 \times 10^{-3}$ <sup>[1]</sup>
$\rho_s$ (kg.m <sup>-3</sup> )	Massa específica do sólido (sorgo)	1197 <sup>[1]</sup>
$c_{p,s}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Calor específico do sólido (sorgo)	1391,93 <sup>[2]</sup>
$k_s$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Condutividade térmica do sólido (sorgo)	0,097688 <sup>[2]</sup>
$\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )	Massa específica do ar	1,204 <sup>[3]</sup>
$\mu_f$ (Pa.s)	Viscosidade do ar	$1,825 \times 10^{-5}$ <sup>[3]</sup>
$k_f$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Condutividade térmica do ar	0,0257 <sup>[4]</sup>
$c_{p,f}$ (J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Calor específico do ar	1007 <sup>[3]</sup>

<sup>[1]</sup> BRITO *et al.* (2017); <sup>[2]</sup>SHARMA e THOMPSON (1973) *apud* BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL (1992); <sup>[3]</sup>ÇENGEL e CIMBALA (2011); <sup>[4]</sup>INCROPERA; BERGMAN; DEWITT (2008).

Todas as respostas das simulações apresentadas foram calculadas realizando uma média no tempo após estabelecimento de regime pseudo-estacionário do leito de jorro, durante o qual foi observado comportamento estável das variáveis. Por exemplo, para obter o resultado da queda de pressão na entrada do leito, foi gerado no Fluent um arquivo de flutuação de pressão, com coleta de dados na frequência de 10.000 Hz. A Figura 4 apresenta o comportamento dos dados simulados de queda de pressão na entrada do leito com o tempo para uma das condições simuladas. Após cerca de 1,5 s foi observada a estabilização do leito e atingido o regime pseudo-estacionário. Os valores de pressão apresentados correspondem à média calculada para o segundo final, no intervalo de 3,0 a 4,0 s.

Figura 4 - Flutuação da queda de pressão simulada ( $\gamma = 60^\circ$ ;  $m_p = 4,0$  kg;  $u = 15,7$  m/s)



#### 4.1.2 Teste de valores do coeficiente de especularidade

O coeficiente de especularidade descreve nas simulações o efeito do atrito entre a fase sólida e a parede (BÉTTEGA *et al.*, 2009a). Como foram avaliados vários ângulos de cone do leito de jorro, o deslizamento da fase sólida na parede torna-se um parâmetro importante para que os resultados simulados sejam fisicamente consistentes. Geralmente, o contorno da fase sólida na parede é definido como condição de não-deslizamento (*no-slip*). No entanto, alguns trabalhos indicaram que o uso do deslizamento parcial forneceu resultados mais próximos aos dados experimentais (BÉTTEGA *et al.*, 2009a; FATTAHI *et al.*, 2016; HOSSEINI *et al.*, 2014).

Por esses motivos, foi analisada a influência do coeficiente de especularidade na fluidodinâmica do leito a fim de definir o valor a ser utilizado nas simulações.

Foram trabalhados alguns valores do coeficiente de especularidade: 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 e 1,0, bem como a condição de não-deslizamento, para o leito com ângulo de cone de 60°. Em cada simulação, foi utilizada a mesma velocidade de entrada de ar (15,7 m/s) e massa alimentada de 4,0 kg de partículas de sorgo. Foi analisada a influência do coeficiente sobre a vazão mássica de partículas no canal de jorro (calculada conforme apresentado na seção 4.5.1), bem como sobre a estabilidade do leito na simulação por meio da análise dos vetores de velocidade dos sólidos.

Para definir o valor do coeficiente de especularidade, foi verificado o desvio do resultado das simulações para o tempo de ciclo da fase sólida (calculado conforme apresentado na seção 4.5.1) em relação a uma correlação da literatura. SPREUTELS *et al.* (2016) estudaram experimentalmente o tempo de ciclo de esferas de vidro de 3 mm de diâmetro em leito de jorro, traçando o posicionamento das partículas por meio de radiação. Os autores desenvolveram uma correlação para cálculo de  $t_c$  (Equação 4.1) para leitos de jorro com ângulo de cone de 60°, válida nos intervalos  $u/u_{ms}$  [1,0;1,3] e  $H_c/D_i$  [5,35;9,3], que estão de acordo com as condições simuladas neste teste. Os resultados das simulações foram comparados com o valor de  $t_c$  dado por essa correlação a fim de definir o valor do coeficiente de especularidade a ser utilizado.

$$t_c = 1,62 \left( \frac{u}{u_{mj}} \right)^{-1,45} \left( \frac{H_c}{D_i} \right)^{0,73} \quad (4.1)$$

#### **4.1.3 Validação do modelo fluidodinâmico**

A validação do modelo computacional foi feita somente para o sistema com dados experimentais disponíveis, ou seja, para o sistema com ângulo de cone de 60°. Foram utilizados os dados de BRITO *et al.* (2016), obtidos na mesma unidade experimental da Figura 3. Após a validação do modelo, o mesmo conjunto de equações e solução numérica foi utilizado para simular configurações com outros ângulos de base cônica.

O modelo matemático utilizado para descrever a fluidodinâmica do leito de jorro foi validado comparando os dados experimentais e simulados da curva característica de queda de pressão pela vazão de ar na entrada. Foram utilizados os dados experimentais de BRITO *et al.* (2016) referentes à altura de leito estático de 0,20 m, correspondendo a 4,0 kg de sorgo alimentado.

#### **4.1.4 Teste de malhas computacionais**

Todas as malhas foram construídas utilizando o *software* GAMBIT 2.4.6. O teste de malhas computacionais foi feito somente para o sistema de leito de jorro com cone de 60° por meio do *Grid Convergence Index* (GCI). As demais configurações seguiram o mesmo espaçamento entre células determinado pelo teste.

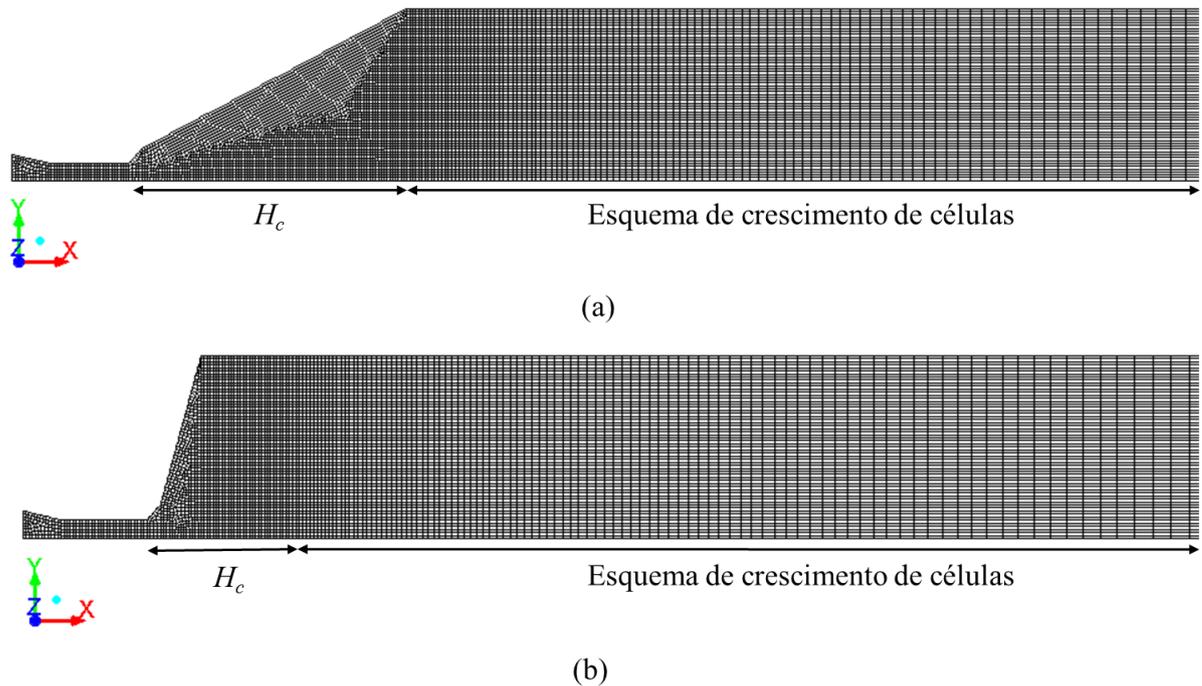
As malhas computacionais foram construídas na forma bidimensional, considerando o domínio do leito de jorro como simétrico ao longo do eixo axial em coordenadas cilíndricas.

Foram empregados diferentes esquemas de fechamento de malha conforme a região do leito. Na região cilíndrica, foi utilizada malha estruturada com elementos quadrilaterais por meio do esquema “*map*”. Já para a região cônica e do bocal de entrada Venturi, foi adotada a opção “*pave*”, que executa o fechamento de uma malha quadrilateral não-estruturada. Sendo assim, todo o domínio foi discretizado utilizando somente elementos quadrilaterais.

Como vários ângulos de cone foram avaliados, foi necessário estabelecer critérios para avaliar e comparar os resultados das simulações envolvendo malhas de diferentes geometrias. Para todas as malhas foi mantido o mesmo número de células por unidade de área para a região cônica e abaixo da altura de leito estático, onde os gradientes de velocidade e fração volumétrica das fases são maiores (BÉTTEGA *et al.*, 2009c). Para as regiões da parte cilíndrica acima da altura de leito estático, manteve-se o esquema de crescimento da malha a fim de reduzir a demanda computacional.

Na Figura 5, é exemplificado o esquema de alteração de malhas computacionais para as diferentes geometrias. Para o ângulo de cone de 60°, a altura de leito estático para 4,0 kg de partículas está compreendida apenas na região cônica, que possui em torno de 16 células por cm<sup>2</sup>, valor que foi obtido em testes preliminares de malha. Portanto, foi utilizado o mesmo espaçamento entre células para toda a região cônica. Ao inserir essa mesma massa de partículas (4,0 kg) no leito com ângulo de cone de 150°, a altura de leito estático compreende a região cônica e a região cilíndrica. Portanto, foi mantido o mesmo valor médio de 16 células por cm<sup>2</sup> na porção cônica e cilíndrica, que corresponde à altura do leito estático. Para os leitos, foi admitido o esquema de crescimento da malha na região cilíndrica acima da altura de leito estático.

Figura 5 - Representação esquemática da construção de malhas para as diferentes geometrias adotadas neste trabalho (a) Leito com cone de 60°; (b) Leito com cone de 150°



Foram feitos testes com e sem esquema de crescimento de malha para os cones de 60° e 150°, comparando as respostas de pressão estática na entrada do leito e tempo de ciclo da fase sólida no leito (calculado conforme seção 4.1.5.1). Tal procedimento foi realizado para verificar se a aplicação do esquema de crescimento causaria alteração considerável nos resultados. Para os testes, a mesma massa de partículas ( $m_p = 4,0$  kg) e velocidade de entrada de ar ( $u = 15,7$  m/s) foi utilizada em cada simulação.

O espaçamento entre nós e o número de células foram definidos com base em um teste de independência de malhas, visando a escolha da configuração que conduzisse a resultados coerentes com os dados experimentais, sem demandar excessivo esforço computacional.

O *Grid Convergence Index* (GCI) foi o método utilizado para determinar o grau de refinamento da malha. A descrição completa desse método, bem como do equacionamento envolvido, encontra-se no Apêndice A. Foram analisados os valores de  $a$  obtidos e foi calculado o erro relativo das respostas das simulações (queda de pressão no leito e tempo de ciclo da fase sólida – definido na seção 4.1.5.1) em relação ao valor de  $f_{exato}$  para posterior escolha da malha a ser utilizada nas simulações. O teste foi feito somente para o leito com ângulo de cone de 60° ( $u = 15,7$  m/s;  $m_p = 4,0$  kg). As demais configurações mantiveram o mesmo número de células por unidade de área definidas no teste para ângulo de 60°.

#### 4.1.5 Avaliação de diferentes ângulos da base cônica por CFD

Na etapa de análise fluidodinâmica, buscou-se analisar por simulações CFD a circulação de partículas no leito de jorro conforme variou-se o ângulo do cone. Para comparar a operação de cada geometria, foram observados os resultados de vazão mássica e tempo de ciclo da fase sólida no leito. Primeiro, foram analisados ângulos de cone variando de 30° a 150°. Em seguida, as geometrias que apresentaram maior vazão mássica no canal de jorro foram utilizadas para análise via planejamento fatorial do efeito das variáveis ângulo de cone, massa de sólidos alimentados e velocidade de entrada de ar sobre a vazão mássica e o tempo de ciclo dos sólidos no leito. Finalizando a avaliação fluidodinâmica, foi feita uma análise do fenômeno de curto-circuito da fase sólida (MATHUR e EPSTEIN, 1974), observando a qualidade da circulação de cada configuração apresentada no planejamento fatorial.

##### 4.1.5.1 Cálculo do tempo de ciclo das partículas

A Equação 4.2 apresenta uma abordagem para cálculo da circulação da fase sólida no leito de jorro, pela qual se obtém o tempo médio que uma partícula leva para realizar um ciclo no leito ( $t_c$ ) pela razão entre a massa de sólidos alimentados ( $m_p$ ) e a vazão mássica de sólidos na porção superior do canal de jorro ( $W_s$ ):

$$t_c = \frac{m_p}{W_s} \quad (4.2)$$

Como a massa de sólidos alimentados ao leito é conhecida, pode-se calcular o valor de  $t_c$  após obter  $W_s$ . O procedimento de obtenção de  $W_s$  por meio das simulações no Fluent é descrito a seguir.

Assumindo que o canal de jorro possui formato de um tubo circular através do qual passa uma única fase sólida arrastada pela fase ar, a vazão  $W_s$  pode ser obtida pela Equação 4.3.

$$W_s = \iint_A w_s(r) dA = \iint_A \rho_s v_s(r) (1 - \varepsilon_r(r)) dA = \int_0^{2\pi} \int_0^{R_j} r \rho_s v_s(r) (1 - \varepsilon_r(r)) dr d\theta \quad (4.3)$$

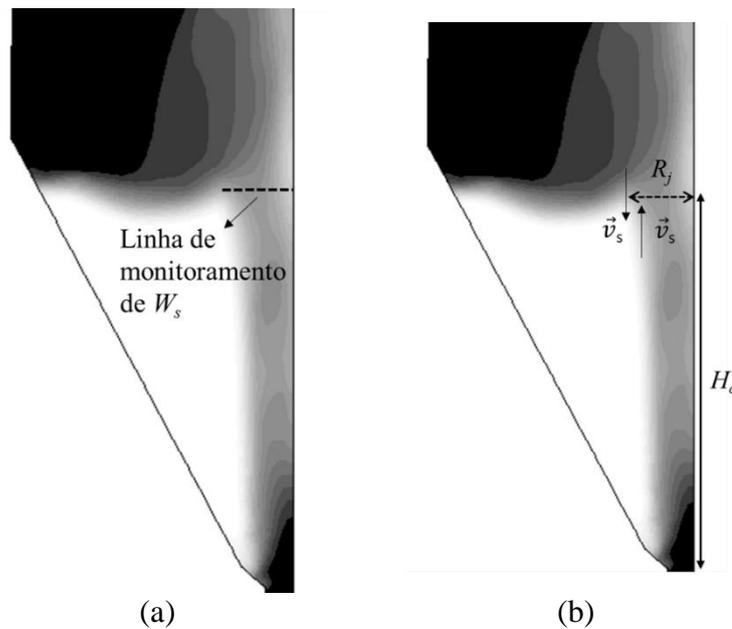
Em que  $w_s$  é o fluxo mássico da fase sólida;  $v_s$  é a velocidade da fase sólida;  $\varepsilon_r$  é a porosidade e  $R_j$  é o raio do canal de jorro. Essa integral, aplicada na posição de saída do canal de jorro, indica a vazão de sólidos lançados na fonte.

O valor de  $W_s$  foi obtido diretamente dos resultados simulados fornecidos pelo próprio *software* Fluent, sendo calculado na mesma altura correspondente ao leito estático de cada condição analisada. Uma função customizada (Equação 4.4) foi criada para calcular o valor de  $w_s$  em cada célula. Por meio da adição de uma linha de coleta e monitoramento de dados com o tempo (Figura 6a), foram obtidos os valores de  $w_s$  para cada célula que constituía o raio do canal de jorro. Com o perfil radial de  $w_s$ , o Fluent realiza a integral desses valores ao longo do raio de modo a obter  $W_s$  para cada instante de tempo. O cálculo foi feito a uma frequência de coleta de 10.000 Hz. Os resultados apresentados representam o valor médio de  $W_s$  após estabilização.

$$w_s = \rho_s v_s \alpha_s \tag{4.4}$$

O raio do canal de jorro para cada condição foi obtido a partir do perfil radial da velocidade axial das partículas. A posição que delimitava o canal de jorro encontrava-se na interface na qual havia inversão do sentido axial do vetor velocidade, ou seja, ascensão de partículas no canal de jorro e descida de partículas na região anular (Figura 6b).

Figura 6 - Esquemas de obtenção de (a)  $W_s$  pelo posicionamento da linha de coleta de dados em  $x = H_c$  no canal de jorro e (b) diâmetro do canal de jorro, pela posição na qual ocorre inversão no sentido axial do vetor velocidade da fase sólida.



Os dados experimentais de SPREUTELS *et al.* (2016) foram usados para validar o método CFD apresentado nesta seção. Nos testes experimentais, os autores caracterizaram o escoamento de esferas de vidro de 3 mm em um leito de jorro cônico ( $D_c = 0,62$  m;  $D_i = 0,028$

m;  $\gamma = 60^\circ$ ) por meio de uma partícula-traçador carregada com radiação. Obtiveram um tempo de ciclo médio para diferentes alturas de leito estático e velocidades de entrada de ar. O sistema de SPREUTELS *et al.* (2016) foi simulado neste trabalho de modo a comparar o tempo médio de ciclo da fase sólida com os dados experimentais. Para cada condição, a massa de sólidos foi calculada considerando um empacotamento máximo de 0,55, resultando em massas de 2,54 e 5,43 kg para os leitos com alturas de leito estático de 0,15 e 0,20 m, respectivamente. As condições experimentais foram simuladas utilizando a mesma configuração de malha, modelos matemáticos e procedimento numérico descritos nas sessões anteriores.

#### 4.1.5.2 Análise para ângulos de cone de $30^\circ$ a $150^\circ$

Segundo os estudos experimentais em leito de jorro cônico feitos por ALTZIBAR *et al.* (2013) e SALDARRIAGA *et al.* (2015), a diminuição do ângulo de cone resulta em um menor tempo de ciclo dos sólidos. No entanto, as análises experimentais desses autores mantiveram a mesma altura de leito estático e diâmetro da parte cilíndrica do leito para todas as condições, observando-se, portanto, variação na massa de sólidos alimentados entre diferentes geometrias. Como o tempo de ciclo é afetado diretamente pela massa de sólidos alimentados (Equação 4.2), estudos adicionais ainda são requeridos a fim de verificar se o menor tempo de ciclo das partículas ocorre devido ao ângulo de cone utilizado ou à carga de sólidos no leito. Buscando investigar essa questão, neste trabalho foi mantida a mesma massa de sólidos alimentados para cada condição simulada, variando-se assim a altura de leito estático entre as diferentes geometrias.

Baseado nas condições experimentais de BRITO *et al.* (2016), onde foi avaliado experimentalmente um leito de jorro com ângulo de cone de  $60^\circ$ , foi feita a análise por CFD da fluidodinâmica desse equipamento para outros seis ângulos de cone:  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $75^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $150^\circ$ . Menores ângulos não foram trabalhados pois, de acordo com OLAZAR *et al.* (1992) e LIU *et al.* (2014), aberturas de cone menores que  $28^\circ$  resultam em jorro inevitavelmente instável. Ademais, foram avaliadas três cargas de partículas ( $m_p$ ) para cada geometria: 2,0; 3,0 e 4,0 kg. Essas massas foram empregadas pois todas resultaram em condição de jorro estável nos experimentos de BRITO *et al.* (2016).

