

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPIRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITARIO NORTE DO ESPIRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

KAMILLA MALVERDI BARCELOS

**ANÁLISE DO POTENCIAL DO LEITO DE JORRO COMO
REATOR PARA PIRÓLISE DA CASCA DE COCO: ESTUDO
EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO VIA CFD**

SÃO MATEUS

2016

KAMILLA MALVERDI BARCELOS

**ANÁLISE DO POTENCIAL DO LEITO DE JORRO COMO
REATOR PARA PIRÓLISE DA CASCA DE COCO: ESTUDO
EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO VIA CFD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Centro Universitário Norte do Espírito Santo da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia, na área de concentração Engenharia, Tecnologia e Gestão.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Taisa Shimosakai de Lira.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro

SÃO MATEUS

2016

**ANÁLISE DO POTENCIAL DO LEITO DE JORRO COMO
REATOR PARA PIRÓLISE DA CASCA DE COCO: ESTUDO
EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO VIA CFD**

KAMILLA MALVERDI BARCELOS

Dissertação apresentada à
Universidade Federal do Espírito
Santo, como parte das exigências do
Programa de Pós-Graduação em
Energia, para obtenção do título de
Mestre em Energia.

Aprovada: 25/01/2016.

Prof^a. Dr^a. Taisa Shimosakai de Lira
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. Rodrigo Randow de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

Prof^a. Dr^a. Kássia Graciele dos Santos
Universidade Federal do Triângulo Mineiro
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre esteve ao meu lado e me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais, Marta Malverdi e Carlito Barcelos, e irmão Carlito pelo amor, dedicação, confiança e suporte em cada etapa da minha vida. Por entenderem a minha ausência em muitos momentos desde que ingressei no mestrado, até a conclusão desta dissertação.

À professora Dr^a Taisa Shimosakai de Lira pela orientação, incentivo e confiança, essenciais para a elaboração deste trabalho.

Aos professores do CEUNES/UFES pelos esclarecimentos e sugestões. Em especial aos professores Daniel da Cunha Ribeiro, Marcelo Silveira Bacelos, Thiago Padovani Xavier e Carla da Silva Meireles, que contribuíram de forma significativa no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus amigos, que torcem por mim, se preocupam e comemoram minhas vitórias. Em especial, às minhas amigas e companheiras de laboratório, Priscilla e Thais, pelo apoio e por tornar toda essa jornada mais agradável.

A todos os técnicos e servidores do CEUNES/UFES, que de forma direta e indireta colaboraram para a realização deste trabalho.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de estudo.

RESUMO

O aumento significativo no consumo e industrialização de água de coco verde no Brasil tem gerado grande quantidade de resíduos, os quais ampliam os problemas ambientais quando dispostos de maneira inadequada. No contexto atual de crescentes preocupações com questões energéticas, o potencial dessa biomassa como fonte renovável de energia é destacado. Dentre as tecnologias de conversão termoquímica de materiais lignocelulósicos, a técnica de pirólise vem recebendo atenção especial e o leito de jorro tem sido investigado como um reator promissor para esse processo, devido ao bom contato gás-sólido que proporciona. Entretanto, a complexidade fluidodinâmica nesse equipamento permanece sendo o principal obstáculo para sua utilização. Assim, com o intuito de contribuir para a aplicação do leito de jorro como reator de pirólise, este trabalho tem como objetivo investigar o comportamento fluidodinâmico das misturas de casca de coco e areia por meio de estudos experimentais e simulação via CFD. A análise dos dados de queda de pressão no leito permitiu identificar regimes de jorro estáveis para misturas com até 40% em massa de casca de coco. Para avaliar o efeito da fração mássica da casca de coco (10, 25 e 40 %) e altura de leito estático (6, 8, 10 cm) sobre a condição de jorro mínimo, foi realizada uma análise estatística por meio de um planejamento fatorial 3^2 com dois pontos centrais. Foi verificada a influência da massa total das partículas no leito e porosidade da mistura sobre a condição de mínimo jorro. A segregação ocorreu de forma sutil para todas as condições experimentais e o índice de mistura se desviou mais do ideal na base do equipamento, com predominância de areia, partícula mais densa, nessa região. O modelo Euleriano Granular Multifásico foi utilizado para descrever o escoamento de ar-sólido no leito de jorro e mostrou-se adequado para representar qualitativamente esse fenômeno. Entretanto, ao se analisar os valores de queda de pressão de mínimo jorro, nota-se que os resultados simulados subestimam os experimentais, com um erro relativo máximo de -34,26%. Diante da análise da estabilidade do leito, segregação e a fração de volume de cada fase na mistura, é recomendada a utilização de misturas com fração mássica de casca de coco de 25% em testes de pirólise.

Palavras-chave: Biomassa. Segregação. Energia. Pirólise. Fluidodinâmica.

ABSTRACT

The significant increase in consumption and green coconut water industrialization in Brazil has generated a lot of residues, which extend the environmental problems if disposed an inappropriate way. In the current context of growing concerns about energy issues, the potential of this biomass as a renewable energy source is highlighted. Among the thermochemical conversion technologies of lignocellulosic materials, the pyrolysis technique has received special attention and the spouted bed has been investigated as a promising reactor for this process due to the good gas-solid contact that it provides. However, the fluid dynamics complexity at this equipment remains as the main obstacle for its use. Thus, in order to contribute to the implementation of the spouted bed as pyrolysis reactor, this paper aims to investigate the fluid dynamic behavior of coconut shell and sand mixtures through experimental studies and CFD simulation. The analysis of the data of pressure drop in the bed allowed to identify stable spouted regimes for mixtures with up to 40 mass% of coconut shell. To evaluate the effect of the mass fraction of coconut shell (10, 25 and 40%) and static bed height (6, 8, 10 cm) above the minimum spouting condition, it was performed a statistical analysis using a factorial design 3^2 with two central points. The influence of the total mass of particles in the bed and the porosity of the mixture above the condition of minimum spouting was observed. The segregation occurred in a subtle way for all experimental conditions and the mixture index deviated more of the ideal at the base of the equipment, with predominance of sand, denser particle, in this region. The Eulerian Granular Multiphase model was used to describe the flow of air- solid in spouted beds and it was adequate to represent qualitatively this phenomenon. However, by analyzing the minimum spouting pressure drop values, it notes that the simulated results underestimate the experimental, with a maximum relative error of -34,26%. Based on the analysis of the stability of the bed, segregation and the volume fraction of each phase in mixture, the use of mixtures with mass fraction of coconut shell of 25% is recommended in pyrolysis tests.

Keywords: Biomass. Segregation. Energy. Pyrolysis. Fluid dynamics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Oferta interna de energia no Brasil em 2014.	18
Figura 2.2 - Principais partes do coco verde.	22
Figura 2.3 - Regiões características do leito de jorro.	32
Figura 2.4 - Leitos de jorro cônicos: (a) Convencional; (b) Jet Spouted Bed. ..	35
Figura 2.5 - Curva característica do leito de jorro.	36
Figura 2.6 - Desvio padrão do sinal de queda de pressão (σ) do leito em função da velocidade do ar (v) para vários regimes de escoamento: I - leito fixo; II - jorro estável; III - jorro instável.	39
Figura 2.7 - Principais elementos e funções que compõem a técnica CFD.	45
Figura 2.8 - Condições de contorno e iniciais do sistema sob análise.	49
Figura 3.1 - Material utilizado nos ensaios fluidodinâmicos: (a) casca de coco (b) areia.	59
Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental: 1) leito de jorro cônico, 2) termopar, 3) transdutor de pressão, 4) sistema de aquecimento, 5) soprador, 6) condicionador de sinais, 7) placa de aquisição de dados, 8) microcomputador.	67
Figura 3.3 - Base cônica do leito: (a) esquema das guilhotinas; (b) equipamento.	68
Figura 3.4 - Etapas do estudo de simulação utilizando a técnica CFD	72
Figura 4.1 - Leito de jorro com mistura composta por 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 8 cm: (a) regime de jorro (b) leito fixo.	79
Figura 4.2 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para uma mistura com 10% em massa da casca de coco e altura de leito estático de 8 cm.	80
Figura 4.3 - Curvas características obtidas para a) mistura de diferentes composições e altura de leito estático igual a $H=8$ e b) uma mistura com fração mássica da casca de coco de $X=0,25$ com diferentes alturas. ...	82

Figura 4.4 - Superfície de resposta para (a) queda de pressão e (b) velocidade do ar na condição de jorro mínimo em função da fração mássica da casca de coco na mistura e da altura do leito estático.....	85
Figura 4.5 - Modelo proposto para a queda de pressão na condição de mínimo jorro: (a) gráfico da probabilidade normal dos resíduos; (b) distribuição dos resíduos.....	86
Figura 4.6 - Figura 19 – Modelo proposto para a velocidade de mínimo jorro: (a) gráfico da probabilidade normal dos resíduos; (b) distribuição dos resíduos.....	86
Figura 4.7 - Índice de mistura nas regiões do leito de jorro para uma altura de leito estático de 8 cm e velocidades do ar de (a) $V = 1,1 V_{mj}$; (b) $V = 1,2 V_{mj}$ e (c) $V = 1,3 V_{mj}$	87
Figura 4.8 - Índice de mistura nas regiões do leito de jorro para uma mistura de fração mássica de $X= 0,25$ e altura de leito estático de (a) $H=6\text{cm}$; (b) $H=8\text{cm}$ e (c) $H=10\text{cm}$	87
Figura 4.9 - Malha computacional: (a) malha 1 – 4144 células; (b) malha 2 – 16688 células; (c) malha 3 – 26492 células.....	89
Figura 4.10 - Teste de independência da malha.	90
Figura 4.11 - Contornos de fração volumétrica de (a) casca de coco e (b) areia para o leito em regime de jorro.	91
Figura 4.12 - Mapa de vetores de velocidade para partículas de (a) casca de coco e (b) areia obtidos para o regime de jorro estabelecido.	92
Figura 4.13 - Flutuação da pressão em um leito de jorro.	93
Figura 4.14 - Comparação da curva característica para uma mistura composta por 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 10 cm.	94
Figura 4.15 – Contorno de fração volumétrica da casca de coco, areia e ar para velocidade do ar igual (a) 9,87 m/s; (b) 10,86 m/s; (c) 11,84 m/s; (d) 12,83 m/s.....	95
Figura A1 -(a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,10$ e $H=6$ cm.	111

Figura A2 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,10$ e $H=10$ cm.	111
Figura A3 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,25$ e $H=6$ cm.	112
Figura A4 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,25$ e $H=8$ cm.	112
Figura A5 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,25$ e $H=10$ cm.	113
Figura A6 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,40$ e $H=6$ cm.	113
Figura A7 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,40$ e $H=8$ cm.	114
Figura A8 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,40$ e $H=10$ cm.	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Teor dos componentes primários em fontes de biomassa.	19
Tabela 2.2 - Produção de coco, área plantada e produtividade do coqueiro dos principais estados brasileiros produtores em 2013.....	24
Tabela 2.3 - Produtos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise.....	27
Tabela 2.4 - Trabalhos da literatura de pirólise em diferentes reatores.	31
Tabela 2.5 - Equações governantes do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro.....	50
Tabela 2.6 - Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro.	52
Tabela 2.7 – Equações do modelo de turbulência k- ϵ disperso.	56
Tabela 3.1 - Matriz do planejamento fatorial: condição de mínimo jorro.	69
Tabela 3.2 - Parâmetros empregados nas simulações CFD.....	74
Tabela 4.1 – Propriedades físicas das partículas de areia e casca de coco. ...	76
Tabela 4.2 – Resultados da análise imediata da casca de coco.....	77
Tabela 4.3 – Composição química da casca de coco	77
Tabela 4.4 – Dados da composição e porosidade das misturas de casca de coco e areia.....	78
Tabela 4.5 - Queda de pressão máxima.	81
Tabela 4.6 - Planejamento fatorial 3 ² : condição de jorro mínimo.	83
Tabela 4.7 - Efeitos de X e H sobre as variáveis respostas.	83
Tabela 4.8 - Modelos matemáticos em termos das variáveis codificadas.....	85
Tabela 4.9 - Dados de queda de pressão simulados empregando diferentes malhas computacionais.	90
Tabela 4.10 - Dados experimentais e simulados de ΔP_{mj} para as misturas de areia e casca de coco.	96

LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{\mu}, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	Coeficientes do modelo de turbulência	[-]
C_D	Coeficiente de arraste	[-]
C_{fr,S_1S_2}	Coeficiente de fricção entre as partículas da fase sólida S_1 e S_2	[-]
d	Diâmetro das partículas sólidas	[m]
d_{anem}	Diâmetro de abertura do anemômetro	[cm]
d_{in}	Diâmetro na entrada da base cônica do leito de jorro	[cm]
d_p	Diâmetro médio da partícula	[mm]
e_{ss}	Coeficiente de restituição entre sólidos	[-]
g	Aceleração gravitacional	[m.s ⁻²]
$G_{k,g}$	Produção de energia cinética turbulenta da fase gasosa	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]
$g_{0,ss}$	Função de distribuição radial	[-]
H	Altura de leito estático	[cm]
\bar{I}	Tensor unitário	[-]
I_M	Índice de mistura	[-]
k	Energia cinética turbulenta	[m ² .s ⁻²]
k_{θ_s}	Coeficiente de difusão de temperatura granular	[kg.m ⁻¹ .s ¹]
$L_{t,g}$	Escala do comprimento dos vórtices	[m]
m	Massa de partículas adicionada ao picnômetro	[kg]
M_1	Massa de partículas de casca de coco	[kg]
M_2	Massa de partículas de areia	[kg]
N_c	Número de Courant	[-]
P	Pressão	[Pa]
P_s	Pressão de sólidos	[Pa]
Re	Número de Reynolds	[-]
t	Tempo	[s]

T_{cf}	Teor de carbono fixo	[-]
T_{cinzas}	Teor de cinzas	[-]
T_v	Teor de voláteis	[-]
v	Velocidade	[m.s ⁻¹]
V_{anem}	Velocidade do ar mensurada pelo anemômetro	[m.s ⁻¹]
V_{in}	Velocidade do ar na entrada do leito	[m.s ⁻¹]
V_l	Volume de líquido picnométrico	[m ³]
V_{mj}	Velocidade de mínimo jorro	[m.s ⁻¹]
V_{mp}	Volume do meio poroso	[m ³]
V_p	Volume de partículas	[m ³]
V_{pic}	Volume do picnômetro	[m ³]
$v_{r,s}$	Velocidade terminal da partícula sólida	[m.s ⁻¹]
P	Pressão	[Pa]
X	Fração mássica de casca de coco	[-]
X_1	Variável codificada da fração mássica da casca de coco	[-]
X_2	Variável codificada da altura de leito estático	[-]
X_R	Fração mássica da maior partícula em dada região do leito	[-]
X_0	Fração mássica inicial da maior partícula	[-]

Símbolos gregos

α	Fração volumétrica	[-]
$\alpha_{s,max}$	Limite máximo de empacotamento	[-]
β	Coefficiente de troca de momento entre fases	[kg.m ⁻³ .s ⁻¹]
γ_{θ_s}	Energia de dissipação colisional	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]
ΔP_{max}	Queda de pressão no leito máxima	[Pa]
ΔP_{mj}	Queda de pressão de mínimo jorro	[Pa]
Δt	Passo de tempo	[s]

Δx	Dimensão da malha	[m]
ε	Taxa de dissipação de energia cinética turbulenta da fase gasosa	[m ² .s ⁻³]
ε_{lp}	Porosidade leito de partículas	[-]
θ	Temperatura granular	[m ² .s ⁻²]
λ	Viscosidade <i>bulk</i>	[Pa.s]
μ	Viscosidade cisalhante	[Pa.s]
$\mu_{t,g}$	Viscosidade turbulenta da fase fluida	[Pa.s]
$\Pi_{k_g}, \Pi_{\varepsilon_g}$	Influência da fase dispersa na turbulência da fase contínua	[-]
ρ	Massa específica	[kg.m ⁻³]
ρ_a	Massa específica aparente	[kg.m ⁻³]
ρ_r	Massa específica real	[kg.m ⁻³]
σ	Desvio padrão da queda de pressão	[Pa]
$\sigma_\varepsilon, \sigma_k$	Números de dispersão de Prandtl	[-]
$\bar{\tau}$	Tensor das tensões viscosas	[N.m ⁻²]
$\tau_{t,g}$	Tempo de relaxação turbulento da fase contínua	[s]
ϕ	Esfericidade	[-]
ϕ_{gs}	Troca de energia entre fases	[kg.m ⁻¹ .s ⁻³]

Subscritos

g	Fase fluida, gasosa
r	Radial
s	Fase granular, sólida
s ₁	Fase sólida casca de coco
s ₂	Fase sólida areia
x	Axial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1. BIOMASSA.....	17
2.1.1. A Biomassa como fonte de energia.....	17
2.1.2. Composição química da biomassa vegetal	18
2.1.3. Propriedades importantes da biomassa	20
2.2. COCO.....	22
2.2.1. Características gerais.....	22
2.2.2. Cultivo do coqueiro no Brasil	23
2.2.3. Potencial das cascas de coco verde.....	25
2.3. PIRÓLISE DE BIOMASSA.....	26
2.3.1. Conceitos básicos.....	26
2.3.2. Pirólise da casca do coco verde	29
2.3.3. Reatores para pirólise rápida.....	30
2.4. LEITO DE JORRO.....	31
2.4.1. Aspectos gerais	31
2.4.2. Leitos de jorro não convencionais	34
2.4.3. Características fluidodinâmicas de um leito de jorro.....	36
2.4.4. Segregação da mistura de partículas em leito de jorro.....	40
2.4.5. Porosidade de misturas binárias.....	41
2.5. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DA DINÂMICA DE PARTÍCULAS EM LEITO DE JORRO E MODELO MATEMÁTICO.....	42
2.5.1. Aspectos gerais	42
2.5.2. Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD	44
2.5.3. Modelagem matemática de sistemas multifásicos utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD).....	47
2.5.4. Modelagem matemática do escoamento granular multifásico em leito de jorro	48
3. METODOLOGIA.....	59
3.1. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	59
3.1.1. Obtenção e preparo da amostra.....	59
3.1.2. Caracterização das partículas	60
3.1.3. Porosidade do leito de partículas.....	66
3.1.4. Análise Fluidodinâmica.....	67
3.2. METODOLOGIA NUMÉRICA	72
3.2.1. Confecção da malha computacional e teste de independência de malhas	72
3.2.2. Parâmetros empregados nas simulações CFD e procedimento numérico.....	73

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
4.1.1. Caracterização das partículas	76
4.1.2. Porosidade das misturas de areia e casca de coco.....	78
4.1.3. Análise Fluidodinâmica	79
4.1.4. Condições de Mínimo Jorro.....	82
4.1.5. Segregação de partículas em leito de jorro	87
4.2. RESULTADOS SIMULADOS	89
4.2.1. Teste de independência de malha.....	89
4.2.2. Verificação do modelo – Análise qualitativa	91
4.2.3. Comparação dos resultados simulados e experimentais.....	93
5. CONCLUSÕES	97
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
APÊNDICE A.....	111

1. INTRODUÇÃO

No último século, combustíveis derivados de petróleo foram as principais fontes de energia no mundo. Entretanto, a maior atenção dada recentemente aos problemas políticos e ambientais decorrentes dessa dependência evidencia a necessidade de se investir na produção sustentável de combustíveis e produtos químicos. Nesse contexto, a biomassa surge como uma oportunidade viável ambientalmente e economicamente. Abundante, de baixo custo e renovável, a biomassa tem potencial para ocupar lugar de destaque na matriz energética de países em desenvolvimento.