As simulações foram conduzidas com a mesma velocidade de entrada de ar ( $u = 15,7$  m/s), equivalente a 1,35 vezes o jorro mínimo experimental referente ao ângulo de cone de  $60^\circ$ . Dessa forma, procurou-se estabelecer uma comparação entre o desempenho dos leitos quando

uma mesma quantidade de ar é fornecida. As alturas de leito estático e a configuração do leito para cada condição simulada estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Alturas de leito estático correspondentes a cada condição de leito de jorro simulada

Ângulo de cone	Altura de leito estático (m)					
	$m_p = 4,0$ kg		$m_p = 3,0$ kg		$m_p = 2,0$ kg	
<b>30°</b>	0,313	LJC	0,275	LJC	0,229	LJC
<b>45°</b>	0,244	LJC	0,216	LJC	0,180	LJC
<b>60°</b>	0,200	LJC	0,175	LJC	0,150	LJC
<b>75°</b>	0,170	LJCC	0,151	LJC	0,127	LJC
<b>90°</b>	0,148	LJCC	0,129	LJCC	0,109	LJC
<b>120°</b>	0,117	LJCC	0,0983	LJCC	0,0795	LJCC
<b>150°</b>	0,0945	LJCC	0,0758	LJCC	0,0570	LJCC

LJC – Leito de jorro cônico; LJCC – Leito de jorro cônico-cilíndrico

Foram obtidos e comparados os valores de  $W_s$  e  $t_c$  para cada uma das configurações simuladas. Os perfis radiais de velocidade e fração volumétrica da fase sólida no canal de jorro, bem como a queda de pressão também foram analisados.

Os ângulos de cone que favoreceram a circulação de sólidos no leito de jorro foram utilizados para posterior análise via planejamento fatorial.

#### 4.1.5.3 Planejamento fatorial

Em estudos recentes, têm sido utilizadas abordagens combinando a técnica do planejamento fatorial com resultados de simulações CFD a fim de estudar regimes complexos de fluidização, nos quais as variáveis independentes interagem ou as respostas são difíceis de se obter experimentalmente (PALKAR e SHILAPURAM, 2015; SANT’ANNA *et al.*, 2017).

Algumas vantagens podem ser destacadas para justificar a análise da circulação de sólidos via planejamento fatorial em conjunto com respostas provenientes das simulações. Obter por análise experimental a vazão mássica dos sólidos ou seu tempo de ciclo no leito de jorro para cada uma das condições abordadas seria dispendioso, sujeito a imprecisão dos métodos de coleta de dados, bem como a interferências externas. A abordagem por simulações consegue contornar essas desvantagens. Ademais, esta análise busca investigar somente o comportamento qualitativo das respostas de acordo com as variáveis independentes empregadas. Portanto, esses fatores fundamentam o emprego de CFD para obter as respostas dos sistemas deste trabalho.

A fim de estudar o efeito do ângulo de cone sobre a fluidodinâmica do leito de jorro, foi

executado um planejamento fatorial no qual foram avaliados os efeitos do ângulo de cone ( $\gamma$ ), da massa de partículas alimentadas ( $m_p$ ) e da velocidade de entrada de ar ( $u$ ) sobre as respostas simuladas de vazão mássica ( $W_s$ ) e do tempo de ciclo ( $t_c$ ) da fase sólida no leito. Todas as respostas foram obtidas por meio dos resultados de simulações CFD.

Foi executado um planejamento fatorial  $3^3$  completo, sendo simulados três ângulos de cone ( $30^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $60^\circ$ ), três massas de sólido particulado (2,0; 3,0 e 4,0 kg) e três velocidades de entrada de ar (15,7; 16,7 e 17,7 m/s) totalizando 27 simulações. As faixas de variáveis foram escolhidas de modo a selecionar os ângulos de cone que apresentaram os menores tempos de ciclo, bem como combinações de massas de sólidos e velocidades de entrada de ar que resultaram condições de jorro estável para cada configuração analisada. Todos os leitos possuíam configuração de leito de jorro cônico.

Os resultados foram tratados utilizando a metodologia do planejamento fatorial e a técnica de superfícies de resposta com auxílio do *software* Statistica 7.0. Foi feita a regressão múltipla dos dados utilizando nível de significância de 5% para quantificar os efeitos das variáveis envolvidas, além de suas interações e contribuições quadráticas sobre as respostas. As variáveis foram tratadas na sua forma codificada. As Equações 4.5 a 4.7 representam a forma codificada das variáveis ângulo de cone  $\gamma$  ( $^\circ$ ), massa de partículas  $m_p$  (kg) e velocidade do ar de entrada (m/s) em  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ , respectivamente.

$$x_1 = \frac{\gamma - 45}{15} \quad (4.5)$$

$$x_2 = m_p - 3,0 \quad (4.6)$$

$$x_3 = u - 16,7 \quad (4.7)$$

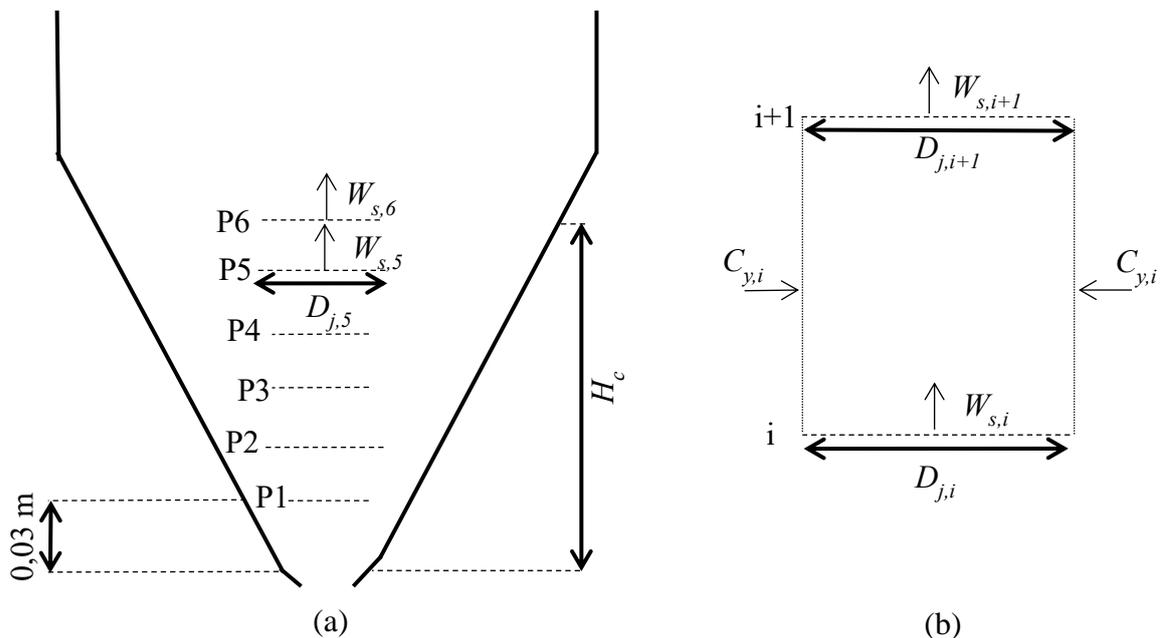
#### 4.1.5.4 Análise de curto-circuito da fase sólida

Para avaliar a qualidade da circulação das partículas, foi feita uma análise do curto-circuito da fase sólida para cada configuração de leito de jorro descrita no planejamento fatorial. Partículas que entram no canal de jorro em alturas próximas ao bocal de entrada de gás fazem uma circulação completa no leito, entrando em contato com as porções mais baixas da região cônica onde o ar é mais quente. Partículas que entram no canal de jorro em alturas mais elevadas possuem um ciclo mais curto, entrando em contato com ar menos quente e permanecendo por menos tempo no canal de jorro em relação àquelas que realizam o ciclo completo. Dessa forma, configurações que promovam ciclos completos da fase sólida beneficiam a transferência de

calor e massa. Assim, foram feitas simulações para avaliar a qualidade da circulação, observando as posições de entrada de sólidos no canal de jorro.

Foram coletados dados de vazão mássica da fase sólida no canal de jorro em seis posições, conforme a configuração de cada leito (Figura 7a). A posição P1 foi definida a 0,03 m acima da entrada, tomando como referência orientações da literatura sobre o posicionamento de tubos *draft*. Essa localização corresponde ao mínimo valor de altura para posicionar um tubo *draft* sem causar bloqueios no escoamento da fase sólida da região anular para o canal de jorro ( $H/d_s = 10$ ) (SAN JOSÉ *et al.*, 2007). A posição P6 equivale à própria altura de leito estático. As demais posições foram definidas de modo a ficarem equidistantes entre elas. Linhas com comprimento igual ao raio do canal de jorro ( $2 \times R_{j,i} = D_{j,i}$ ) foram traçadas em cada uma dessas posições para obtenção da vazão mássica da fase sólida, conforme descrito na seção 4.1.5.1.

Figura 7 - Esquema para avaliação do curto-circuito da fase sólida no leito de jorro (a) posicionamento de linhas de coleta da vazão mássica da fase sólida em diversas posições do canal de jorro; (b) balanço de sólidos no canal de jorro entre as posições  $i$  e  $i+1$ .



Na Figura 7b pode-se observar um esquema do balanço de massa para a fase sólida entre as posições  $i$  e  $i+1$  do canal de jorro. Como há constante interação entre a região anular e de jorro, a taxa de sólidos que entram ( $W_{s,i}$ ) é diferente da taxa de sólidos que deixam ( $W_{s,i+1}$ ) o volume de controle, já que ocorre a entrada de sólidos nas laterais por curto-circuito ( $C_{y,i}$ ). Assim, foram obtidos os valores de  $W_{s,i}$  e  $W_{s,i+1}$  para cada configuração para estimar a taxa de

sólidos que está sendo transportada do ânulo para o canal de jorro. Os resultados da vazão mássica para cada posição do canal de jorro foram comparados entre as diferentes geometrias.

## 4.2 Resultados e discussões

### 4.2.1 Teste de malhas computacionais

Constam na Tabela 3 os resultados do teste de malhas com e sem esquema de crescimento de células para os leitos com ângulos de cone de 60° (B1) e 150° (B1<sub>150</sub>). São apresentadas as respostas simuladas: tempo de ciclo da fase sólida e pressão na entrada do leito, bem como o tempo real de simulação em regime transiente.

Tabela 3 - Comparação entre os resultados de malhas com e sem esquema de crescimento de células acima da altura de leito estático

Malha	Nº células	Ângulo do cone (°)	Esquema de crescimento	$\Delta P$ (Pa)	$t_c$ (s)	Tempo de simulação (h/s) <sup>1</sup>
<b>B1</b>	10778	60	Sim	1057,77	5,49	10:25
<b>B1'</b>	25178	60	Não	1056,33	5,52	13:35
<b>B1<sub>150</sub></b>	8969	150	Sim	346,94	8,10	11:40
<b>B1<sub>150</sub>'</b>	22349	150	Não	354,78	7,90	13:00

<sup>1</sup>Horas de tempo real/segundo de tempo simulado

É possível observar que o esquema de crescimento utilizado no cilindro causou diferença pouco considerável nos resultados obtidos para o tempo de ciclo das partículas e para a queda de pressão no leito, bem como contribuiu para um menor tempo de simulação para ambos ângulos de cone analisados. Como as maiores transferências de quantidade de movimento entre as fases ocorrem na região cônica e o refino nessa região foi o mesmo para todas as malhas apresentadas na Tabela 3, os resultados das simulações foram próximos, mesmo com o incremento do número de células na porção cilíndrica. Portanto, optou-se por executar maior refino e análise da malha na região cônica e manter o esquema de crescimento de células na porção cilíndrica.

Na Tabela 4 são apresentadas as malhas com diferentes refinamentos na parte cônica, juntamente com os resultados apresentados por cada uma delas nas simulações.

Para o refino na região cônica, observa-se que houve maiores diferenças nos dados de pressão e velocidade das partículas, bem como um maior aumento do tempo de simulação para malhas mais refinadas. Utilizando as respostas  $\Delta P$  e  $t_c$ , bem como a configuração das malhas A1, B1 e C1, foi aplicado o teste GCI para determinar a malha a ser empregada nas simulações, cujos resultados constam na Tabela 5.

Tabela 4 - Resultados do teste de malhas com esquema de crescimento na região cilíndrica e diferentes espaçamentos na região cônica

Malha	Nº de células	Células/cm <sup>2</sup> (cone)	Espaçamento entre nós no cone (m)	$\Delta P$ (Pa)	$t_c$ (s)	Tempo de simulação (h/s) <sup>1</sup>
A1	8475	11	0,0030	1004,30	5,71	09:30
B1	10778	16	0,0025	1057,77	5,49	10:25
C1	14585	25	0,0020	1059,84	5,55	11:40

<sup>1</sup>Horas de tempo real/segundo de tempo simulado

Tabela 5 - Valores calculados do teste GCI e erros em relação à solução assintótica.

Parâmetro avaliado	$\Delta P$ (Pa)			$t_c$ (m/s)		
$p$	27,237			12,135		
$\alpha$	0,998			0,990		
GCI <sub>12</sub>	4,034×10 <sup>-5</sup>			2,310×10 <sup>-3</sup>		
GCI <sub>23</sub>	2,487×10 <sup>-3</sup>			1,462×10 <sup>-2</sup>		
$f_{exato}$	1059,87			5,56		
Erro relativo das malhas (%)	A1	B1	C1	A1	B1	C1
	5,244	0,198	0,0032	2,658	1,156	0,184

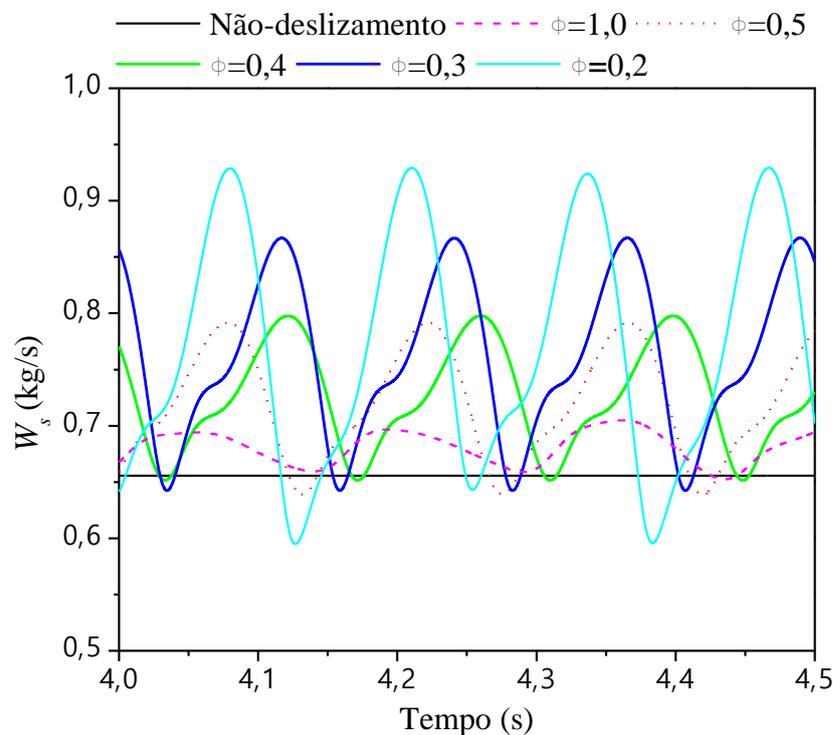
O valor de  $\alpha$  próximo à unidade para cada resposta indicou que as soluções se encontram próximas à região assintótica. O valor  $f_{exato}$  trata-se de uma extrapolação de qual seria a resposta da simulação para uma malha com espaçamento tendendo a zero. O erro relativo é calculado entre  $f_{exato}$  e o valor gerado pela resposta da malha abordada. Ao observar os erros relativos calculados, foi selecionada a malha B1 para a realização das simulações, já que apresentou menor tempo de simulação que a malha C1 e erros de discretização menores que 5%.

Para as demais geometrias do leito, foram utilizadas malhas com o mesmo refino empregado em B1, ou seja, com o mesmo número de células por unidade de área na região delimitada pelo leito estático.

#### 4.2.2 Definição do valor do coeficiente de especularidade

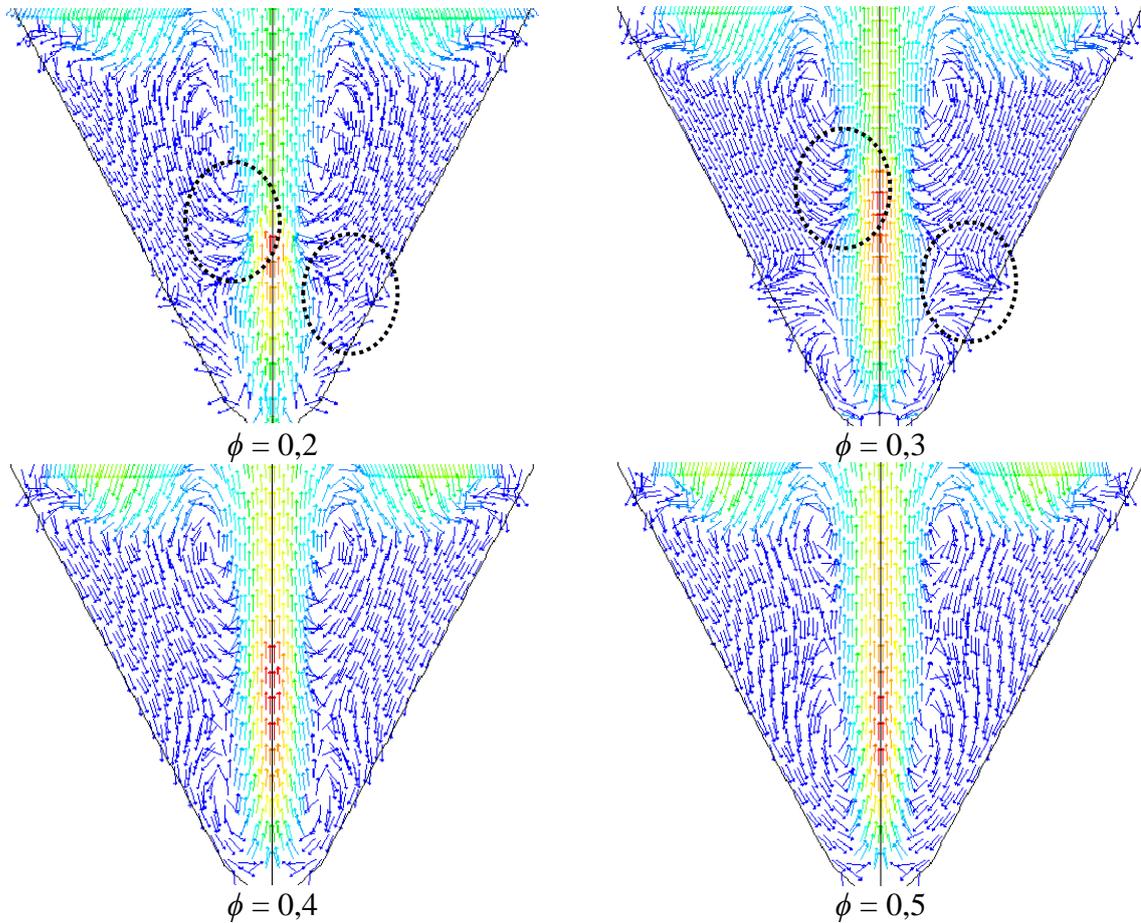
O coeficiente de especularidade utilizado afetou a amplitude das oscilações das respostas das simulações com o tempo (Figura 8). A oscilação do valor das variáveis, tais como fração volumétrica e velocidade de fase sólida, no decorrer das simulações em regime transiente é típica do regime pseudo-estacionário do leito de jorro. No entanto, a amplitude dessas oscilações aumentou à medida que foram utilizados menores valores de  $\phi$ . Observa-se que para a condição de não-deslizamento a resposta para  $W_s$  assumiu um valor aproximadamente constante ao longo do tempo, apresentando a mínima oscilação em relação às demais simulações.

Figura 8 - Comportamento da vazão mássica de sólidos no canal de jorro com o tempo para várias condições de deslizamento da fase sólida na parede.



Analisando o campo vetorial de velocidade da fase sólida (Figura 9), observa-se que para valores menores que  $\phi = 0,4$  o leito apresentou comportamento incoerente, indicando a ascensão da fase sólida na região anular próxima à entrada do canal de jorro. Os resultados também indicam a reentrada dos sólidos no canal de jorro ocorrendo diretamente em uma posição localizada na proximidade da metade da altura do canal (vetores em destaque). O coeficiente de especularidade também afetou o formato apresentado pelo canal de jorro.