O aumento no consumo e industrialização da água de coco verde no Brasil tem gerado um volume crescente e significativo de resíduos de casca. Esses, se processados adequadamente, podem se tornar uma boa alternativa para produção de energia renovável. Entretanto, a falta de tecnologias de conversão bem esclarecidas e a ausência, na grande maioria, de infraestrutura nas colheitas, armazenamento e transporte de resíduos fazem com que poucas ações de reaproveitamento sejam implantadas no país (SENHORAS, 2003).

Os principais métodos de conversão termoquímica de biomassa são a pirólise, liquefação, gaseificação e combustão. Dentre eles, a pirólise é considerada uma das mais promissoras, visto que o processo pode ser direcionado para a formação de um ou outro produto, dependendo das condições operacionais do reator e da composição da biomassa utilizada. A pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores condensáveis (bio-óleo e extrato ácido).

Existe uma série de tipos de reatores que são capazes de alcançar os requisitos de transferência de calor necessários para o processo de pirólise, como o leito de jorro, leito fluidizado borbulhante e circulante, tambor rotativo, ablativo e a vácuo. Desses, o leito de jorro se destaca por apresentar um padrão cíclico de movimentação de partículas que promove um alto contato gás-sólido, elevados

coeficientes de transferência de calor e massa e baixa segregação de partículas, proporcionando, assim, ganhos energéticos no processo de pirólise.

No leito de jorro, um material inerte, geralmente areia, é adicionado a fim de conferir estabilidade fluidodinâmica e auxiliar na transferência de calor para a biomassa. Assim, torna-se necessário aprofundar os conhecimentos sobre a fluidodinâmica da areia e biomassa e o grau de segregação da mistura, de forma a apontar condições operacionais de processo adequadas para o bom funcionamento do reator.

Trabalhos voltados à determinação experimental da fluidodinâmica em leitos de jorro são de fundamental importância. Porém, apresenta um desafio a observação do movimento de um grande número de partículas, além de que a inserção de sondas no equipamento para a medição do perfil fluidodinâmico pode interferir no escoamento. Nesse contexto, as simulações numéricas utilizando a técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), desde que validadas através da comparação com dados experimentais, são importantes ferramentas para a investigação dos regimes de escoamento ar-sólido presentes no leito de jorro. A principal vantagem da técnica de CFD é a possibilidade de investigar uma ampla faixa de condições operacionais, parâmetros geométricos e materiais com diferentes propriedades.

Dessa forma, como o intuito de contribuir para a aplicação do leito de jorro cônico como reator de pirólise, o presente trabalho tem como objetivo estudar o comportamento fluidodinâmico do leito composto de misturas de areia e casca de coco. Nessa perspectiva, a pesquisa é dividida nas seguintes etapas:

- caracterização das partículas de casca de coco verde e areia;
- obtenção e análise de dados experimentais de queda de pressão e velocidade do ar de maneira a evidenciar os diferentes regimes de escoamento estabelecidos no leito de jorro cônico;
- análise da segregação das misturas;
- simulação das condições operacionais empregadas no leito de jorro por meio da técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Biomassa

2.1.1. A Biomassa como fonte de energia

O termo biomassa foi inventado por volta de 1975 para descrever toda matéria orgânica de origem vegetal ou animal que pode ser utilizada como combustível, incluindo culturas e resíduos agrícolas, dejetos animais e matéria orgânica contida nos rejeitos industriais e urbanos. A biomassa contém energia acumulada pela transformação energética da radiação solar em energia química, a qual pode ser liberada por meio da combustão, ou convertida, através de diferentes processos, em produtos energéticos, tais como carvão vegetal, etanol, gases combustíveis, óleos vegetais combustíveis e outros (PÉREZ, 2004; BASU, 2010).

O Brasil é hoje um grande produtor e consumidor de biomassa com fins energéticos no mundo. Pela Figura 2.1, pode-se verificar que a oferta total de bioenergia em 2014 representou 27,6% da matriz energética brasileira. Nesse contexto, os produtos da cana de açúcar responderam por 15,7% da matriz; a lenha por 8,1% e outras biomassas (lixívia, resíduos de madeira e resíduos da agroindústria) por 3,8%. Fatores como o clima, o acentuado crescimento do agronegócio brasileiro e a abundância de recursos agrícolas têm contribuído para alcançar tal situação.

Deve-se destacar ainda que existe uma expectativa de maior participação da biomassa no suprimento de energia no futuro. Alguns motivos explicam tal fato, como os recentes esforços para uma mensuração mais apurada do seu potencial, por meio de novos estudos, demonstrações e plantas-piloto que buscam o aperfeiçoamento das tecnologias de aproveitamento do material (BATTISTI, 2009; SANTOS, 2011b). No trabalho de Berndes et al. (2003), por

exemplo, é mostrado que biomassas tem o potencial para transformar-se na maior fonte de energia primária no decorrer do século XXI.

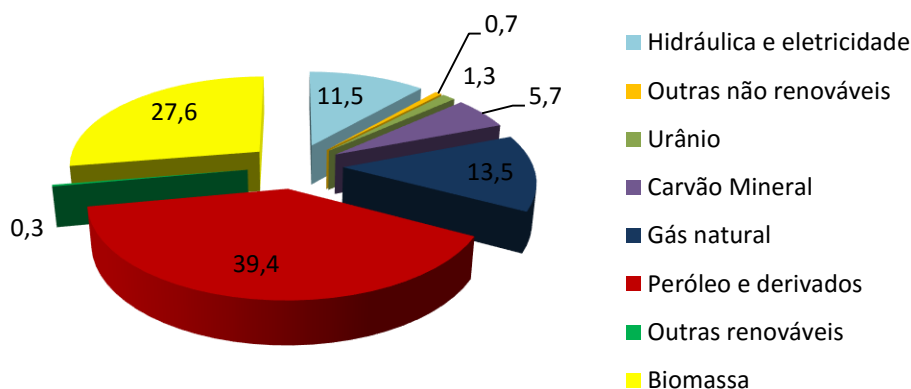


Figura 2.1 - Oferta interna de energia no Brasil em 2014.
Fonte: MME (2015).

2.1.2. Composição química da biomassa vegetal

A biomassa lignocelulósica é constituída principalmente dos polímeros naturais celulose, hemicelulose e lignina. Esses componentes estão contidos em diferentes proporções em cada material lignocelulósico, dependendo do tipo de planta, da sua idade e de seus tecidos (BASU, 2010; SANTOS, 2011b).

A celulose, principal componente estrutural da parede celular da biomassa, é um polímero de elevado peso molecular e constituído por uma longa cadeia de moléculas de glicose (FERREIRA, 2010).

A hemicelulose é formada por um conjunto de polímeros ramificados e amorfos, com baixos graus de polimerização e facilmente hidrolisáveis em meio ácido. Existe uma variação significativa na estrutura da hemicelulose de diferentes biomassas, porém, pode-se dizer que essa é composta basicamente por hexoses, pentoses e ácidos urônicos (HUBER et al., 2006; BASU, 2010).

A lignina é um polímero amorfo, caracterizada por apresentar uma estrutura bastante heterogênea e complexa, a qual consiste em uma rede de anéis aromáticos unidos por ligações cruzadas. Esse composto é responsável por conferir rigidez à estrutura da planta, atuar como um ligante para a celulose e hemicelulose, além de proteger os tecidos vegetais contra a ação destrutiva de microrganismos (GÓMEZ, 2002; HUBER et al., 2006; SANTOS, 2011b).

A Tabela 2.1 apresenta os teores dos componentes primários de diversas fontes de biomassa obtidos por meio de estudos realizados por Antal Jr. et al. (2000).

Tabela 2.1 – Teor dos componentes primários em fontes de biomassa.

Biomassa	Celulose(%)	Hemicelulose(%)	Lignina(%)
Casca de amêndoas	24,7	27,0	27,2
Bambu	39,5	17,6	25,2
Sabugo de milho	26,6	25,2	16,3
Madeira de eucalipto	43,0	13,2	25,3
Resíduo de alho	24,2	6,9	8,5
Casca de macadâmia	26,9	17,8	40,1
Madeira de carvalho	34,5	18,6	28,0
Casca de aveia	48,5	16,1	16,2
Madeira de pinus	42,1	17,7	25,0
Casca de arroz	30,9	16,8	35,9
Casca de semente de girassol	26,7	18,4	27,0
Casca de nozes	21,0	18,8	32,7
Bagaço de cana-de-açúcar	36,0	47,0	17,0

FONTE: Antal Jr. et al. (2000).

Deve-se ressaltar que a degradação térmica de cada um desses componentes tem um papel importante na distribuição dos produtos da pirólise. Grande parte dos produtos provenientes da decomposição da celulose, por exemplo, é solúvel em água e compõe o extrato ácido. Os demais produtos não solúveis compõem o bio-óleo (PÉREZ, 2004; BASU, 2010, SANTOS, 2011b).

Assim como a celulose, porém com maior facilidade, as hemiceluloses são decompostas e transformadas em diferentes produtos. Entre esses, pode-se destacar o aldeído heterocíclico furfural, que por ser extremamente instável, reage com os componentes fenólicos do líquido pirolítico, formando substâncias

poliméricas viscosas, escuras e insolúveis em água, que compõe o bio-óleo (PÉREZ, 2004).

Por fim, a pirólise da lignina contribui para a formação do carvão vegetal, produtos como metanol e ácido acético, além de ser responsável pela presença de fenóis e outros compostos aromáticos no bio-óleo (PÉREZ, 2004).

A constituição da biomassa lignocelulósica inclui ainda os extrativos e cinzas, porém em menor quantidade. Os extrativos são geralmente constituídos por açúcares, ácidos graxos, fenóis, resinas, óleos, taninos, terpenos e outros tipos de compostos orgânicos (SANTOS, 2008a). Segundo Pérez (2004), esses materiais são responsáveis por conferir cor, odor, resistência natural ao apodrecimento, gosto e propriedades abrasivas à biomassa, podendo ser extraídos por meio de solventes polares ou apolares.

Os reagentes utilizados para a quantificação da celulose, hemicelulose e lignina também interagem com os extrativos, constituindo assim uma fonte de erros na caracterização do material lignocelulósico. Por isso, faz-se necessário remover os extrativos antes da determinação desses percentuais (PRADO et al., 2010).

As cinzas são formadas após a queima de compostos inorgânicos presentes na biomassa. Essa parte é constituída por óxidos de cálcio, potássio, sódio, magnésio, silício, ferro, fósforo, cobre, alumínio, manganês, dentre outros (PÉREZ, 2004). Geralmente, as cinzas são consideradas indesejáveis nos processos industriais, pois em grande concentração podem diminuir o poder calorífico e ocasionar perdas energéticas. Adicionalmente, o contato desse resíduo com partes metálicas favorece a corrosão e diminui a vida útil dos equipamentos (RICHARDSON et al., 2002).

2.1.3. Propriedades importantes da biomassa

A composição química da biomassa (lignina, hemicelulose e celulose) apresenta um papel importante na distribuição dos produtos da pirólise, como mencionado

anteriormente. Entretanto, outras propriedades desses materiais também devem ser destacadas por sua influência nos processos de conversão, como a composição elementar, teor de carbono fixo e teor de voláteis.

A composição elementar corresponde ao conteúdo percentual em massa dos elementos carbono, hidrogênio, enxofre, oxigênio e nitrogênio. Ao analisar a influência da composição elementar sobre o poder calorífico de uma biomassa, verifica-se que esse parâmetro diminui quando o material apresenta maior proporção de hidrogênio e oxigênio em comparação ao carbono. Isso ocorre devido à menor energia contida nas ligações carbono-oxigênio e carbono-hidrogênio quando comparadas as ligações carbono-carbono (BASU, 2010; MCKENDRY, 2002).