Figura 9 - Vetores de velocidade dos sólidos apresentados na região cônica do leito de jorro para diferentes valores do coeficiente de especularidade. Destaque para a reentrada de sólidos no canal de jorro e elevação da fase sólida na parte inferior da região anular.



A Tabela 6 apresenta os valores de vazão mássica e tempo de ciclo da fase sólida no leito de jorro, bem como o desvio absoluto de  $t_c$  simulado em relação ao valor calculado pela correlação de SPREUTELS *et al.* (2016), equivalente a 4,54 s. Os resultados mostraram que o valor de  $\phi = 1$  não forneceu os mesmos resultados que a condição de não-deslizamento. Foram observadas diferenças consideráveis no comportamento fluidodinâmico quando são utilizados esses contornos para a parede também por ZHONG *et al.* (2015), que recomendaram que o valor de  $\phi = 1$  não fosse descrito como equivalente à condição de não-deslizamento.

Observa-se que maiores tempos de ciclo dos sólidos no canal de jorro foram verificados para maiores valores do coeficiente de especularidade, o que indica que esse parâmetro de simulação possui uma influência pronunciada sobre a circulação da fase sólida no leito. LOHA *et al.* (2013) e HOSSEINI *et al.* (2015) verificaram que maiores valores de  $\phi$  implicaram em menores velocidades da fase sólida e maior porosidade no canal de jorro, o que justifica o maior valor de  $t_c$  para essas condições. Considerando os valores que apresentaram comportamento

coerente dos vetores velocidade,  $\phi = 0,4$  apresentou menor desvio entre  $t_c$  simulado e calculado, sendo, portanto, o valor do coeficiente de especularidade adotado nas demais simulações apresentadas. A validação do método para cálculo do tempo de ciclo será discutida em maiores detalhes na seção 4.2.4.

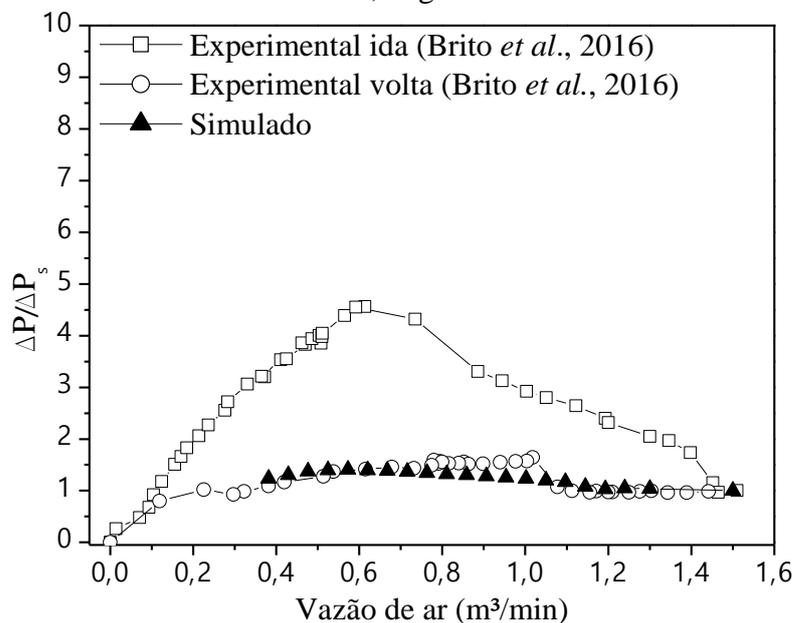
Tabela 6 - Parâmetros de circulação dos sólidos em leito de jorro e respectivo desvio de  $t_c$  em relação à correlação de SPREUTELS *et al.* (2016) para cada coeficiente de especularidade.

$\phi$	$W_s$ (kg/s)	$t_c$ (s)	Desvio $t_c$ (s)
0	0,770	5,19	-0,65
0,2	0,767	5,21	-0,67
0,3	0,754	5,30	-0,76
0,4	0,727	5,50	-0,95
0,5	0,716	5,59	-1,05
1,0	0,681	5,87	-1,33
Não-deslizamento	0,656	6,10	-1,56

#### 4.2.3 Validação do modelo fluidodinâmico

A Figura 10 apresenta a queda de pressão adimensional experimental e simulada em função da vazão de ar do leito de jorro com altura de leito estático de 0,20 m, 4,0 kg de sólidos alimentados e base cônica de  $60^\circ$ . Observa-se que para vazões de ar menores que  $0,38 \text{ m}^3/\text{min}$  não constam dados de simulação, já que para tal condição não há arraste das partículas. Sendo assim, na simulação há o movimento descendente da fase sólida até a entrada do Venturi.

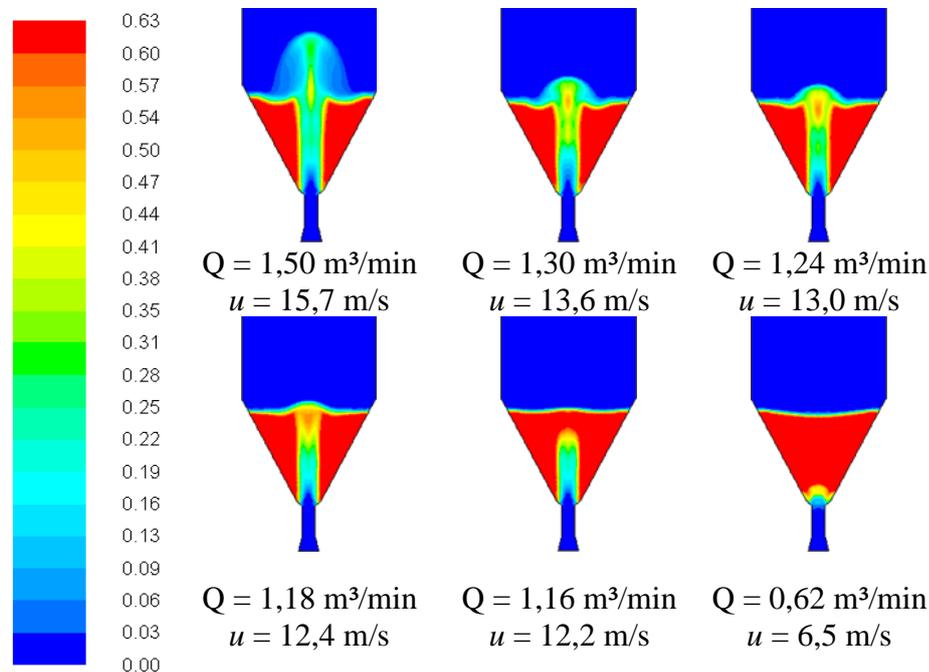
Figura 10 - Curva característica experimental e simulada do leito.  $\gamma = 60^\circ$ ;  $H_c = 0,2 \text{ m}$ ;  $m_p = 4,0 \text{ kg}$ .



Na Figura 10, observa-se que o modelo Granular Euleriano não previu a subida repentina da queda de pressão para identificação da região de mínimo jorro. Portanto, a fim de encontrar a vazão de jorro mínimo, foi realizada a aferição visual dos contornos de fração volumétrica simulados que constam na Figura 11.

Pela observação dos contornos da Figura 11, a vazão de mínimo jorro simulada ficou entre 1,18 e 1,16 m<sup>3</sup>/min, correspondendo a um erro relativo de cerca de 8,26% em relação à condição de jorro mínimo experimental (1,09 m<sup>3</sup>/min). Dessa forma, o modelo Euleriano, bem como os parâmetros adotados para a simulação, foram capazes de identificar a condição de mínimo jorro e pode ser usado para simular leitos com diferentes geometrias e condições operacionais (DUARTE *et al.*, 2009).

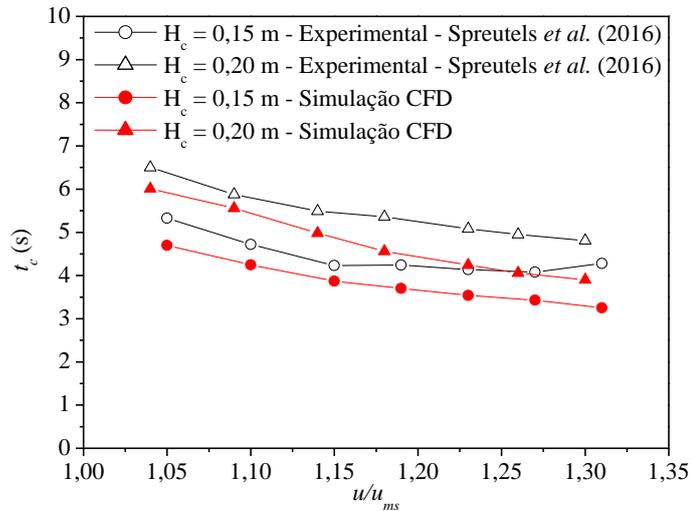
Figura 11 - Contornos de fração volumétrica da fase sólida ( $\gamma = 60^\circ$ ;  $H_c = 0,2$  m;  $m_p = 4,0$  kg).



#### 4.2.4 Validação do método de cálculo do tempo de ciclo da fase sólida

O método para obtenção do tempo de ciclo da fase sólida foi validado por meio da simulação do sistema de SPREUTELS *et al.* (2016) e da utilização dos dados experimentais desses autores. A Figura 12 compara os resultados do tempo médio de ciclo da fase sólida preditos pelas simulações CFD com os dados experimentais de SPREUTELS *et al.* (2016) para um leito de jorro operando com esferas de vidro de 3 mm.

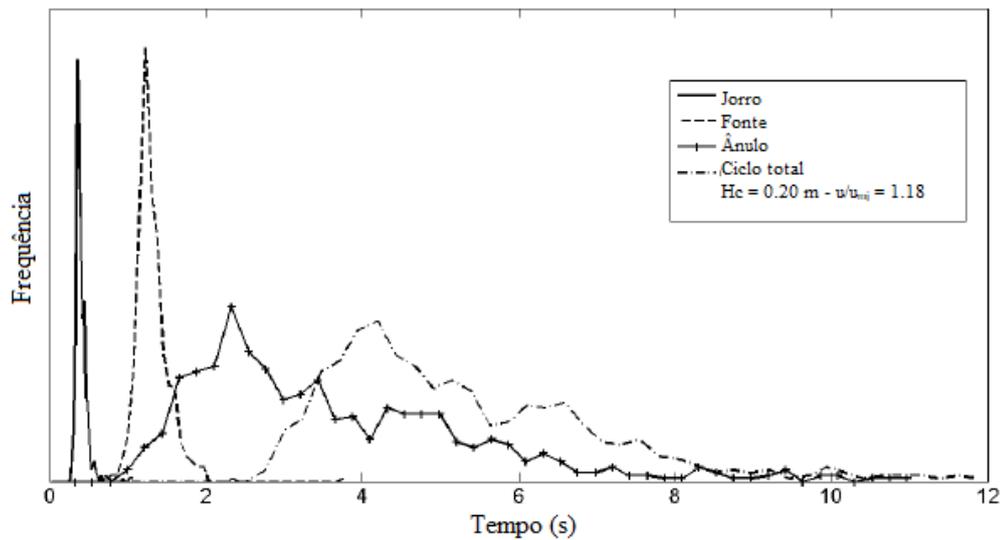
Figura 12 - Comparação entre os dados experimentais de SPREUTELS *et al.* (2016) e os resultados simulados do tempo médio de ciclo da fase sólida ( $\gamma = 60^\circ$ ;  $D_c = 0,62$  m;  $D_i = 0,028$  m;  $d_s = 3$  mm).



Pela Figura 12, observa-se que  $t_c$  diminui quando uma maior razão  $u/u_{ms}$  é utilizada. Além disso, o tempo de circulação das partículas aumenta para maiores alturas de leito estático, já que há uma maior quantidade de partículas no leito, bem como a trajetória que as partículas podem descrever no leito é mais longa. Os resultados simulados mostraram boa concordância com os dados experimentais de SPREUTELS *et al.* (2016), apresentando um desvio médio de 13,9% e 13,0% para as alturas de leito estático de 0,15 e 0,20 m, respectivamente. Sendo assim, o método de obtenção do tempo de ciclo da fase sólida por CFD proposto neste trabalho produz resultados consistentes com os da literatura e é adequado para estimar  $t_c$  em leitos de jorro.

Ressalta-se que os experimentos de SPREUTELS *et al.* (2016) foram feitos utilizando uma única partícula-traçador que tinha os tempos de no mínimo 500 ciclos medidos a cada experimento a fim de se obter uma média representativa. Cada ciclo poderia ser mais longo ou mais curto, dependendo da trajetória descrita. Dessa forma, o tempo de ciclo médio era obtido a partir de uma distribuição de tempos de ciclo (Figura 13) para cada condição operacional. Por outro lado, no método proposto neste trabalho, a vazão de sólidos no canal de jorro é medida e o tempo de ciclo é calculado a partir desse valor. A vazão de sólidos se mantém aproximadamente constante, já que o ciclo das partículas que levam mais tempo para entrar no canal de jorro é compensado pelo ciclo das partículas que levam menos tempo. Por essa razão, o resultado final de  $t_c$  não é influenciado pelos valores dos tempos de ciclo de partículas que estão mais distantes da média.

Figura 13 - Distribuição do tempo de residência dos sólidos no canal de jorro, na fonte, no ânulo e tempo de ciclo total dos sólidos para experimento de SPREUTELS et al (2016).



Fonte: Adaptado de SPREUTELS (2013).

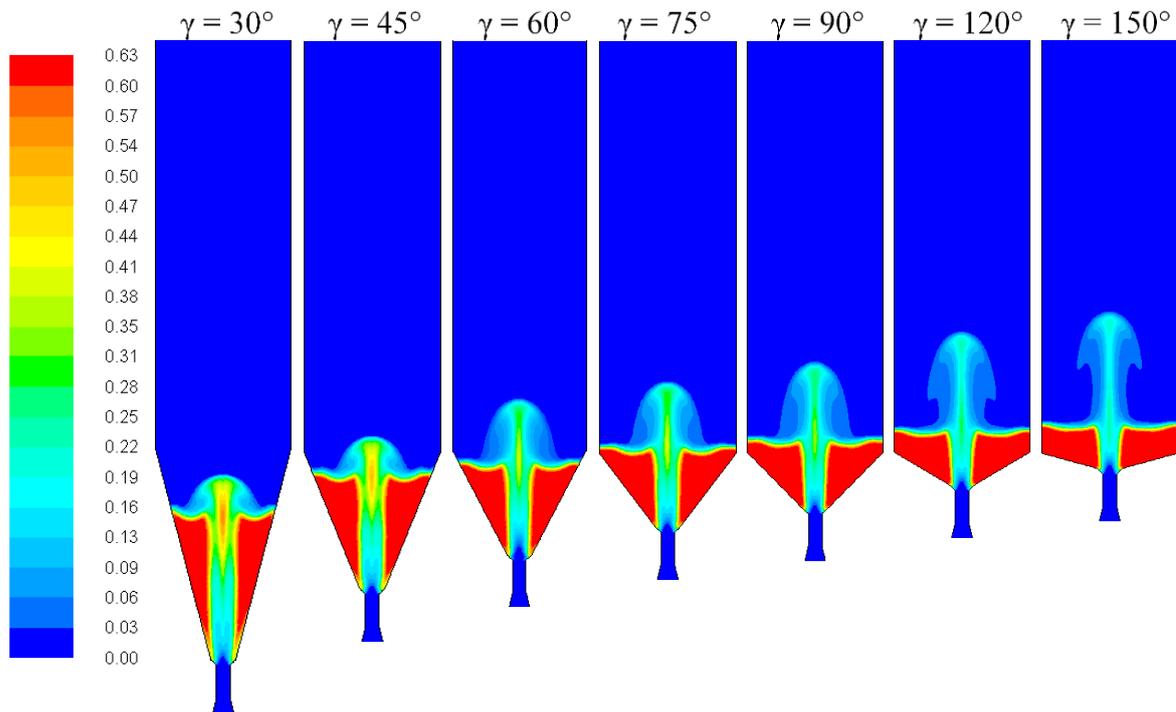
Os resultados referentes ao tempo de ciclo da fase sólida apresentados nas seções seguintes utilizaram o mesmo método CFD para estimar a circulação de partículas em leitos de jorro operando com grãos de sorgo.

#### 4.2.5 Fluidodinâmica do leito de jorro para diferentes ângulos de cone

##### 4.2.5.1 Análise para ângulos de cone de 30° a 150°

Na Figura 14 constam os contornos de fração volumétrica da fase particulada para os ângulos de cone de 30° a 150° com a massa da fase sólida correspondente a 4,0 kg. Foi possível observar as três regiões características dos leitos de jorro: ânulo, canal de jorro e fonte para todas as condições. Do ângulo de 60° para o ângulo de 75° ocorreu a transição do leito de jorro cônico para o leito de jorro cônico-cilíndrico. Observa-se que à medida em que é utilizado um maior ângulo de cone, a altura de leito estático diminui, já que a massa de partículas é constante, e a fonte manifesta-se a uma maior altura. Constata-se ainda um jorro mais diluído para os maiores ângulos, indicando que a menor inclinação da parede e a menor altura de leito estático provocam a diminuição da passagem de sólidos da região anular para o canal de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

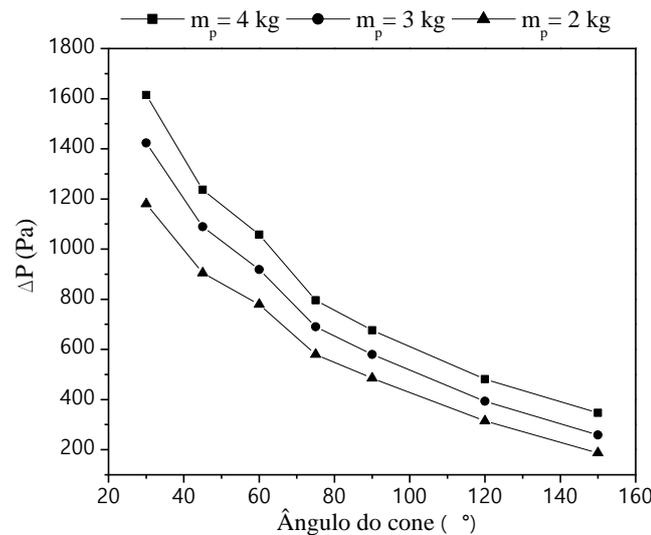
Figura 14 - Contornos de fração volumétrica da fase sólida simulados em leitos de jorro para vários ângulos de cone ( $m_p = 4,0$  kg;  $u = 15,7$  m/s).



Na Figura 15 são apresentados os valores da queda de pressão na entrada do leito para cada condição simulada. Pode-se observar a influência do ângulo de cone, bem como da massa da fase particulada alimentada sobre a queda de pressão. O comportamento das curvas foi similar para cada uma das massas, sendo que uma maior carga da fase sólida conferiu uma maior queda de pressão. À medida que o ângulo de cone aumentou, houve a diminuição gradual da altura de leito estático, bem como da queda de pressão.

Verifica-se que os leitos com menor angulação do cone e maior carga de partículas apresentaram uma altura de leito estático mais elevada, além de uma menor porosidade no canal de jorro. Esse conjunto de fatores aumenta a resistência à passagem de ar pelo canal, já que há uma maior quantidade de sólidos circulando nessa região, o que justifica a maior queda de pressão apresentada para essas configurações. Ao aumentar o ângulo do cone ou reduzir a massa de partículas alimentadas, o comportamento oposto é observado, visto que a altura de leito estático diminui e a porosidade do canal de jorro aumenta.

Figura 15 - Queda de pressão na entrada do leito para as simulações com diferentes ângulos de cone e massas de partículas alimentadas.