Segundo Zhang et al. (2007), a presença de oxigênio é um dos principais responsáveis pelas diferenças entre os bio-óleos e combustíveis de hidrocarbonetos, visto que o elevado teor desse composto leva a valores de densidade energética e imiscibilidade cerca de 50% mais baixos que a do combustível convencional.

O teor de enxofre na biomassa lignocelulósica é geralmente baixo, fato importante quando se leva em consideração a emissão de SO₂ durante a conversão energética (BASU, 2010). Sua presença está principalmente associada ao cultivo e manuseio da matéria prima, podendo contribuir para a formação de cinzas no processo de pirólise (ALMEIDA, 2008).

O teor de carbono fixo representa a massa restante após a libertação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade (MCKENDRY, 2002). Durante a degradação térmica da biomassa, a fração de carbono aromático deve permanecer no carbono fixo, enquanto o hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e o carbono não aromático devem se volatilizar e compor a fração de voláteis (KREVELEN et al., 1957 apud ANDRADE, 2015).

O teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração mássica da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca até temperaturas de aproximadamente 850 °C (MCKENDRY, 2002). Para Lewandowski (1997, apud KLAUTAU, 2008), o material volátil interfere na

ignição, assim quanto mais elevado for o teor de voláteis, maior será a facilidade de queima da biomassa.

2.2. Coco

2.2.1. Características gerais

O coqueiro é considerado uma planta de múltiplas funcionalidades e se destaca em muitos países não só pelos aspectos econômicos que proporciona, mas pelos ganhos sociais e ambientais advindos de sua exploração sustentável. A cultura encontra-se difundida em praticamente todos os continentes e em mais de 200 países, porém sua exploração comercial se detém em aproximadamente 90 países, onde se encontram os maiores plantios e melhores condições de cultivo como solos arenosos, intensa radiação solar, boa umidade e precipitação bem distribuída (FOALE; HARRIES, 2009; MARTINS; JESUS JR., 2014).

O coqueiro (*Cocos nucifera* L.) pertence à família das palmáceas, uma das mais importantes da classe das monocotiledôneas (MARTINS; JESUS JR., 2014). As principais partes constituintes do coco estão representadas na Figura 2.2.

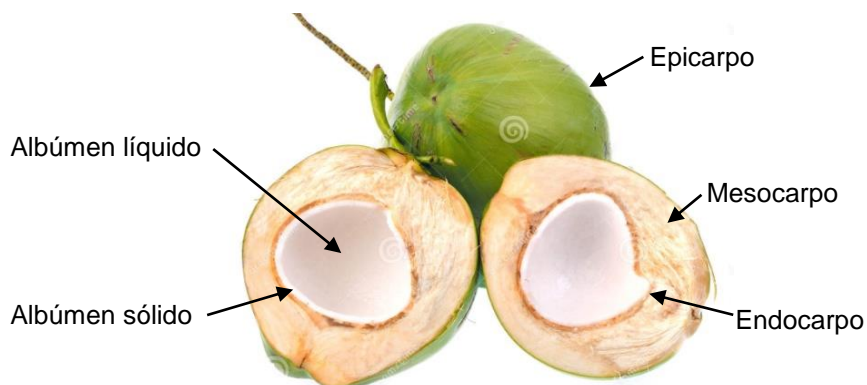


Figura 2.2 - Principais partes do coco verde.

O epicarpo apresenta-se como uma camada externa fina e lisa que envolve o coco e cuja coloração pode variar de verde a marrom dependendo do estágio de maturação do fruto. Junto ao epicarpo, encontra-se o mesocarpo, que compreende uma camada grossa constituída por fibras e pó. O endocarpo é a fina camada lenhosa e dura entre o mesocarpo e o albúmen sólido. Esse último representa a parte mais importante economicamente, sendo constituído por uma polpa branca, oleosa, com espessura variável que forma uma grande cavidade, onde se encontra a água de coco ou albúmen líquido (LAVOYER, 2012; LEÃO, 2012).

As principais variedades do coco são a Typica (var. Gigante) e Nana (var. Anão). Entretanto, com o objetivo de aprimorar a qualidade dos frutos, pesquisas sobre o desenvolvimento e seleção de híbridos estão sendo realizadas (MARTINS; JESUS JR., 2014).

O coqueiro gigante é o mais explorado e utilizado, sobretudo, para a produção de copra (albúmen sólido desidratado), óleo e leite de coco. Essa variedade caracteriza-se pela utilização de menor nível tecnológico, dada a sua rusticidade e adaptabilidade às condições de fertilidade do solo. Por outro lado, o fruto do anão é indicado para consumo de água de coco, pois sua copra é pouco espessa e de baixa qualidade (SILVEIRA, 2008; MARTINS; JESUS JR., 2014).

Resultantes do cruzamento das variedades anão e gigante, os híbridos reúnem características desejáveis dos dois grupos, apresentando potencial de utilização tanto na forma *in natura*, quando colhido ainda verde, como no processamento industrial para a produção de copra, óleo e leite de coco, quando colhido seco (SILVEIRA, 2008; MARTINS; JESUS JR., 2014).

2.2.2. Cultivo do coqueiro no Brasil

O cultivo brasileiro do coqueiro registrou um acréscimo em termos de produção, fazendo com que o país passasse da décima posição no ranking mundial em 1990, para a atual posição de quarto maior produtor, ficando atrás somente da

Indonésia, Filipinas e Índia. Essa expansão acelerada decorre, sobretudo, do incremento na comercialização do coco verde e do desenvolvimento tecnológico na condução e manejo dos coqueirais em quesitos como adubação, sistemas intensivos de cultivos e variedades melhoradas de coqueiros (MARTINS; JESUS JR., 2014).

A Tabela 2.2 mostra a produção, área plantada e produtividade do coco nos principais estados brasileiros produtores. Pode-se destacar que as maiores plantações e produções se concentram nos estados da Bahia, Sergipe, Pará e Ceará. Entretanto, ao se analisar a produtividade, nota-se que os estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo figuram entre aqueles com maior rendimento no cenário nacional.

Tabela 2.2 - Produção de coco, área plantada e produtividade do coqueiro dos principais estados brasileiros produtores em 2013.

Estado	Produção (toneladas)	Área plantada (ha)	Produtividade (kg/ha)
Bahia	566531	75353	7518
Sergipe	240855	37941	6348
Pará	214859	21092	10187
Ceará	206071	44024	4681
Espírito Santo	173963	10740	16198
Alagoas	69772	14468	4823
Rio de Janeiro	69630	4372	15926
Rio Grande do Norte	57128	19179	2979
Brasil	1926857	257462	7484

Fonte: IBGE (2013).

Além disso, estima-se que 70% da área plantada no Brasil seja destinada à produção de coco seco. Entretanto, o aumento no consumo de água de coco, decorrente do crescimento populacional e a preocupação com a saúde, demonstram claramente a potencialidade do setor de coco verde perante a cadeia produtiva do fruto e tem condicionado um novo redesenho do cenário produtivo dessa cultura no Brasil. Assim, os novos plantios vêm ocorrendo principalmente no interior do país com variedades de coqueiro anão e híbrido (MARTINS; JESUS JR., 2014).

2.2.3. Potencial das cascas de coco verde

De acordo com o Sindcoco (Sindicato Nacional dos Produtores de Coco), a quantidade de coco verde destinada ao consumo da água em 2014 foi de aproximadamente 1,5 bilhão de frutos com geração de 2,2 milhões de toneladas de resíduos, os quais são tratados como lixo urbano e dispostos em lixões e aterros sanitários (EMBRAPA, 2015). Esse fato, além de representar custo expressivo nos gastos com limpeza pública, proporciona um foco de proliferação de doenças, pois servem de abrigo para animais, favorecem a reprodução de insetos e contribui para potenciais emissões de gases de efeito estufa. Além disso, contribuem para que a vida útil desses depósitos seja diminuída, pois as cascas, quando encaminhadas sem nenhum tipo de tratamento a aterros ou lixões, levam mais de oito anos para completa decomposição (CARRIJO et al., 2002). Assim, o aproveitamento desses resíduos tem despertado grande atenção.

Examinando-se dados sobre a utilização racional do coco seco, pode-se observar a existência de várias empresas nacionais e internacionais que já aproveitam seus resíduos para diversas funções, como na queima em substituição a lenha, substrato agrícola, suporte para biofilme em sistema de tratamento de efluente, isolamento térmico e artesanatos com a fibra do mesocarpo. Entretanto, no caso do fruto imaturo, o alto teor de umidade presente na casca (de até 85%) dificulta seu aproveitamento direto, exigindo uma etapa prévia de secagem, a qual somente é considerada economicamente viável para produtos de alto valor agregado (SILVA et.al., 2003; PINO, 2005).

Neste contexto, empresas de beneficiamento do coco e universidades estão investindo em pesquisas para encontrar ou aperfeiçoar tecnologias que permitam a utilização do resíduo do coco verde. Pode-se citar a tecnologia desenvolvida pela Embrapa Agroindústria Tropical, a qual processa as cascas e gera fibras e pó. As fibras são empregadas na confecção de diversos produtos para uso agrícola, pela indústria e construção civil, enquanto o pó é utilizado como adubo orgânico (SILVEIRA, 2008; SANTOS, 2007).

Em maio de 2015, pesquisadores e produtores de coco se reuniram na Embrapa Agroenergia em Brasília, com o objetivo de discutir sobre possíveis soluções para transformar a casca do coco verde em energia renovável. O principal problema destacado para a utilização desse resíduo foi realmente a alta umidade do material. Ainda assim, a pesquisadora Silvia Belém destaca algumas possibilidades para utilização energética desse resíduo, como a produção de briquetes, etanol de segunda geração, biogás a partir do líquido da prensagem da casca e biocombustíveis (EMBRAPA, 2015).

2.3. Pirólise de Biomassa

2.3.1. Conceitos básicos

A pirólise é um processo em que ocorre a degradação térmica do material na ausência total de oxigênio ou em quantidade significativamente menor que a requerida para a combustão completa. Essa técnica resulta na formação de um resíduo sólido rico em carbono (finos de carvão) e uma fração volátil. Parte dos vapores produzidos é condensada formando uma mistura líquida de duas fases: uma aquosa (extrato ácido) e outra orgânica (bio-óleo), deixando os gases não condensáveis, geralmente CO_2 , CO , CH_4 , H_2 , como combustível para uso imediato (KIMURA, 2009; BASU, 2010).

A pirólise tem sido aplicada por milhares de anos para a produção de carvão vegetal. Entretanto, o maior interesse atual dos países em relação a essa técnica está voltado para obtenção de produtos líquidos, devido, principalmente, à sua alta densidade energética e potencial para substituir os combustíveis líquidos derivados do petróleo (FERREIRA, 2014).

O carvão pode ser empregado na preparação de carvão ativado caso sua estrutura de poro e área superficial sejam adequadas (YAMAN, 2004), enquanto o extrato ácido é utilizado na produção de inseticidas, fungicida, adubo orgânico e biodiesel leve (INEE, 2015).

A composição do bio-óleo depende do tipo de biomassa utilizada, das condições de processo, do equipamento e da eficiência na separação dos produtos finais e normalmente consiste de uma mistura complexa de hidrocarbonetos e compostos oxigenados, incluindo, aldeídos, ácidos carboxílicos, cetonas, éteres cíclicos e fenóis (MULLEN; BOATENG, 2008).

Segundo Radlein (2010), algumas características indesejáveis ainda limitam a utilização direta do bio-óleo como biocombustível, como resquícios de carvão encontrados em seu meio; presença de multifases líquidas; envelhecimento; acidez acentuada; variabilidade das propriedades físico-químicas; instabilidade e corrosividade. Nesse contexto, há a necessidade de um melhoramento (*upgrading*) nesse produto. Processos de *upgrading* como a hidrodesoxigenação, rearranjo por catálise a vapor, craqueamento catalítico e hidroprocessamento são estudados por autores como Zhang et al. (2007) e Busetto et al. (2011).

A pirólise recebe diferentes denominações de acordo com o tempo de residência, temperatura final e taxa de aquecimento empregado no reator. Essas condições operacionais acabam por influenciar no rendimento e qualidade dos produtos formados, como pode ser verificado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Produtos típicos obtidos para diversos tipos de pirólise.

Processo	Tempo de residência	Temperatura final (°C)	Taxa de aquecimento	Produto principal
Pirólise lenta (Carbonização)	Dias	400	Muito baixa	Carvão vegetal
Pirólise convencional	5-30min	600	Baixa	Bio-óleo, carvão e gases
Pirólise rápida	< 2s	500	Muito Alta	Bio-óleo
Pirólise flash	< 1s	650	Alta	Bio-óleo, químicos e gases
Ultra-rápida	< 0,5s	1000	Muito alta	Químicos e gás combustível

Fonte: Adaptado de BASU, 2010.