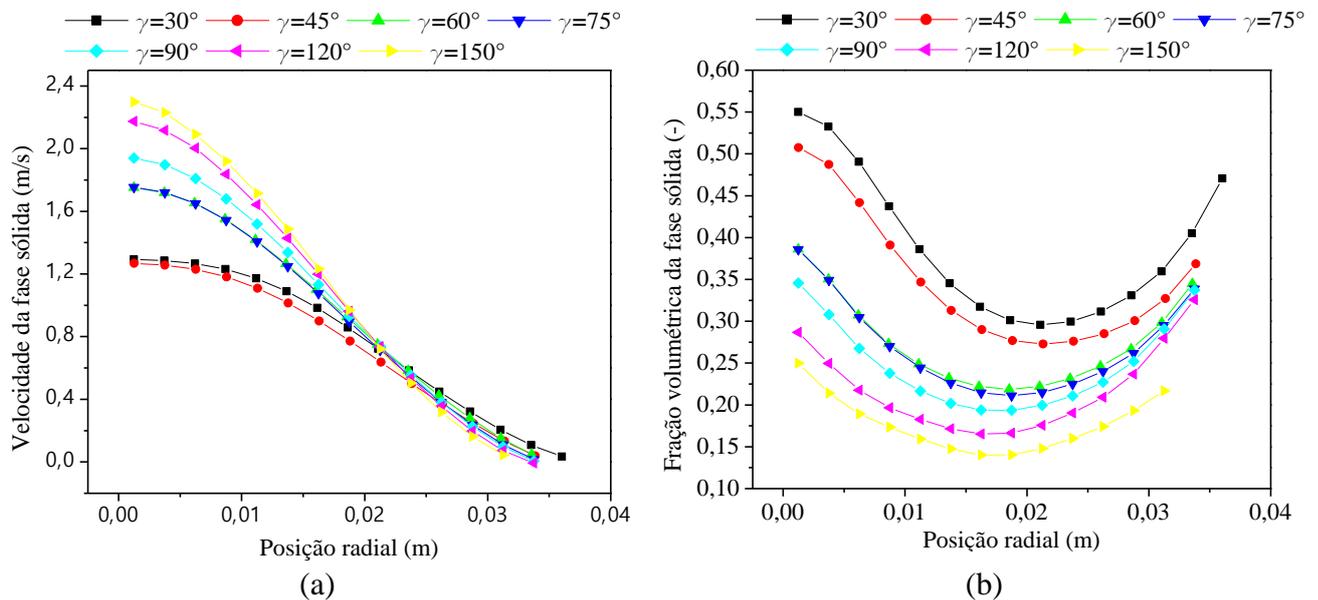
A Figura 16 apresenta os dados de velocidade e fração volumétrica da fase particulada para cada ângulo de cone simulado, na posição correspondente à altura de leito estático de cada condição ( $x = H_c$ ) simulada, para a massa de 4,0 kg. Ressalta-se que o comportamento qualitativo das curvas de velocidade e fração volumétrica para  $m_p = 2,0$  kg e  $m_p = 3,0$  kg foi análogo ao apresentado nessa figura.

Observa-se que foi obtido um perfil aproximadamente parabólico da velocidade dos sólidos no canal de jorro em  $x = H_c$ . No centro do canal, foram observadas maiores velocidades à medida em que foram empregados maiores ângulos de cone. Tal comportamento ocorre devido às menores alturas de leito estático e à menor quantidade de partículas no canal de jorro, o que contribui para uma maior transferência de quantidade de movimento do ar de entrada para o sólido. Ademais, uma menor quantidade de partículas no canal contribui para sua movimentação mais desimpedida, ocorrendo menos choques entre sólidos, o que resulta no desenvolvimento de uma maior velocidade. Constata-se o comportamento oposto conforme o ângulo de cone diminui, já que foram obtidas menores velocidades de sólidos e um canal com maior fração volumétrica da fase particulada.

O perfil da fração volumétrica da fase sólida no leito indica uma maior concentração dessa fase no centro do canal de jorro, bem como na interface com a região anular. A maior quantidade de partículas nessa interface pode ocorrer devido ao efeito de curto-circuito, devido ao qual há constante passagem e interação dos sólidos presentes na região anular e no canal de jorro. Alguns trabalhos da literatura já reportaram o mesmo comportamento apresentado pelas curvas de fração volumétrica da Figura 16. BÉTTEGA *et al.* (2010) encontraram um perfil similar para a fração volumétrica por meio de simulações 3D de leito de jorro, quando

consideradas alturas mais próximas ao leito estático. SAN JOSÉ *et al.* (2005) encontraram perfis radiais similares dos dados de fração volumétrica de sólidos medidos experimentalmente em leitos de jorro cônicos por meio de uma sonda de fibra óptica.

Figura 16 - Comportamento da (a) velocidade das partículas; (b) fração volumétrica da fase sólida ao longo da posição radial do canal de jorro em  $x = H_c$ ;  $m_p = 4,0$  kg.

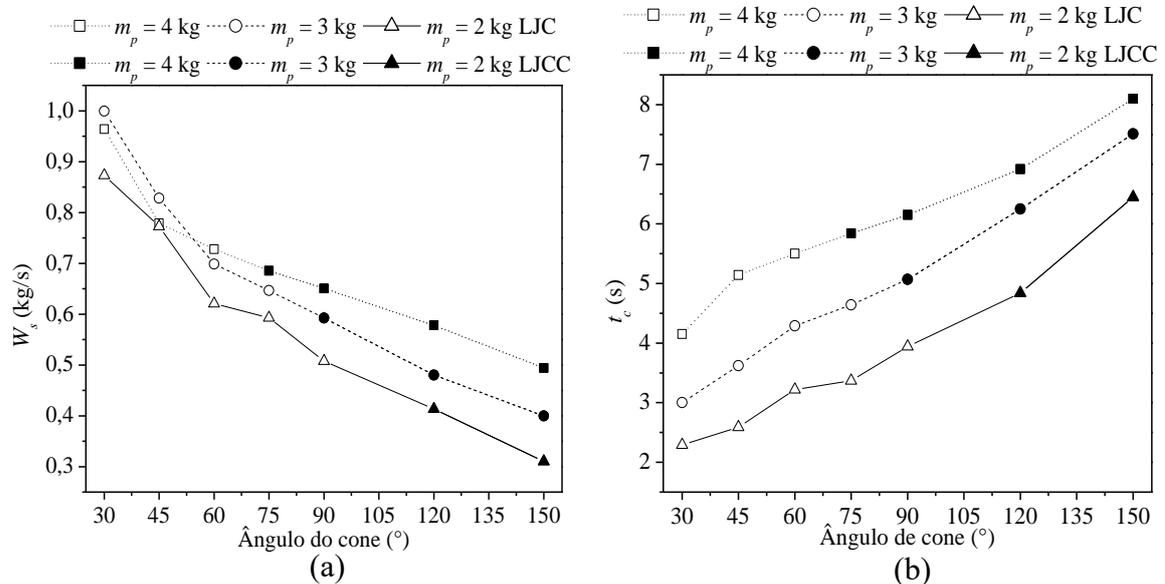


Na Figura 17 encontram-se os valores de vazão mássica (a) e do tempo de ciclo de sólidos (b) calculados em cada simulação. Para fins de comparação, a configuração do leito apresentada por cada condição avaliada também está destacada, sendo que o símbolo aberto indica leito de jorro cônico e o símbolo preenchido indica leito de jorro cônico-cilíndrico. Os resultados das simulações (Figura 17a) indicam que, considerando a mesma vazão de entrada de ar, as maiores vazões mássicas ocorreram para os ângulos de 30° para todas as cargas de partículas. Tal resultado deve-se principalmente à elevada fração volumétrica da fase sólida observada no canal de jorro para esses ângulos de cone. Observa-se ainda que a transição do leito de cônico para cônico-cilíndrico não afetou visivelmente o comportamento das curvas.

Constata-se que houve redução da vazão mássica de sólidos com o aumento do ângulo da base cônica. O ângulo de 150° apresentou os menores valores de  $W_s$  para todas as massas avaliadas. À medida que se aumenta a angulação do cone, o leito vai diminuindo a capacidade de retornar as partículas para o canal de jorro, ficando essa região cada vez mais porosa. Ademais, a maior velocidade atingida pela fase particulada em  $x = H_c$  para cones mais abertos não causa um aumento na vazão de sólidos que compense o efeito de aumento da porosidade

no canal de jorro. Portanto, as simulações mostraram que bases cônicas com ângulos mais abertos desfavoreceram a circulação de sólidos no leito para as condições abordadas.

Figura 17 - Vazão mássica (a) e tempo de ciclo (b) dos sólidos no canal de jorro para cada condição simulada, parametrizada na velocidade de entrada do ar (15,7 m/s).



Como apresentado na Figura 17a, as curvas para cada valor de  $m_p$  se interceptam na faixa de ângulos de cone entre 30° e 60°. O comportamento da vazão mássica para essa faixa pode ser explicado a partir da Equação 4.3. Por essa equação, pode-se constatar que as diferenças no valor obtido para  $W_s$  em cada ângulo de cone devem-se principalmente ao resultado do produto da velocidade pela fração volumétrica da fase sólida no canal de jorro. Assim sendo, quando uma massa maior de sólidos é alimentada ao leito, dois efeitos podem ocorrer para uma dada velocidade de entrada de ar. Uma possibilidade é o leito ficar sobrecarregado com os sólidos, sendo que o ar fornecido não é suficiente para movimentar as partículas, fazendo com que a velocidade dos sólidos diminua no canal de jorro e, conseqüentemente, a vazão mássica diminua. Outra possibilidade é que a massa adicional fornecida favoreça a passagem de sólidos para o canal de jorro, fazendo com que a fração volumétrica de sólidos nessa região aumente e proporcione um aumento na vazão de sólidos. Conseqüentemente, para os ângulos de cone de 30° e 45°, a combinação desses fatores resultou em uma vazão mássica mais elevada para a carga de 3,0 kg e a velocidade de entrada de ar de

15,7 m/s. Isso implica que, para uma dada vazão de ar e geometria do leito, há uma determinada carga de sólidos que mais beneficia a vazão de sólidos no leito de jorro.

Sendo assim, pode-se constatar que, mantida a mesma velocidade de entrada de ar e alternando os ângulos de cone, a vazão mássica apresentada no canal do leito de jorro deve-se à combinação dos fatores: massa de sólidos alimentados, altura de leito estático, velocidade e porosidade dos sólidos no canal de jorro.

Assumindo a mesma massa de sólidos no leito de jorro, os resultados para o tempo de ciclo das partículas (Figura 17b) indicam que para menores ângulos de cone as partículas levaram menos tempo para circular. De acordo com os resultados das simulações, tem-se que para  $u = 15,7$  m/s o tempo de ciclo de 3,0 kg de partículas em um leito com ângulo de cone de  $60^\circ$  é o mesmo que o de um leito com cone de  $30^\circ$  operando com 4,0 kg de partículas. Mesmo que os leitos com os menores ângulos de cone apresentem uma maior altura de leito estático, a própria geometria do leito favorece a circulação de sólidos em seu interior, fazendo com que  $t_c$  seja menor para cones mais fechados.

Os resultados referentes à Figura 17 ressaltam a importância de avaliar a circulação de sólidos no interior do equipamento mantendo a mesma massa de partículas para cada configuração e a mesma velocidade de entrada de ar. Dessa forma, pode-se comparar as geometrias considerando a mesma quantidade de energia disponível na entrada do leito para cada configuração. Tal abordagem permite ainda a avaliação da efetividade de troca térmica baseando-se apenas em premissas fluidodinâmicas, assumindo que o tempo de ciclo está diretamente relacionado à circulação dos sólidos, e esta, por sua vez, à eficiência da troca térmica.

Ressalta-se que mesmo que fosse alimentada uma maior massa de partículas nos leitos com maior angulação de cone a fim de aumentar a altura de leito estático e a passagem de sólidos para o canal de jorro, tal abordagem poderia não ser vantajosa. Ainda que o jorro possa tornar-se menos poroso devido à maior quantidade de partículas presentes, o tempo de ciclo seria inevitavelmente maior devido ao incremento na massa de sólidos alimentada. Portanto, de acordo com os resultados das simulações, o uso de cones com ângulo maior que aquele utilizado nos testes experimentais ( $60^\circ$ ) não seria recomendado dentro das condições abordadas.

Nessa seção, foi possível observar via simulação CFD que menores ângulos da base cônica do leito contribuem para a passagem de uma maior quantidade de sólidos para o canal de jorro e, conseqüentemente, para uma maior vazão mássica e menor tempo de ciclo da fase sólida quando avaliados leitos com a mesma carga de partículas.

Para avaliar o comportamento das variáveis envolvidas na circulação da fase sólida no leito de jorro, procedeu-se uma análise por planejamento fatorial. Para a variável ângulo de cone, foram analisados apenas as geometrias com base cônica de 30°, 45° e 60° por terem apresentado altos valores de vazão de sólidos para todas as cargas de partículas alimentadas quando comparadas às demais configurações.

#### *4.2.5.2 Planejamento fatorial*

Uma das dificuldades de se aplicar planejamentos fatoriais envolvendo parâmetros geométricos de leitos de jorro é a escolha das variáveis independentes e dos parâmetros que devem ser fixados. Observa-se que a altura de leito estático e a massa de sólidos alimentados são variáveis dependentes entre si, não sendo possível avaliar ambas no mesmo planejamento. Destaca-se que nesta investigação foi escolhida como variável independente a massa de partículas alimentadas para fins de comparação do  $t_c$  entre cada condição. Portanto, nessa abordagem a altura de leito estático inevitavelmente não pode ser mantida constante entre cada geometria. Dessa forma, a variabilidade gerada por esse fator fica incluída nos resíduos da regressão. Nesse sentido, ressalta-se que por meio da regressão múltipla buscou-se também analisar o quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de modo a verificar se as variáveis independentes utilizadas foram suficientes para explicar o comportamento das respostas.

A Tabela 7 apresenta os ângulos de cone ( $\gamma$ [°]), massas de partículas alimentadas ( $m_p$  [kg]) e velocidades de entrada de ar ( $u$ [m/s]), bem como as respostas obtidas nas simulações CFD para o planejamento fatorial. Nas simulações, foram claramente observadas as regiões de fonte, anular e canal de jorro, bem como jorro estável para todas as condições.

Na Tabela 8 estão contidos os resultados obtidos pela regressão múltipla, sendo apresentados somente os termos que influenciaram a vazão mássica de partículas no canal de jorro de modo significativo. Observa-se na Figura 18 que os resíduos da regressão foram aleatórios e normalmente distribuídos.

Observa-se que houve efeito significativo de todas as variáveis isoladas, sendo que o ângulo de cone teve efeito mais pronunciado sobre  $W_s$ . Houve ainda presença de termo quadrático referente à massa da fase sólida, bem como interação entre as variáveis  $m_p$  e  $u$ . O efeito de interação entre as variáveis indica que a massa de partículas no leito e a velocidade de entrada de ar são fatores que não devem ser avaliados separadamente para a resposta  $W_s$ .

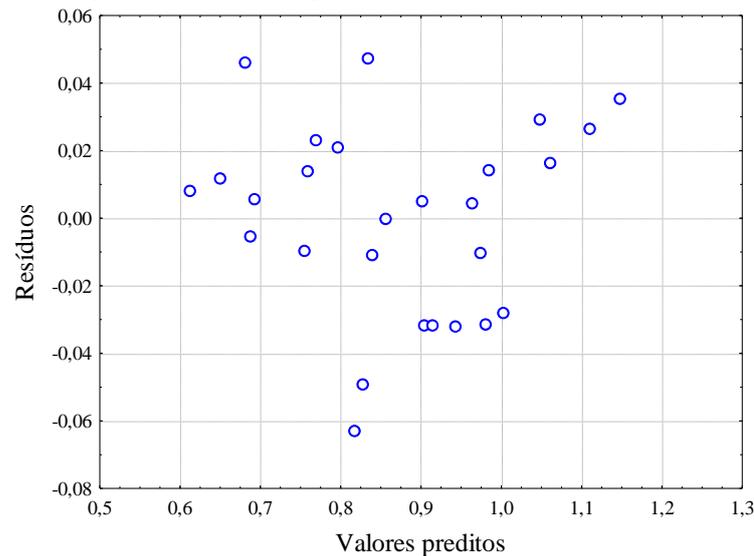
Tabela 7 - Planejamento fatorial 3<sup>3</sup>: respostas das simulações CFD

<b>Simulação</b>	<b><math>x_1</math></b> <b>(<math>\gamma</math> [°])</b>	<b><math>x_2</math></b> <b>(<math>m_p</math> [kg])</b>	<b><math>x_3</math></b> <b>(<math>u</math>[m/s])</b>	<b><math>W_s</math></b> <b>(kg/s)</b>	<b><math>t_c</math></b> <b>(s)</b>
<b>1</b>	-1 (30)	-1 (2)	-1 (15,7)	0,873	2,29
<b>2</b>	-1 (30)	0 (3)	-1 (15,7)	0,999	3,00
<b>3</b>	-1 (30)	+1 (4)	-1 (15,7)	0,964	4,15
<b>4</b>	0 (45)	-1 (2)	-1 (15,7)	0,773	2,59
<b>5</b>	0 (45)	0 (3)	-1 (15,7)	0,828	3,62
<b>6</b>	0 (45)	+1 (4)	-1 (15,7)	0,779	5,14
<b>7</b>	+1 (60)	-1 (2)	-1 (15,7)	0,621	3,22
<b>8</b>	+1 (60)	0 (3)	-1 (15,7)	0,699	4,29
<b>9</b>	+1 (60)	+1 (4)	-1 (15,7)	0,728	5,50
<b>10</b>	-1 (30)	-1 (2)	0 (16,7)	0,911	2,20
<b>11</b>	-1 (30)	0 (3)	0 (16,7)	1,077	2,79
<b>12</b>	-1 (30)	+1 (4)	0 (16,7)	1,078	3,71
<b>13</b>	0 (45)	-1 (2)	0 (16,7)	0,818	2,45
<b>14</b>	0 (45)	0 (3)	0 (16,7)	0,907	3,31
<b>15</b>	0 (45)	+1 (4)	0 (16,7)	0,884	4,53
<b>16</b>	+1 (60)	-1 (2)	0 (16,7)	0,662	3,02
<b>17</b>	+1 (60)	0 (3)	0 (16,7)	0,746	4,02
<b>18</b>	+1 (60)	+1 (4)	0 (16,7)	0,792	5,05
<b>19</b>	-1 (30)	-1 (2)	+1 (17,7)	0,949	2,11
<b>20</b>	-1 (30)	0 (3)	+1 (17,7)	1,137	2,64
<b>21</b>	-1 (30)	+1 (4)	+1 (17,7)	1,184	3,38
<b>22</b>	0 (45)	-1 (2)	+1 (17,7)	0,882	2,27
<b>23</b>	0 (45)	0 (3)	+1 (17,7)	0,968	3,10
<b>24</b>	0 (45)	+1 (4)	+1 (17,7)	0,975	4,10
<b>25</b>	+1 (60)	-1 (2)	+1 (17,7)	0,683	2,93
<b>26</b>	+1 (60)	0 (3)	+1 (17,7)	0,755	3,97
<b>27</b>	+1 (60)	+1 (4)	+1 (17,7)	0,856	4,67

Tabela 8 - Efeito das variáveis  $\gamma$  ( $x_1$ ),  $m_p$  ( $x_2$ ) e  $u$  ( $x_3$ ) sobre a vazão mássica de sólidos no canal de jorro ( $R^2 = 0,9631$ ).

Fator	Efeito	Desvio ( $\cdot 10^2$ )	Nível de significância p
Média	0,8713	0,6028	0,0000
$x_1$	-0,2924	1,4765	0,0000
$x_2$	0,1188	1,4765	0,0000
$x_2^2$	0,0456	1,2787	0,0018
$x_3$	0,1249	1,4765	0,0000
$x_2x_3$	0,0496	1,8084	0,0122

Figura 18 - Distribuição dos resíduos para a vazão mássica de sólidos no leito de jorro.



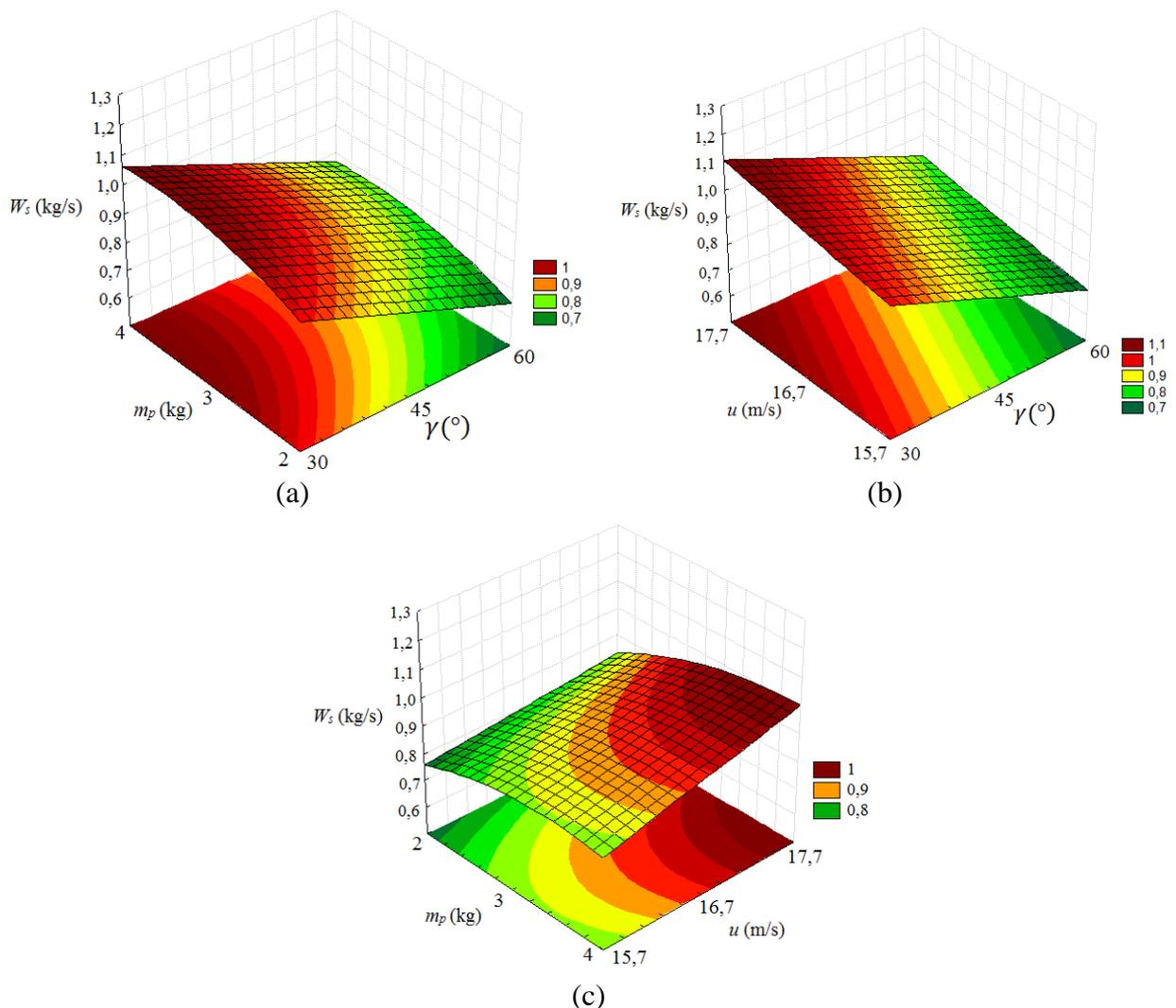
O quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) fornece em que medida a equação de regressão consegue explicar a variação total das respostas. Tem-se que 96,31% da variabilidade das respostas de vazão mássica de sólidos podem ser explicadas pela Equação 4.8, indicando que as variáveis independentes são suficientes para descrever o comportamento de  $W_s$  na faixa abordada. Ressalta-se ser possível um alto controle das variáveis externas, já que o estudo de cada condição foi feito com base em simulações computacionais. O que pode ter contribuído para desvios entre os valores simulados e os preditos pela equação de regressão são as inevitáveis variações na altura de leito estático entre cada condição.

$$W_s = 0,9017 - 0,1462x_1 + 0,05941x_2 - 0,02282x_2^2 + 0,06245x_3 + 0,02479x_2x_3 \quad (4.8)$$

As superfícies de resposta apresentadas na Figura 19 apontam que a vazão mássica de sólidos no canal de jorro aumenta conforme são utilizados menores ângulos de cone e maiores velocidades de entrada de ar. Observou-se um efeito quadrático da massa em relação a  $W_s$ , o que indica que existe um valor de  $m_p$  que resulta em maiores vazões mássicas de sólidos para

cada condição abordada. Tal resultado é fisicamente coerente, já que maiores massas de sólidos contribuem para uma diminuição na porosidade do canal de jorro, ocasionando maiores  $W_s$ . No entanto, se um excesso de massa é alimentado, o ar fornecido não consegue fazer circular as partículas com a mesma velocidade e eficiência de uma carga menor, o que provoca a diminuição do valor de  $W_s$ .

Figura 19 - Superfícies de resposta para a vazão de sólidos no canal de jorro em função de duas variáveis (as demais estão mantidas no nível central): (a) ângulo de cone e massa de sólidos; (b) ângulo de cone e velocidade de entrada de ar; (c) velocidade de entrada de ar e massa de sólidos.



Analisando a Figura 19c), é possível investigar o efeito de interação entre as variáveis massa da fase sólida e velocidade de entrada de ar. Tal efeito de interação foi dado como significativo pois pode-se observar que  $u$  influenciou de modo mais pronunciado a vazão de

sólidos no canal de jorro quando utilizadas massas maiores da fase sólida, sendo calculado um aumento de 21,1% em  $W_s$  entre os níveis inferior e superior abordados. Por outro lado, para as menores massas, observa-se que  $u$  apresentou efeito menos pronunciado, com aumento de 9,9% em  $W_s$  entre os mesmos níveis. Assim sendo, a maneira como  $u$  influencia na resposta depende do nível  $m_p$  que está sendo analisado.

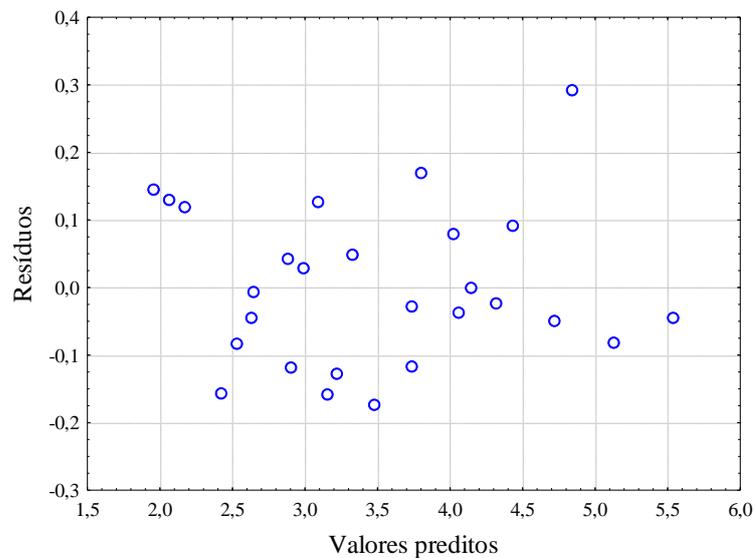
Na Tabela 9 estão contidos os resultados obtidos pela regressão múltipla, sendo apresentados somente os termos que influenciaram o tempo de ciclo das partículas no leito de jorro de modo significativo. Observa-se na

Figura 20 que os resíduos da regressão foram aleatórios e normalmente distribuídos.

Tabela 9 - Efeito das variáveis  $\gamma$ ,  $m_p$  e  $u$  sobre o tempo de ciclo das partículas ( $R^2 = 0,9858$ )

<b>Fator</b>	<b>Efeito</b>	<b>Desvio (.10<sup>2</sup>)</b>	<b>Nível de significância p</b>
Média	3,4830	2,4740	0,0000
$x_1$	1,1580	6,0601	0,0000
$x_2$	1,9056	6,0601	0,0000
$x_3$	-0,5141	6,0601	0,0000
$x_1x_2$	0,2333	7,4221	0,0049
$x_2x_3$	-0,3052	7,4221	0,0005

Figura 20 - Distribuição dos resíduos para o tempo de ciclo das partículas.



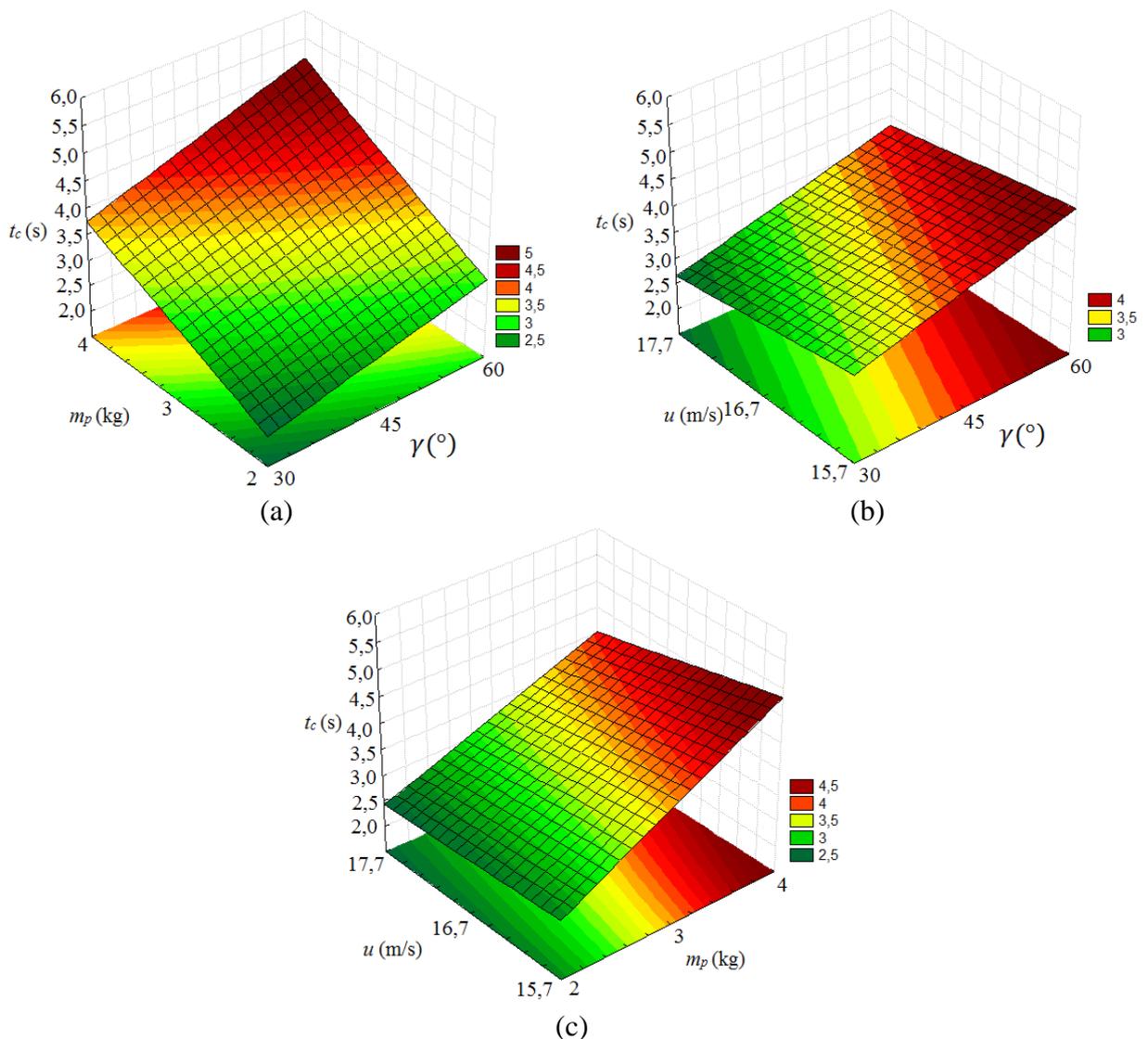
Observa-se que houve efeito significativo das variáveis isoladas, sendo que a massa de partículas teve efeito mais pronunciado. Houve ainda interação entre os termos de ângulo de cone e massa de sólidos, bem como de massa de sólidos e velocidade de entrada de ar.

O quadrado do coeficiente de correlação  $R^2$  indica que 98,58% da variabilidade dos dados de tempo de ciclo de sólidos pode ser explicada pela Equação 4.9.

$$t_c = 3,4829 + 0,5790x_1 + 0,9528x_2 - 0,2570x_3 + 0,1166x_1x_2 - 0,1526x_2x_3 \quad (4.9)$$

As superfícies de resposta da Figura 21 mostram que o tempo de ciclo dos sólidos pode ser reduzido se empregadas massas de sólidos e ângulos de cone menores, bem como maiores velocidades de entrada de ar. Observa-se ainda o comportamento aproximadamente linear da resposta  $t_c$  em relação a cada variável.

Figura 21 - Superfícies de resposta para o tempo de ciclo da fase sólida no leito de jorro em função de duas variáveis (as demais estão mantidas no nível central): (a) ângulo de cone e massa de sólidos; (b) ângulo de cone e velocidade de entrada de ar; (c) velocidade de entrada de ar e massa de sólidos.



Analisando os resultados obtidos por meio das simulações CFD e orientados pelo planejamento fatorial, alguns fatores devem ser destacados. Tem-se que as equações obtidas pela regressão múltipla valem apenas para descrever de modo qualitativo o comportamento das respostas e limitam-se à faixa de valores adotados para as variáveis independentes. Ademais, por tratar-se de uma análise que envolveu somente simulações, esta é uma análise teórica e os resultados apresentados poderão não apresentar valores quantitativamente semelhantes em equipamentos que estejam operando em condições reais. No entanto, deve-se destacar a capacidade da CFD em fornecer respostas que foram fisicamente coerentes e que permitiram uma análise mais detalhada da influência das variáveis  $\gamma$ ,  $m_p$  e  $u$  na circulação da fase sólida no leito de jorro. Como foram calculados efeitos significativos de interação entre essas variáveis, observa-se a importância de abordá-las em conjunto quando avaliadas as respostas  $W_s$  e  $t_c$ .

Considerando os resultados desta seção, pode-se estimar o desempenho fluidodinâmico de um leito de jorro operando com grãos de sorgo para diferentes geometrias e condições operacionais. O leito de jorro com ângulo de cone de  $60^\circ$  estudado experimentalmente por BRITO *et al.* (2016) para a secagem de grãos de sorgo era originalmente operado com 4,0 kg de sólidos alimentados. Para uma velocidade de entrada de ar de 15,7 m/s, estima-se que um leito com ângulo de cone de  $30^\circ$  operando com a mesma carga poderia apresentar uma vazão de sólidos no canal de jorro aproximadamente 32,4% maior e um tempo de ciclo dos sólidos 24,6% menor que o do sistema original. Partindo do princípio que  $W_s$  varia linearmente com  $u$ , seria necessária uma velocidade de entrada de ar de cerca de 19,0 m/s para se obter o mesmo tempo de ciclo e vazão de sólidos com o ângulo de cone de  $60^\circ$ . Portanto, as simulações CFD indicam que uma redução no ângulo de cone poderia beneficiar a circulação dos sólidos no leito de jorro a um consumo menor de energia para essa condição, consequentemente aumentando a eficiência energética do processo de secagem do sorgo em leito de jorro.

#### *4.2.5.3 Análise de curto-circuito da fase sólida*

A Figura 22 apresenta os resultados das simulações nas quais foram coletados os dados de vazão mássica da fase sólida em diferentes posições do canal de jorro e configurações do leito para uma carga de 4,0 kg de sólidos. Na Tabela 10 constam as posições axiais nas quais foram coletados os dados de  $W_s$  referentes a Figura 22 para cada uma das configurações.

As simulações indicaram que à medida que se percorre o canal de jorro na direção ascendente, os sólidos presentes na região anular são transportados para a região de jorro provocando um crescente aumento na vazão mássica de sólidos, que atinge seu valor máximo

na posição correspondente à altura de leito estático. LUO *et al.* (2013) e YANG *et al.* (2014) investigaram a circulação de sólidos em leitos de jorro por simulações CFD-DEM e constataram um pronunciado transporte lateral de sólidos na interface jorro-ânulo. Pela Figura 22, observa-se que maiores velocidades de entrada de ar causaram um aumento da vazão mássica de sólidos em todas as posições do canal de jorro para as três geometrias.

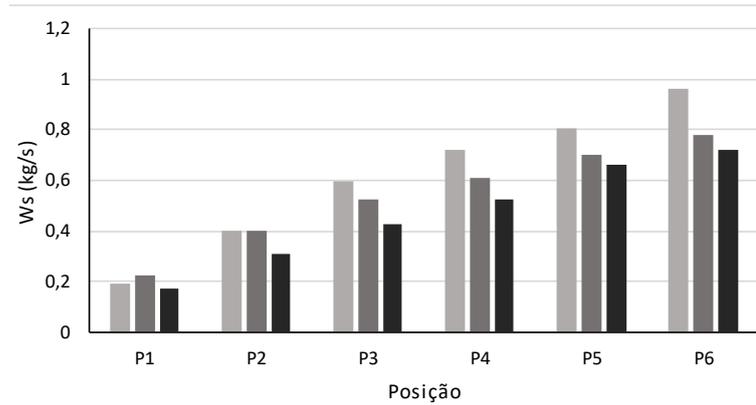
Para a posição P1, foi observado que o ângulo de cone de 45° apresentou maiores vazões mássicas, indicando que maior quantidade de sólidos entra no canal de jorro em posições mais próximas ao bocal de entrada de ar para essa configuração. No entanto, quando se observa as posições imediatamente superiores (2 e 3), o ângulo de cone de 30° apresenta considerável aumento em sua vazão mássica, que passa a superar o atingido por todas as outras configurações.

Observa-se que entre as posições P5 e P6, o ângulo de 30° apresentou o maior aumento na vazão mássica, indicando uma alta circulação de sólidos na porção superior. No entanto, as simulações mostraram que o cone de 30° teve as maiores vazões mássicas de sólidos também para as posições mais baixas (acima da posição P1). Tal observação reflete que essa configuração fornece maior circulação da fase sólida que é lançada diretamente na fonte, bem como permite que maiores quantidades de sólidos circulem passando pela porção inferior do canal de jorro.

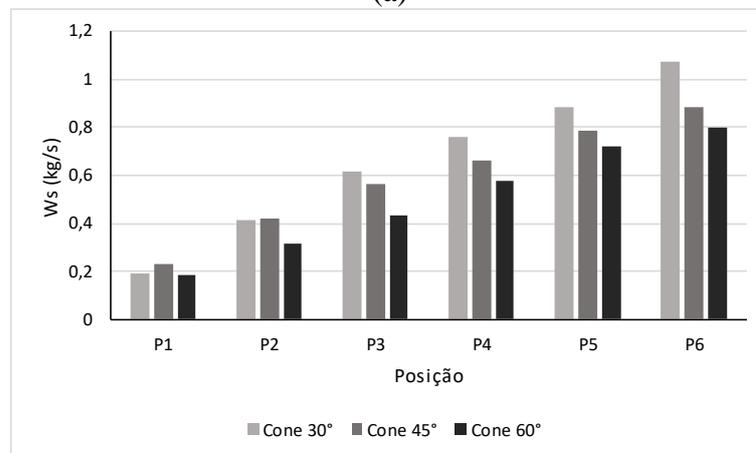
Observa-se que uma média de 23% do total de sólidos que deixam o canal de jorro pela fonte entraram no canal de jorro na posição P1, que é a mais próxima do bocal de entrada de ar. A quantidade de sólidos restante adentrou o canal de jorro em posições mais elevadas.

No Apêndice A encontram-se os resultados das simulações que analisaram o curto-circuito da fase sólida nos leitos com carga de 3,0 e 2,0 kg de sólidos. Para essas massas, o ângulo de 30° ainda foi aquele que forneceu as maiores vazões mássicas de sólidos nas porções mais baixas do leito. No entanto, esse comportamento se mostrou mais pronunciado para maiores cargas de sólidos alimentados.

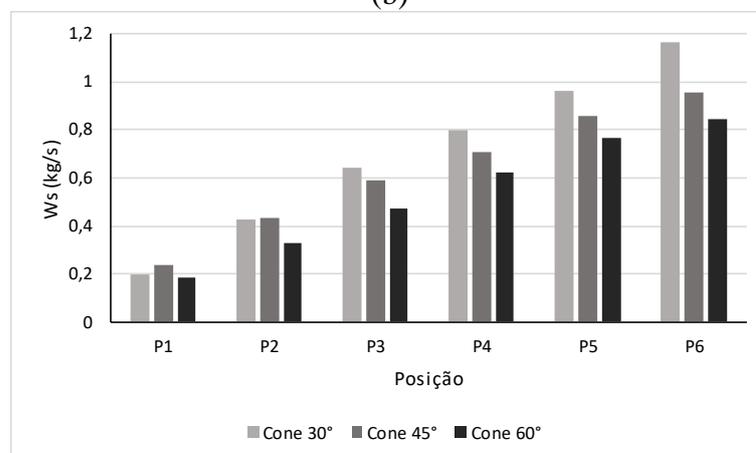
Figura 22 - Vazão mássica da fase sólida em cada posição do canal de jorro para as configurações de leito de jorro com massa de 4,0 kg de sólidos nas velocidades de entrada de ar de (a) 15,7 m/s, (b) 16,7 m/s e (c) 17,7 m/s.



(a)



(b)



(c)

Tabela 10 - Posições de coleta dos dados de vazão mássica da fase sólida no canal de jorro  
( $m_p = 4,0$  kg).

<b>Posição axial</b>	<b>Distância do bocal de entrada de ar (m)</b>		
	<b>Cone 30°</b>	<b>Cone 45°</b>	<b>Cone 60°</b>
<b>P6</b>	0,313	0,244	0,200
<b>P5</b>	0,256	0,201	0,166
<b>P4</b>	0,200	0,158	0,132
<b>P3</b>	0,143	0,116	0,098
<b>P2</b>	0,087	0,073	0,064
<b>P1</b>	0,030	0,030	0,030

## CAPÍTULO 5

### **SIMULAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS MÓVEIS**

Após os testes, validações e análises feitos na etapa fluidodinâmica, procederam-se as simulações envolvendo a parte térmica. Neste capítulo, serão apresentados o método e os resultados referentes às simulações de transferência de calor.

#### **5.1 Método**

Nas simulações apresentadas neste capítulo foi dada a continuidade nas análises de leitos de jorro com diferentes ângulos de cone, habilitando as equações da energia no simulador. Ressalta-se que foi utilizado o mesmo sistema de referência e as mesmas condições de simulação apresentados na seção 4.1.1. As malhas computacionais escolhidas no teste apresentado na seção 4.2.1 também foram empregadas.

Nesta seção, as respostas fornecidas pelo simulador foram utilizadas para a verificação do balanço de energia para cada uma das diferentes geometrias investigadas. Em seguida, um sistema simples de leito fluidizado foi proposto a fim de analisar o método utilizado para verificação do balanço de energia.

##### **5.1.1 Leito de jorro**

As simulações foram feitas para os leitos de jorro com ângulos de cone de 30°, 45° e 60°, considerando uma temperatura de entrada de ar de 343,15 K, fase sólida com temperatura inicial de 297,05 K e as paredes do leito adiabáticas. A mesma velocidade de entrada de ar (15,7 m/s) foi utilizada para todas as configurações. Durante todo o tempo de simulação, foram monitoradas a temperatura média da fase sólida e a temperatura da fase ar na saída do leito.

Respostas de simulações preliminares mostraram que, considerando cada instante de tempo simulado, as geometrias que proporcionaram maiores aquecimentos da fase sólida apresentaram também as maiores temperaturas da fase ar na saída. Isso indicou que nas configurações nas quais houve maior transferência de calor da fase ar para a fase sólida, a temperatura do ar na saída foi maior do que aquela observada para as outras geometrias. Sendo

assim, constatou-se que o balanço de energia executado poderia estar comprometido, provavelmente devido a problemas numéricos.

A fim de contornar essa ocorrência, foram feitas simulações variando diversos parâmetros buscando verificar o balanço de energia global. Para um sistema que não troca calor pela parede, as Equações 5.1 e 5.2 apresentam o calor cedido da fase ar para a fase sólida e o calor recebido pela fase sólida, respectivamente.

$$Q_{fs} = \int_0^{t_f} q_{fs} dt = \int_0^{t_f} \dot{m}_f c_{p,f} [T_{i,f} - T_{o,f}(t)] dt \quad (5.1)$$

$$Q_{sf} = m_p c_{p,s} [T_{i,s} - T_{o,s}(t_f)] \quad (5.2)$$

Tem-se que a taxa de calor transferido da fase ar para a fase sólida ( $q_{fs}$ ) depende da vazão mássica de ar na entrada ( $\dot{m}_f$ ) e de seu calor específico ( $c_{p,f}$ ), que foram considerados constantes, bem como da diferença entre as temperaturas do ar na entrada ( $T_{i,f}$ ) e na saída do leito ( $T_{o,f}$ ). A temperatura do ar na saída foi monitorada durante todo o tempo de simulação. Com os dados de  $T_{o,f}(t)$ , é possível obter o perfil de  $q_{fs}$  [J/s] com o tempo. Integrando a curva desses dados, pode-se obter o calor total transferido pela fase ar ( $Q_{fs}$  [J]) para o sistema, em que  $t_f$  é o tempo final da simulação.

O calor total recebido pela fase sólida é obtido pelo produto da massa de sólidos alimentados ( $m_p$ ), seu calor específico ( $c_{p,s}$ ) e a diferença entre as temperaturas inicial ( $T_{i,s}$ ) e final ( $T_{o,s}$ ) do sólido. A temperatura média da fase sólida foi monitorada durante todo o tempo de simulação. Como as paredes do sistema são adiabáticas, considerando a conservação da energia, o calor recebido pela fase sólida ( $Q_{sf}$ ) deve ser igual ao calor cedido pela fase fluida ( $Q_{fs}$ ), sendo a diferença entre o módulo de cada um ( $\Delta Q$ ) igual a zero.

O Quadro 4 mostra a configuração básica de cada caso avaliado, para os quais foram simulados os ângulos de cone de 30°, 45° e 60° e mantidas as condições iniciais e de contorno anteriormente mencionadas. A simulação-base (Caso 1) foi comparada com os demais casos. Foram avaliados os efeitos da ordem do método de discretização (*upwind*) da equação da energia, da correlação para cálculo do número de Nusselt e do espaçamento da malha sobre o resultado do balanço de energia.

Quadro 4 - Parâmetros de simulação utilizados para cada caso.

Caso	Método de discretização da Equação da energia		Correlação para Nu		Espaçamento da malha (mm)	
	1ª ordem <i>upwind</i>	2ª ordem <i>upwind</i>	Gunn (1978)	Kmieci (1980)	2,50	3,75
1	x		x		x	
2		x	x		x	
3	x			x	x	
4	x		x			x

Alguns fatores justificaram as alterações realizadas entre cada caso. Os esquemas de discretização *upwind* de 2ª ordem foram utilizados a fim de verificar se as incoerências no balanço de energia estariam atribuídas à difusão numérica, problema típico de simulações na qual há convecção dominante e métodos dissipativos de solução (MALISKA, 1995). A correlação para cálculo do número de Nusselt segundo Kmiec (1980) foi implementada manualmente por meio de uma UDF (BATISTA, 2017) e utilizada para comparar as respostas em relação à correlação de Gunn (1978) que, por sua vez, já se encontra disponível na interface do Fluent. Finalmente, uma malha com espaçamento cerca de 20% maior que o diâmetro da partícula foi adotada a fim de analisar a influência desse aspecto sobre o balanço de energia.

As curvas mostrando o perfil da temperatura da fase sólida e da fase ar na saída do leito para cada instante de tempo foram comparadas para cada um dos casos, analisando a influência dos parâmetros numéricos sobre o comportamento dessas variáveis. Também foi feito o balanço de energia para cada um dos casos, verificando se o calor cedido pela fase ar estava sendo recebido pela fase sólida. Foi empregado o tempo real final de simulação de  $t_f = 400$  s para os cálculos.

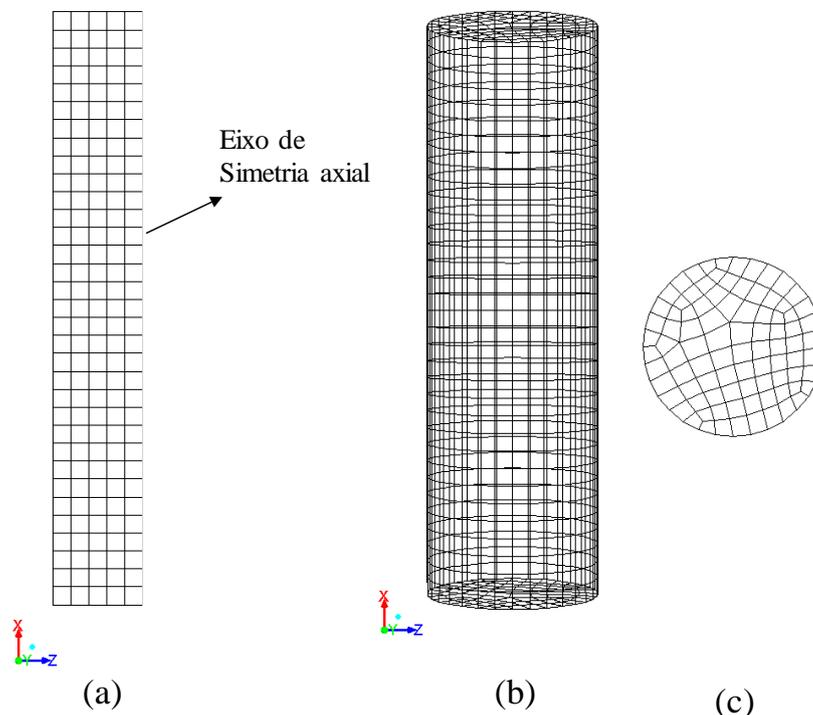
### 5.1.2 Leito fluidizado

A fim de checar o método utilizado para verificar o balanço de energia, foi simulado um sistema simplificado de um leito fluidizado. O leito proposto era cilíndrico, com 3 cm de diâmetro e 10 cm de altura, com metade de seu volume preenchido por sólidos ( $m_p = 26,65$  g) com as mesmas propriedades do sorgo. As paredes foram consideradas adiabáticas e uma velocidade de entrada de ar de 1,5 m/s foi introduzida no leito, para a qual simulações preliminares indicaram ser suficiente para a fluidização da fase sólida.

De modo a analisar o efeito das simulações com malhas 3D e 2D com simetria axial sobre o balanço de energia, foram simulados ambos os sistemas. A malha 2D e a malha 3D eram estruturadas, com 3 mm de espaçamento entre células (Figura 23). Os demais modelos, parâmetros, equações de discretização e procedimentos de simulação mencionados para o leito de jorro do Caso 1 foram utilizados para o leito fluidizado.

Foram plotados e comparados os comportamentos de temperatura média da fase sólida e temperatura de saída da fase ar com o tempo para os sistemas 2D e 3D. O balanço de energia exposto na seção anterior (Equações 5.1 e 5.2) também foi apresentado para o leito fluidizado.

Figura 23 - Malhas computacionais do sistema proposto do leito fluidizado (a) 2D com eixo de simetria e (b) 3D, vista lateral; (c) 3D, vista superior.



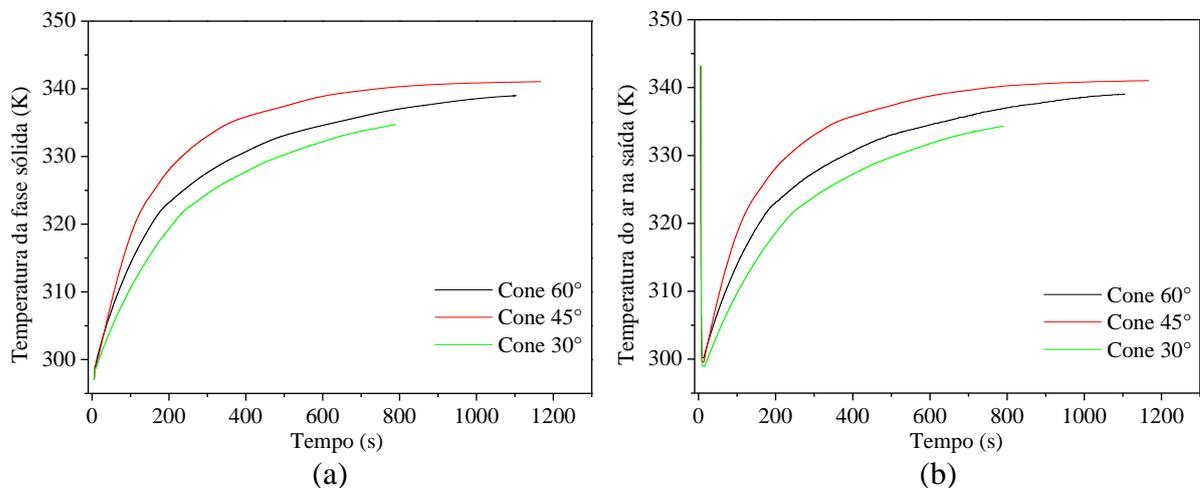
## 5.2 Resultados das simulações

### 5.2.1 Leito de jorro

A Figura 24 apresenta o resultado de simulações de transferência de calor referentes ao Caso 1, mostrando as curvas de temperatura da fase sólida e temperatura da fase ar na saída do leito em função do tempo para cada geometria avaliada. Observando as curvas, pode-se

verificar que o cone de 45° apresentou maior aquecimento da fase sólida com o tempo, seguido pelo cone de 60° e pelo cone de 30°. Como as paredes são adiabáticas, esperava-se que o cone de 45° apresentasse em algum instante de tempo uma temperatura do ar de saída menor quando comparado às outras configurações, indicando a maior transferência de calor da fase ar para a fase sólida. No entanto, não foi observado esse comportamento nas respostas das simulações. Sendo assim, foi observada uma incoerência física na resposta simulada, o que indicou a presença de um possível problema numérico associado ao fechamento do balanço de energia. Observada essa ocorrência, procurou-se avaliar diferentes parâmetros de simulação frente ao balanço de energia do modelo.

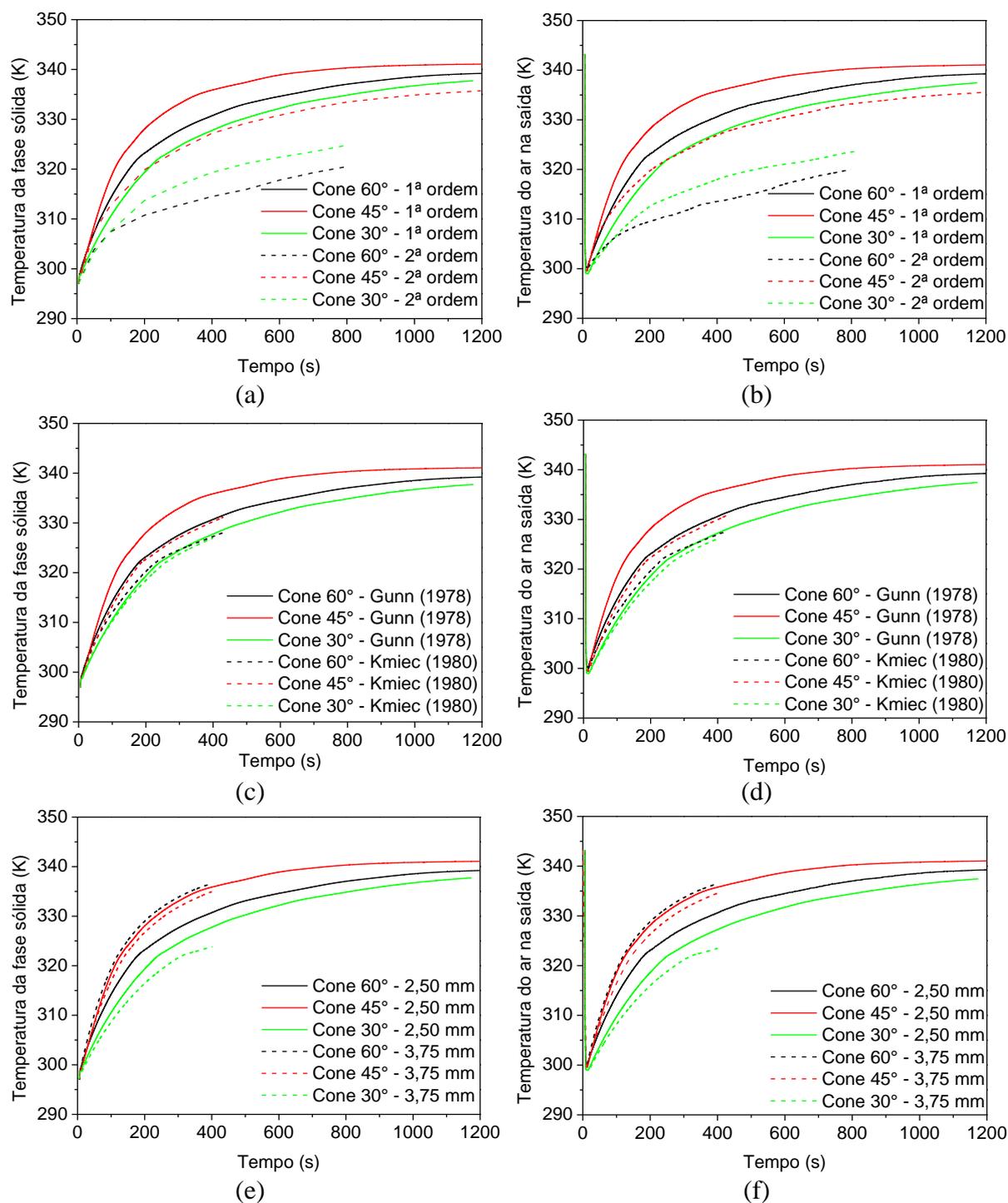
Figura 24 - Comportamento da (a) temperatura da fase sólida e da (b) temperatura da fase ar na saída do leito com o tempo para diferentes ângulos de cone.



A Figura 25 apresenta as curvas de temperatura média da fase sólida e temperatura do ar na saída do leito ao longo do tempo para cada um dos casos avaliados. Para cada gráfico, a comparação é feita em relação à simulação-base, referente ao caso 1, apresentado com linhas contínuas. Os resultados das simulações que variaram o método de discretização, a correlação para cálculo do número de Nusselt e o espaçamento da malha computacional correspondem às linhas tracejadas.

Observando a Figura 25 tem-se que, de forma geral, todos os casos apresentaram o mesmo comportamento anteriormente observado para o caso 1, ou seja, a geometria que proporcionou o maior aquecimento da fase sólida resultou em uma maior temperatura da fase ar na saída do leito. No entanto, é importante observar que os parâmetros numéricos avaliados tiveram impacto sobre as respostas de forma quantitativa e qualitativa.

Figura 25 - Comparação entre as temperaturas da fase sólida e da fase ar na saída do leito em relação a (a;b) Casos 1 e 2 - correlação para cálculo do número de  $Nu_s$ ; (c;d) Casos 1 e 3 ordem *upwind* para solução da equação da energia; Casos 1 e 4 - espaçamento entre nós da malha computacional (e;f).



Para o método de discretização *upwind* de 1ª ordem, o leito que aqueceu a fase sólida mais lentamente foi aquele com ângulo de cone de 30°. Já para o método de ordem mais elevada,

o cone de 60° apresentou o aquecimento mais lento. As demais geometrias simuladas de acordo com os outros casos (3 e 4) apresentaram a mesma ordem de aquecimento do leito observada para o caso 1, isto é, maior aquecimento para o cone de 45° seguido pelos ângulos de 60° e de 30°, respectivamente.

Quanto à correlação para cálculo do número de Nusselt, o comportamento qualitativo das curvas foi o mesmo. No entanto, a correlação de Kmiec (1980) indicou um aquecimento mais lento do leito para todas as configurações. Além disso, diferenças mais discretas entre o comportamento de cada curva foram observadas, o que refletiu em um menor efeito do ângulo de cone sobre o aquecimento da fase sólida.

Pela comparação entre as curvas das temperaturas para cada geometria utilizando diferentes espaçamentos da malha, pode-se observar o efeito desse aspecto sobre as respostas quantitativas do modelo. Para a malha de maior espaçamento, o comportamento da temperatura para os ângulos de cone de 45° e 60° foi muito próximo, enquanto o cone de 30° apresentou aquecimento ainda mais lento que para a malha de maior refino. Assim sendo, o comportamento quantitativo da temperatura no regime transiente dependeu do espaçamento da malha empregado.

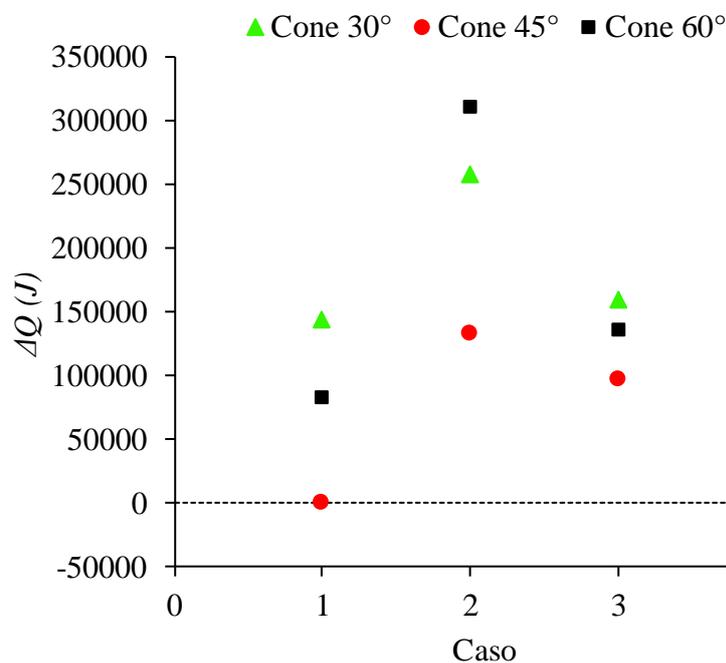
Sendo assim, os parâmetros de simulação escolhidos afetaram consideravelmente o comportamento das temperaturas das fases sólida e ar ao longo da simulação de transferência de calor de escoamentos multifásicos do leito de jorro em regime transiente.

Na Figura 26 estão apresentados os resultados do balanço de energia verificado para cada um dos casos e geometrias simulados, o qual foi feito pelo cálculo dos valores de  $\Delta Q$ . A linha tracejada corresponde ao valor de  $\Delta Q$  igual a zero, retratando um balanço de energia fechado para o sistema em análise, no qual todo o calor perdido pela fase ar é recebido pela fase sólida. Ressalta-se que o calor necessário para aquecer a fase sólida de sua temperatura inicial até a temperatura da fase ar é de cerca de 257.000 J.

Observa-se que nenhum dos casos simulados apresentou um balanço de energia coerente para todos os ângulos de base cônica. Somente o ângulo de 45° com parâmetros de simulação definidos conforme o caso 1 apresentou balanço de energia coerente. No entanto, as demais configurações apresentaram desvios que variaram de 12.000 até 311.000 J. Salienta-se que os valores do número de Nusselt para a correlação de Gunn (1978) ficaram entre 2 e 70, que são valores condizentes com a ordem de grandeza desse adimensional observada experimentalmente na literatura (FREITAS e FREIRE, 2001).

Os resultados do balanço de energia variaram conforme o caso e a geometria simulados. A utilização de esquema *upwind* de segunda ordem (caso 2) para discretização da equação de energia resultou em valores de  $\Delta Q$  ainda mais elevados que para o método de primeira ordem (caso 1). A utilização da correlação para cálculo do número de Nusselt segundo Kmiec (1980), conforme o caso 3, não influenciou consideravelmente no fechamento do balanço de energia quando comparado à correlação de Gunn (1978). Quanto à malha computacional, a utilização de um espaçamento maior entre células (caso 4) indicou menores desvios de  $\Delta Q$  em relação ao valor nulo para as configurações de 45° e 60°. No entanto, para o cone de 30° esse desvio ainda foi muito elevado.

Figura 26 - Diferença entre o calor cedido pela fase ar ( $Q_{fs}$ ) e o calor recebido pela fase sólida ( $Q_{sf}$ ) para cada configuração e casos simulados.



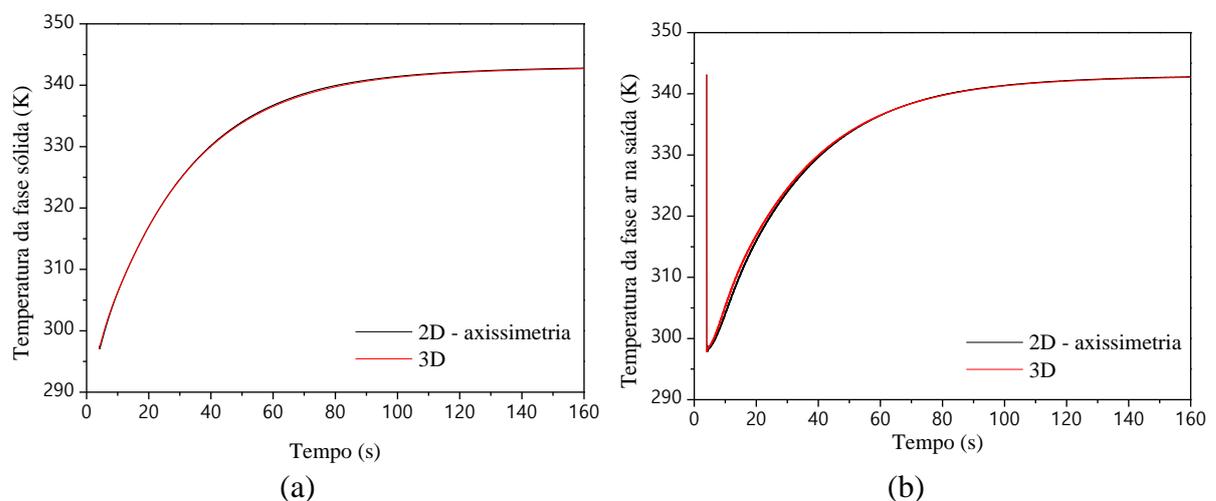
Para a maioria das configurações e casos simulados, observa-se que há uma quantidade de calor perdida pela fase ar que não foi contabilizada como sendo transferida para a fase sólida. Ou seja, houve calor sendo perdido para o “vazio”. Algumas possíveis fontes dos desvios observados residem na escala do sistema simulado, bem como na utilização da massa de sólidos para calcular o calor recebido pela fase sólida. Como o modelo Euleriano trata as partículas como um pseudo-fluido, é possível que esse modelo não consiga considerar a transferência de calor para a fase sólida por meio de sua massa.

Ressalta-se que a própria comparação da transferência de calor entre diferentes geometrias foi o que a princípio possibilitou a visualização das incoerências físicas observadas nas respostas das simulações. Modelos similares ao apresentado neste trabalho já foram utilizados para simular outros casos presentes na literatura (SZAFRAN e KMIEC, 2004). Sendo assim, é importante indicar que, quando possível, além da validação com dados experimentais, as repostas de simulações de transferência de calor em escoamentos multifásicos em leito de jorro também tenham o seu balanço de energia verificado.

### 5.2.2 Leito fluidizado

A Figura 27 apresenta os resultados de temperatura média da fase sólida, bem como da temperatura da fase ar na saída do leito monitorados ao longo do tempo para as simulações do leito fluidizado com malhas 2D e 3D. Observa-se que para ambas simulações os resultados foram muito próximos, indicando quase nenhuma diferença entre o comportamento global das temperaturas. Nesse sentido, a simulação 2D apresentou-se mais vantajosa por demandar menor esforço computacional.

Figura 27 - Comparação entre as temperaturas da fase sólida (a) e da fase ar na saída do leito (b) para a simulação bidimensional com simetria axial e a simulação tridimensional.



Para esse sistema, seriam necessários aproximadamente 1.600 J para aquecer a fase sólida de sua temperatura inicial até a temperatura do ar de entrada. Os balanços de energia para esse sistema foram satisfatoriamente atendidos, com desvios  $\Delta Q$  de 32 J e 55 J para as geometrias com malhas 3D e 2D, respectivamente. As formas utilizadas para obtenção da

temperatura média da fase sólida, bem como para a integração do calor transferido pela fase ar ao longo do tempo justificam o fato de esses valores serem pouco diferentes de zero. Sendo assim, a dimensão apresentada pela malha (2D ou 3D) não apresentou impacto considerável sobre o balanço de energia, já que os resultados encontrados foram muito próximos.

Como para o leito fluidizado proposto foram observados valores de  $\Delta Q$  próximos a zero, o método de análise da solução numérica baseado na massa de sólidos alimentados, bem como na temperatura da fase ar e da fase sólida, indicou um balanço de energia fechado para esse sistema.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÕES

De modo geral, por este trabalho foi possível mostrar a importância e aplicabilidade da CFD para avaliação de diferentes geometrias e condições de operação do leito de jorro. A seguir, são abordadas as conclusões obtidas para cada fenômeno de transferência analisado.

#### **6.1 Fluidodinâmica**

Os resultados das simulações do leito de jorro com base cônica de 60° pelo modelo multifásico Euleriano apresentaram boa concordância quando comparados aos dados experimentais da literatura referentes à curva característica. Como a técnica CFD previu satisfatoriamente os resultados para esse sistema, a mesma modelagem matemática e procedimento de simulação foram utilizados para avaliar o comportamento do leito para diferentes ângulos de cone.

O método apresentado para determinação do tempo de ciclo da fase sólida por meio de abordagem CFD Euler-Euler teve boa concordância com os dados experimentais de SPREUTELS *et al.* (2016), sendo adequado para estimar a circulação das partículas no sistema e, portanto, foi utilizado para comparar o desempenho fluidodinâmico dos leitos.

Para uma mesma velocidade de entrada de ar e vários ângulos de cone, a vazão mássica de sólidos no canal de jorro foi afetada por uma série de fatores, incluindo a carga de partículas, a altura de leito estático, bem como a porosidade e a velocidade da fase sólida no canal de jorro. Menores ângulos de cone favoreceram a passagem de uma maior quantidade de partículas para o canal de jorro, contribuindo para uma maior vazão mássica de sólidos e, conseqüentemente, para um menor tempo de ciclo das partículas. Foi observado que, para uma dada velocidade de entrada de ar, aumentar a carga de sólidos no leito de jorro pode beneficiar ou prejudicar a vazão mássica de sólidos no canal de jorro.

Considerando os resultados das simulações obtidos para as configurações operacionais e geométricas investigadas, a análise via planejamento fatorial mostrou que a vazão mássica da fase sólida no canal de jorro aumentou com a redução do ângulo de cone e com o aumento na velocidade de entrada de ar. O efeito quadrático observado para a carga de sólidos indicou que para cada velocidade de entrada de ar, há uma carga de sólidos que maximiza a vazão mássica

da fase sólida no canal de jorro. Ademais, o tempo médio de ciclo da fase sólida diminuiu quando menores ângulos de cone e menores cargas de sólidos foram utilizadas em combinação com maiores velocidades de entrada de ar. Todas as variáveis tiveram efeito significativo sobre ambas as respostas, com o ângulo de cone tendo a maior influência sobre a vazão mássica de sólidos no canal de jorro. A carga de sólidos no leito teve o efeito mais pronunciado sobre o tempo médio de ciclo da fase sólida, indicando a importância de avaliar essa variável em estudos sobre a circulação de partículas em leitos de jorro.

Os resultados das simulações da análise de curto-circuito da fase sólida mostraram que os menores ângulos de cone apresentaram as maiores vazões de sólidos no canal de jorro nas posições mais próximas ao bocal de entrada de ar. Sendo assim, essas geometrias favorecem ciclos completos das partículas, proporcionando uma melhor qualidade na circulação.

Portanto, as simulações indicaram que menores ângulos de cone favorecem a circulação de sólidos e podem ser utilizados para melhorar a secagem do sorgo em leitos de jorro.

## **6.2 Transferência de calor**

Nas simulações de transferência de calor para diferentes ângulos de cone do leito de jorro, verificou-se que o balanço de energia não estava sendo atendido nas simulações. Por esse motivo, diferentes parâmetros de simulação foram utilizados procurando contornar esse problema. Foi observado que os parâmetros de simulação escolhidos afetaram o comportamento das temperaturas das fases sólida e gasosa ao longo da simulação transiente de transferência de calor nos leitos de jorro analisados neste trabalho. Assim, o método de discretização da equação da energia, a correlação para cálculo do número de Nusselt e o espaçamento entre nós da malha computacional exerceram considerável influência sobre as respostas do modelo, tanto quantitativo quanto qualitativamente.

Foi proposto um método para a verificação do balanço de energia em simulações de leitos móveis e ressaltada a importância da análise dos dados de entrada e saída do simulador, de modo a verificar a coerência física do modelo. Para os sistemas de leito de jorro analisados, o método indicou que o balanço de energia não foi obedecido. No entanto, aplicando-se o mesmo método para analisar o sistema proposto envolvendo um leito fluidizado, foi observado que o balanço de energia foi atendido para as malhas computacionais 2D com simetria axial e 3D.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar o efeito das propriedades da fase sólida ( $d_s, \rho_s$ ) sobre a circulação das partículas no leito jorro por simulações CFD Euler-Euler utilizando o método apresentado;
- Avaliar a circulação da fase sólida no leito de jorro com base no efeito do ângulo de repouso estático das partículas frente a diferentes ângulos da base cônica;
- Avaliar o efeito de diferentes propriedades da fase sólida ( $d_s, \rho_s$ ) sobre o curto-circuito das partículas no leito de jorro.
- Simular a fluidodinâmica e transferência de calor do leito de jorro por modelo Granular Euleriano utilizando malhas tridimensionais.
- Dar continuidade às simulações de transferência de calor no leito de jorro apresentado, utilizando outros procedimentos de solução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTZIBAR, H.; LOPEZ, G.; ESTIATI, I.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Particle Cycle Times and Solid Circulation Rates in Conical Spouted Beds with Draft Tubes of Different Configuration. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 52, p. 15959–15967, 2013.
- BATISTA, J. N. M. **Análise da fluidodinâmica e da transferência de calor em leito de jorro operando com sementes de sorgo utilizando CFD**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.
- BATISTA, J. N. M.; BRITO, R. C. DE; BÉTTEGA, R. Influence of inlet air distributor geometry on the fluid dynamics of conical spouted beds: A CFD study. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, v. 4, n. 1, p. 11–21, 2018.
- BÉTTEGA, R.; DA ROSA, C. A.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. 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**, v. 48, n. 24, p. 11181–11188, 2009a.
- BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Scale-up study of spouted beds using computational fluid dynamics. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 2, p. 193–203, 2009b.
- BÉTTEGA, R.; DE ALMEIDA, A. R. F.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. CFD modelling of a semi-cylindrical spouted bed: Numerical simulation and experimental verification. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 2, p. 177–184, 2009c.
- BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Three-dimensional numerical simulation of semi-cylindrical and cylindrical spouted bed hydrodynamics. **Drying Technology**, v. 28, n. 11, p. 1266–1276, 2010.
- BRITO, R. C. DE; BATISTA, J. N. M.; DE PÁDUA, T. F.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. **Estudo da secagem de sementes de sorgo em leito de jorro**. In: Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Fortaleza: Galoá Proceedings, 2016.
- BRITO, R. C. DE; DE PÁDUA, T. F.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor* (L) moench]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 95–105, 2017.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: An Avi, 1992.
- BROWN, S. L.; LATTIMER, B. Y. Transient gas-to-particle heat transfer measurements in a spouted bed. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 44, p. 883–892, 2013. Elsevier Inc.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Porto Alegre: AMG Editora, 2011.

CUI, H.; GRACE, J. R. Spouting of biomass particles: A review. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 10, p. 4008–4020, 2008.

DA ROSA, C. A. **Estudo experimental e numérico da fluidodinâmica e das transferências de calor e massa em um leito de jorro contínuo : Uso da técnica CFD**. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia química, Universidade Federal de São Carlos, 2010.

DAY, J. Y.; MORGAN, M. H.; LITTMAN, H. Measurements of spout voidage distributions, particle velocities and particle circulation rates in spouted beds of coarse particles-II. Experimental verification. **Chemical Engineering Science**, v. 42, n. 6, p. 1461–1470, 1987.

DING, J.; GIDASPOW, D. A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow. **AIChE Journal**, v. 36, n. 4, p. 523–538, 1990.

DU, W.; BAO, X.; XU, J.; WEI, W. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Assessment of drag coefficient correlations. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 5, p. 1401–1420, 2006.

DUARTE, C. R. **Estudo Experimental E De Simulação Da Fluidodinâmica E Recobrimento Em Leito De Jorro**. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia química, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

DUARTE, C. R.; OLAZAR, M.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Numerical simulation and experimental study of fluid-particle flows in a spouted bed. **Powder Technology**, v. 188, n. 3, p. 195–205, 2009.

EVIN, D.; GUL, H.; TANYIILDIZI, V. Grain drying in a paraboloid-based spouted bed with and without draft tube. **Drying Technology**, v. 26, n. 12, p. 1577–1583, 2008.

FATTAHI, M.; HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G. CFD simulation of transient gas to particle heat transfer for fluidized and spouted regimes. **Applied Thermal Engineering**, v. 105, p. 385–396, 2016.

FREITAS, L. A. P.; FREIRE, J. T. Gas-to-particle heat transfer in the draft tube of a spouted bed. **Drying Technology**, v. 19, n. 6, p. 1065–1082, 2001.

GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach, Fluidization VII. In: E. Foundation (Org.); 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. p.75–82, Nova Iorque, 1992.

GOLSHAN, S.; ZARGHAMI, R.; MOSTOUFI, N. Hydrodynamics of slot-rectangular spouted beds : Process intensification. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 121, p. 315–328, 2017.

GUNN, D. J. Transfer of mass and heat to particles in fixed beds. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 21, p. 467, 1978.

HE, Y. L.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. Scale-up studies of spouted beds. **Chemical Engineering Science**, v. 52, n. 2, p. 329–339, 1997.

- HE, Y. L.; QIN, S. Z.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. Particle velocity profiles and solid flow patterns in spouted beds. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 72, n. 8, p. 561–568, 1994.
- HINZE, J. O. **Turbulence**. New York: McGraw-Hill Publishing Co., 1975.
- HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G.; OLAZAR, M. CFD study of particle velocity profiles inside a draft tube in a cylindrical spouted bed with conical base. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 45, n. 5, p. 2140–2149, 2014.
- HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G.; SAEEDI RAZAVI, B.; ZHONG, W. Computational fluid dynamic simulation of hydrodynamic behavior in a two-dimensional conical spouted bed. **Energy and Fuels**, v. 24, n. 11, p. 6086–6098, 2010.
- HOSSEINI, S. H.; FATTAHI, M.; AHMADI, G. Hydrodynamics studies of a pseudo 2D rectangular spouted bed by CFD. **Powder Technology**, v. 279, p. 301–309, 2015.
- HOSSEINI, S. H.; FATTAHI, M.; AHMADI, G. CFD Study of hydrodynamic and heat transfer in a 2D spouted bed: Assessment of radial distribution function. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 58, p. 107–116, 2016.
- IDDIR, H.; ARASTOPOUR, H. Modeling of multitype particle flow using the kinetic theory approach. **AIChE Journal**, v. 51, n. 6, p. 1620–1632, 2005.
- INCROPERA, F.; BERGMAN, T. L.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- JOHNSON, P. C.; JACKSON, R. Frictional-Collisional Constitutive Relations for Granular Materials with Application to Plane Shearing. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 176, p. 67–93, 1987.
- KMIEC, A. **Bed expansion and heat and mass transfer in fluidized beds**, 1980.
- KUIPERS, J. A. M.; PRINS, W.; SWAAIJ, W. P. M. Numerical calculation of wall-to-bed heat transfer coefficients in gas-fluidized beds. **AIChE Journal**, v. 38, p. 1079–1091, 1992.
- LIU, X.; ZHONG, W.; SHAO, Y.; REN, B.; JIN, B. Evaluation on the effect of conical geometry on flow behaviours in spouted beds. **Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 92, n. 4, p. 768–774, 2014.
- LOHA, C.; CHATTOPADHYAY, H.; CHATTERJEE, P. K. Euler-Euler CFD modeling of fluidized bed: Influence of specular coefficient on hydrodynamic behavior. **Particuology**, v. 11, n. 6, p. 673–680, 2013.
- LOURENÇO, R. DE O. **Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia química, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- LÜLE, S.; COLAK, U.; KOKSAL, M.; KULAH, G. CFD Simulations of Hydrodynamics of Conical Spouted Bed Nuclear Fuel Coaters. **Chemical Vapor Deposition**, v. 21, n. 4–5–6, p. 122–132, 2015.

- LUN, C. K. K.; SAVAGE, S. B. The effects of an impact velocity dependent coefficient of restitution on stresses developed by sheared granular materials. **Acta Mechanica**, v. 63, p. 15–44, 1986.
- LUN, C. K. K.; SAVAGE, S. B.; JEFFREY, D. J.; CHEPURNIY, N. Kinetic Theories for Granular Flow: inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in General Flow Field. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 140, p. 223–256, 1984.
- LUO, K.; YANG, S.; ZHANG, K.; FANG, M.; FAN, J. Particle dispersion and circulation patterns in a 3D spouted bed with or without draft tube. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 52, n. 28, p. 9620–9631, 2013.
- MA, D.; AHMADI, G. An Equation of State for Dense Rigid Sphere Gases. **Journal of Chemical Physics**, v. 84, p. 3449–3450, 1986.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press, 1974.
- MATHUR, K. B.; GISHLER, P. E. A technique for contacting gasses with coarse solid particles. **AIChE Journal**, v. 1, n. 1, p. 157–164, 1955.
- MOLINER, C.; MARCHELLI, F.; SPANACHI, N.; et al. CFD simulation of a Spouted Bed: comparison between the Discrete Element Method (DEM) and the Two Fluid Method (TFM). **Chemical Engineering Journal**, 2018.
- MOSTOUFI, N.; KULAH, G.; KOKSAL, M. Flow structure characterization in conical spouted beds using pressure fluctuation signals. **Powder Technology**, v. 269, p. 392–400, 2015.
- OGAWA, S.; UMEMURA, A.; OSHIMA, N. On the equations of fully fluidized granular materials. **Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP**, v. 31, n. 4, p. 483–493, 1980.
- OLAZAR, M.; JOSÉ, M. J. S.; LLAMOSAS, R.; BILBAO, J. Hydrodynamics of Sawdust and Mixtures of Wood Residues in Conical Spouted Beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 33, n. 4, p. 993–1000, 1994.
- OLAZAR, M.; LOPEZ, G.; ALTZIBAR, H.; AMUTIO, M.; BILBAO, J. Drying of Biomass in a Conical Spouted Bed with Different Types of Internal Devices. **Drying Technology**, v. 30, n. 2, p. 207–216, 2012.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANDES, J. M.; BILBAO, J. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 31, n. 7, p. 1784–1792, 1992.
- OLAZAR, M.; SAN JOSÉ, M. J.; IZQUIERDO, M. A.; DE SALAZAR, A. O.; BILBAO, J. Effect of operating conditions on solid velocity in the spout, annulus and fountain of spouted beds. **Chemical Engineering Science**, v. 56, n. 11, p. 3585–3594, 2001.
- PALKAR, R. R.; SHILAPURAM, V. Development of a model for the prediction of hydrodynamics of a liquid-solid circulating fluidized beds: A full factorial design approach. **Powder Technology**, v. 280, p. 103–112, 2015.

PERAZZINI, M. T. B.; FREIRE, F. B.; FREIRE, J. T. Influence of bed geometry on the drying of skimmed milk in a Spouted Bed. **Advances in Chemical Engineering and Science**, v. 5, p. 447–460, 2015.

RAGHAVAN, G. S. V.; KALWAR, M. I.; MUJUMDAR, A. S. Static vertical pressure of grains on air inlets of two-dimensional non-aerated spouted beds. **Powder Handling and Processing**, v. 10, n. 1, 1998.

RICHARDSON, L. F. The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam. **Transactions of the Royal Society of London**, v. 210, n. A, p. 307–357, 1910.

ROACHE, P. J. Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics. **Annu. Ver. Fluid. Mech**, v. 29, p. 123–160, 1997.

SALDARRIAGA, J. F.; ATXUTEGI, A.; AGUADO, R.; et al. Influence of contactor geometry and draft tube configuration on the cycle time distribution in sawdust conical spouted beds. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 102, p. 80–89, 2015.

SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; DE SALAZAR, A. O.; OLAZAR, M.; BILBAO, J. Spout geometry in shallow spouted beds with solids of different density and different sphericity. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 22, p. 8393–8400, 2005.

SAN JOSÉ, M. J.; ALVAREZ, S.; DE SALAZAR, A. O.; OLAZAR, M.; BILBAO, J. Operating conditions of conical spouted beds with a draft tube. Effect of the diameter of the draft Tube and of the height of entrainment zone. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 46, n. 9, p. 2877–2884, 2007.

SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; AGUADO, R.; BILBAO, J. Influence of the conical section geometry on the hydrodynamics of shallow spouted beds. **The Chemical Engineering Journal**, v. 62, n. 95, p. 113–120, 1996.

SANT'ANNA, M. C. S.; CRUZ, W. R. DOS S.; SILVA, G. F. DA; MEDRONHO, R. DE A.; LUCENA, S. Analyzing the fluidization of a gas-sand-biomass mixture using CFD techniques. **Powder Technology**, v. 316, p. 367–372, 2017.

SANTOS, D. A.; ALVES, G. C.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. Disturbances in the hydrodynamic behavior of a spouted bed caused by an optical fiber probe: Experimental and CFD study. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 9, p. 3801–3810, 2012.

SANTOS, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais**. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em engenharia química, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

SANTOS, K. G.; FRANCISQUETTI, M. C. C.; MALAGONI, R. A.; BARROZO, M. A. S. Fluid Dynamic Behavior in a Spouted Bed with Binary Mixtures Differing in Size. **Drying Technology**, v. 33, n. 14, p. 1746–1757, 2015.

SANTOS, K. G.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Three-dimensional computational fluid dynamics modelling of spouted bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 87, n. 2, p. 211–219, 2009.

- SARI, S.; KULAH, G.; KOKSAL, M. Characterization of gas-solid flow in conical spouted beds operating with heavy particles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 40, p. 132–139, 2012.
- SCHAEFFER, D. G. Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow. **Journal of Differential Equations**, v. 66, n. 1, p. 19–50, 1987.
- SETAREHSHENAS, N.; HOSSEINI, S. H.; ESFAHANY, M. N.; AHMADI, G. Three-dimensional CFD study of conical spouted beds containing heavy particles: Design parameters. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 5, p. 1541–1553, 2017.
- SHARMA, D. K.; THOMPSON, T. L. Specific heat and thermal conductivity of sorghum. **Trans. ASAE**, v. 16, p. 114–117, 1973.
- SIMONIN, C.; VIOLLET, P. L. Predictions of an Oxygen Droplet Pulverization in a Compressible Subsonic Coflowing Hydrogen Flow. **Numerical Methods for Multiphase Flows**, p. 65–82, 1990.
- SOBIESKI, W. Selected aspects of developing a simulation model of a spouted bed grain dryer based on the eulerian multiphase model. **Drying Technology**, v. 28, n. 12, p. 1331–1343, 2010.
- SPREUTELS, L. **Séchage des levures en lit à jet conique: expérimentation et modélisation multi-échelles**. Tese de doutorado. Universidade de Montreal, 2013.
- SPREUTELS, L.; HAUT, B.; LEGROS, R.; BERTRAND, F.; CHAOUKI, J. Experimental Investigation of Solid Particles Flow in Conical Spouted Bed Using Radioactive Particle Tracking. **AIChE Journal**, v. 62, n. 1, p. 26–37, 2016.
- SZAFRAN, R. G.; KMIEC, A. CFD Modeling of Heat and Mass Transfer in a Spouted Bed Dryer. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 43, n. 4, p. 1113–1124, 2004.
- VIEIRA NETO, J. L.; BARROZO, M. A. DE S.; MURATA, V. V. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo draft**. Tese de doutorado. Programa de pós-graduação em engenharia química, Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- YANG, S.; LUO, K.; FANG, M.; FAN, J.; CEN, K. Influences of operating parameters on the hydrodynamics of a 3-D spout-fluid bed based on DEM modeling approach. **Chemical Engineering Journal**, v. 247, p. 161–173, 2014.
- ZEHNER, P.; SCHLÜNDER, E. U. Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei Mässigen Temperaturen. **Chemie Ing. Techn.**, v. 42, n. 14, p. 933, 1970.
- ZHANG, C. H.; HUANG, L. X.; XIE, P. J.; et al. Numerical Simulation of a Spouted Bed Using Computational Fluid Dynamics (CFD). **Drying Technology**, v. 31, n. 15, p. 1879–1887, 2013.
- ZHONG, H.; LAN, X.; GAO, J.; ZHENG, Y.; ZHANG, Z. The difference between specularly coefficient of 1 and no-slip solid phase wall boundary conditions in CFD simulation of gas-solid fluidized beds. **Powder Technology**, v. 286, p. 740–743, 2015.

## APÊNDICE A – MÉTODO GCI

O GCI é um método para determinação do grau de refino de uma malha por meio da estimativa do erro de sua resposta em relação àquela de uma malha com infinitas células. Foi desenvolvido por ROACHE (1997) e derivado da teoria generalizada da Extrapolação de RICHARDSON (1910).

Partindo de soluções obtidas em simulações com malhas de diferentes graus de refinamento, por exemplo, grosseira, intermediária e fina, o método GCI estima os erros entre cada solução, calcula qual seria o resultado obtido supondo uma malha de espaçamento entre células tendendo a zero (infinitas células), e então compara esse resultado com as soluções das simulações. Assim, o GCI estima o quão longe as soluções do modelo simulado estão do valor assintótico, conseqüentemente indicando a necessidade de realizar modificações no número de células contido na malha a ser empregada. A seguir, o método será descrito conforme apresentado em ROACHE (1997).

Para determinar o GCI usando três níveis de malhas, é necessário obter as respostas da variável de interesse obtidas nas simulações com cada uma delas. Dado que  $f_1$ ,  $f_2$  e  $f_3$  são as soluções numéricas da variável de interesse obtidas em simulações com malha fina, intermediária e grosseira, a diferença dos resultados é calculada pela Equação A.1. A razão de refinamento da malha ( $r_{12}$  e  $r_{23}$ ) para geometrias complexas é dada pela Equação A.2, sendo calculada com base na razão entre o número total de células ( $N_i$ ) em cada malha.

$$e_{12} = f_2 - f_1; e_{23} = f_3 - f_2 \quad (\text{A.1})$$

$$r_{12} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^{\frac{1}{D}}; r_{23} = \left(\frac{N_2}{N_3}\right)^{\frac{1}{D}} \quad (\text{A.2})$$

Em que D é a dimensão da malha (D = 2 para malha bidimensional).

Quando não se tem uma solução exata para o problema ou variável de interesse, é desejável obter a ordem do método de discretização ou taxa de convergência do modelo ( $p$ ) utilizando pelo menos três soluções de malha. Para  $r_{12} = r_{23}$ :

$$p = \frac{\ln\left(\frac{e_{23}}{e_{12}}\right)}{\ln(r)} \quad (\text{A.3})$$

Se  $r_{12} \neq r_{23}$ , resolve-se a Equação 4.6 via iterações pela Equação A.4, proposta por ROACHE (1997):

$$p = 0,5\xi + 0,5 \frac{\ln\beta}{\ln(r_{12})} \quad (\text{A.4})$$

Na qual  $\xi$  é o valor de  $p$  na iteração anterior e  $\beta$  é dado por:

$$\beta = \frac{(r_{12}^p - 1)e_{23}}{(r_{23}^p - 1)e_{12}} \quad (\text{A.5})$$

O erro relativo entre os resultados das malhas ( $\varepsilon$ ) pode ser calculado pela Equação A.6:

$$\varepsilon_{12} = \left| \frac{f_2 - f_1}{f_1} \right|; \varepsilon_{23} = \left| \frac{f_3 - f_2}{f_2} \right| \quad (\text{A.6})$$

Finalmente, é calculado o GCI pela Equação A.7, sendo que os resultados devem obedecer a relação  $GCI_{12}^{fina} < GCI_{23}^{fina}$ .

$$GCI_{12}^{fina} = \frac{1,25\varepsilon_{12}}{(r_{12}^p - 1)}; GCI_{23}^{fina} = \frac{1,25\varepsilon_{23}}{(r_{23}^p - 1)} \quad (\text{A.7})$$

Para verificar se a solução está na região assintótica, na qual  $a$  se aproxima de 1:

$$a = \frac{r_{12}^p GCI_{12}^{fina}}{GCI_{23}^{fina}} \quad (\text{A.8})$$

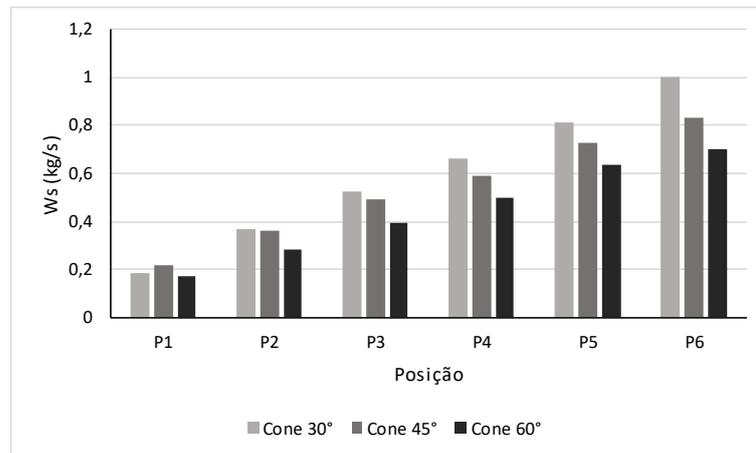
O valor estimado da resposta “real” do modelo é calculado por:

$$f_{exato} = f_1 + \frac{(f_1 - f_2)}{(r_{12}^p - 1)} \quad (\text{A.9})$$

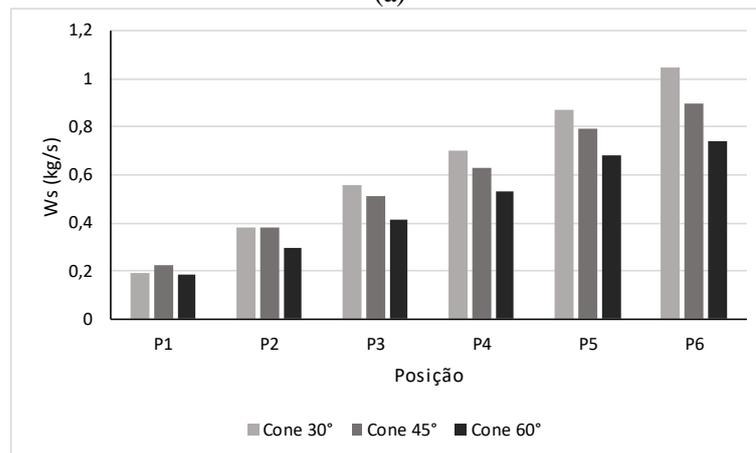
### APÊNDICE B – ANÁLISE DE CURTO-CIRCUITO DA FASE SÓLIDA

Os resultados e discussões das simulações que analisaram o curto-circuito da fase sólida para os leitos de jorro operando com 4,0 kg de sólidos foram apresentados na seção 4.2.7. As Figuras B1 e B2 contêm os resultados para 3,0 e 2,0 kg de sólidos, respectivamente.

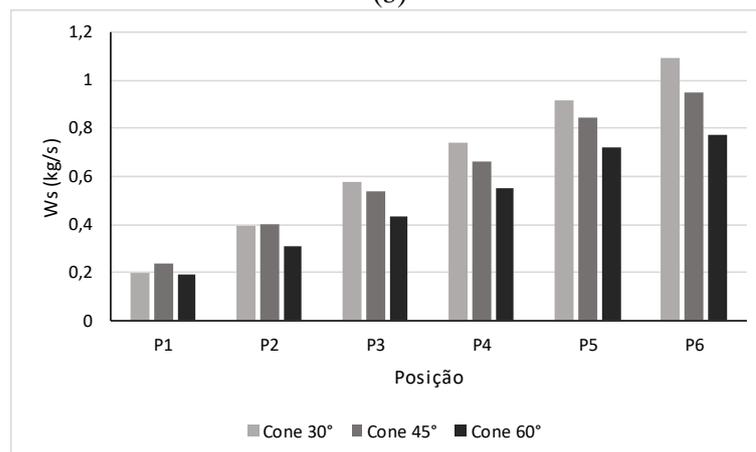
Figura B1 - Vazão mássica da fase sólida em cada posição do canal de jorro para as configurações de leito de jorro com massa de 3,0 kg de sólidos nas velocidades de entrada de ar de (a) 15,7 m/s, (b) 16,7 m/s e (c) 17,7 m/s.



(a)

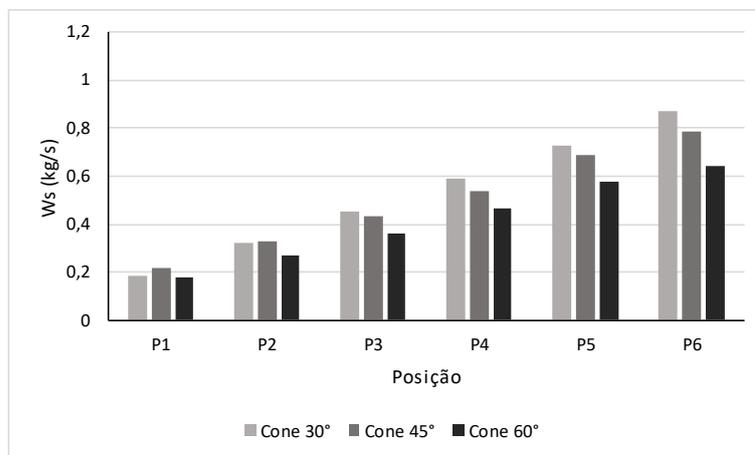


(b)

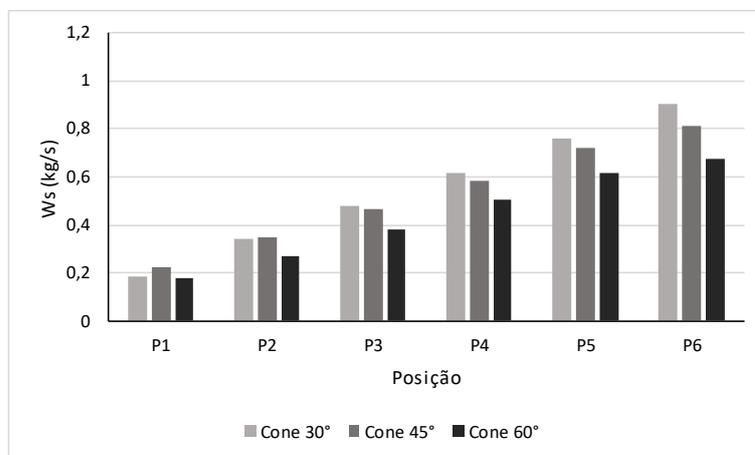


(c)

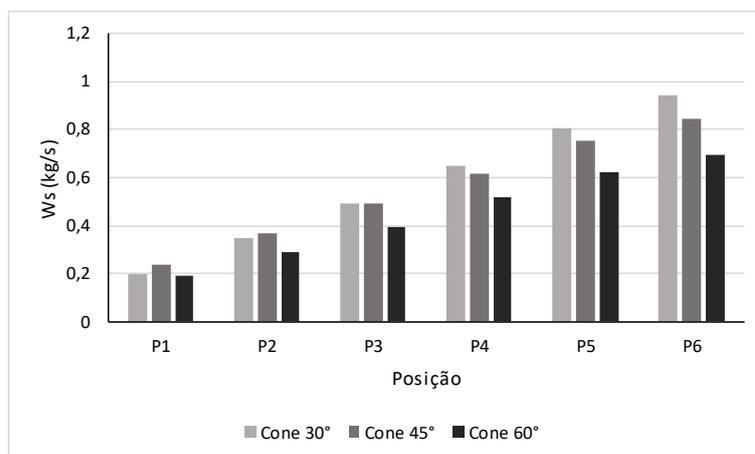
Figura B2 - Vazão mássica da fase sólida em cada posição do canal de jorro para as configurações de leito de jorro com massa de 2,0 kg de sólidos nas velocidades de entrada de ar de (a) 15,7 m/s, (b) 16,7 m/s e (c) 17,7 m/s.



(a)



(b)



(c)