Pela Tabela 2.3, nota-se que a produção de bio-óleo é favorecida na pirólise rápida, a qual é conduzida com elevadas taxas de aquecimento, moderadas temperaturas finais e curtos tempos de residência, tanto da partícula de biomassa quanto da fase gasosa. Esse fato pode ser explicado pelos mecanismos de transferência de calor e massa que ocorrem durante a pirólise rápida, os quais foram descritos por Santos (2011b) da seguinte forma:

- a) a biomassa, ao entrar em contato com o gás aquecido, recebe calor, gerando assim um gradiente radial de temperatura dentro da partícula;
- b) quando a partícula atinge a temperatura de vaporização dos voláteis contidos em seu interior, estes se volatilizam e, por difusão, cria-se um gradiente de concentração e conseqüentemente, um fluxo de voláteis do interior para a superfície das partículas;
- c) os voláteis, agora na superfície da partícula, são transferidos para o seio do fluido por convecção;
- d) enquanto os voláteis migram do interior da partícula ao seio do fluido, podem acontecer reações que transformam o material volátil em gases ou carvão.

Diante dessas etapas, conclui-se que para maximizar a produção do bio-óleo, as reações secundárias de craqueamento e polimerização dos voláteis à gases e finos de carvão, respectivamente, devem ser evitadas através da adoção de baixos tempos de residência (SANTOS, 2011b). Nesse contexto, o gás de purga é responsável pela remoção dos vapores da zona quente do reator e transporte para o condensador (ANDRADE, 2015).

Baixas temperaturas tendem a elevar o rendimento do carvão. Com o acréscimo desse parâmetro, a porcentagem de produtos sólidos diminui e as frações líquida e gasosa aumentam. Porém, temperaturas muito elevadas estão associadas às reações secundárias de craqueamento do bio-óleo e gaseificação do resíduo sólido, maximizando a formação de gases e diminuindo a quantidade de líquido. Assim, para obter um elevado rendimento de bio-óleo, as temperaturas intermediárias são preferíveis (DINIZ, 2005; SANTOS, 2011b).

Carrier et al. (2011) descrevem a influência da pressão sobre os produtos da pirólise de biomassa. Segundo os autores, um bio-óleo com elevado teor de água e de baixa qualidade é obtido quando se opera o reator em altas pressões. A explicação para tal fato está na ocorrência de um maior número de reações de recondensação que fazem com que o vapor passe mais tempo em contato com o carvão formado, reduzindo a qualidade do produto.

2.3.2. Pirólise da casca do coco verde

A seguir são apresentados alguns trabalhos relacionados à pirólise da casca do coco verde.

Cortez et al. (2009) avaliaram a geração de carvão vegetal a partir da pirólise lenta do endocarpo e fibra de coco verde, conduzida a uma temperatura de 350 °C. Os autores concluíram que esses resíduos apresentam, pelo menos em termos qualitativos, viabilidade para uso energético.

Almeida (2013) avaliou a pirólise rápida da fibra da casca de coco verde sob diferentes condições, visando obter a maior produção de bio-óleo. Nesse sentido, foi realizado um planejamento fatorial 2^3 com o objetivo de analisar os efeitos da massa pirolisada, temperatura e material utilizado (pó e/ou fibra) sobre o rendimento dos produtos, alcançando uma produtividade máxima de 31,9% de bio-óleo. A composição química do bio-óleo foi analisada por técnicas cromatográficas e foram identificados compostos oxigenados, com alta predominância de fenóis. As fibras da casca de coco verde foram destacadas como uma alternativa rentável e promissora para obter insumos para indústrias petroquímicas e farmacêuticas.

Schena (2015) também realizou a pirólise da casca de coco verde para a obtenção do bio-óleo. Foram empregados dois tipos de processos para melhorar a qualidade do bio-óleo produzido. O primeiro consiste em uma extração alcalina

e o segundo processo foi a extração de alguns compostos da biomassa antes da pirólise. Através de técnicas cromatográficas foi possível caracterizar o bio-óleo bem como verificar as diferenças existentes entre as frações geradas após o *upgrading*. Dentre os dois processos avaliados, a extração prévia da fibra do coco garantiu a produção de um bio-óleo de maior valor agregado.

2.3.3. Reatores para pirólise rápida

A escolha do reator é extremamente importante para alcançar maiores rendimentos durante a pirólise, visto que o equipamento deve ser capaz de proporcionar as condições operacionais exigidas pelo processo.

Os primeiros reatores projetados para pirólise foram os de leito fixo, que operavam em batelada, utilizando baixas taxas de aquecimento e longos períodos de reação, com o objetivo de elevar a produção de carvão. Entretanto, com os objetivos atuais de maximizar o rendimento de líquidos a partir do processo de pirólise rápida, outros pirolisadores podem ser destacados, como o leito de jorro; leito fluidizado borbulhante e circulante, cone rotativo, reator ablativo e reator de pirólise a vácuo (BASU, 2010; SANTOS, 2011b). Esses reatores devem ser capazes de proporcionar um eficiente contato entre a biomassa e o meio de aquecimento.

A Tabela 2.4 apresenta alguns trabalhos encontrados na literatura que empregaram diferentes reatores no processo de pirólise rápida de biomassas.

Tabela 2.4 - Trabalhos da literatura de pirólise em diferentes reatores.

Autor	Biomassa	Reator
Gómez (2002)	Capim elefante	Leito fluidizado
Wang et al. (2005)	Bambu e serragem	Leito fluidizado
Tsai et al. (2006)	Casca de arroz e coco, bagaço de cana de açúcar	Forno Tubular
Ji-Lu (2007)	Casca de arroz	Leito Fluidizado
Lèdè et al. (2007)	Serragem de Madeira	Ciclone
Almeida (2008)	Palha de cana de açúcar	Leito Fluidizado
Boateng; Mullen (2008)	Gramíneas e alfafa	Leito Fluidizado
Figueiredo (2011)	Fibra de coco seco	Cilindro rotativo
Amutio et al. (2012)	Madeira de pinheiro	Leito de jorro
Santos (2013)	Tortas de tucumã, murumuru e mamona	Leito fluidizado
Ferreira (2014)	Bagaço de cana-de-açúcar e da torta de prensagem da macaúba	Forno Tubular
Du et al. (2014)	Miscanthus gigante	Leito de jorro
Alvarez et al. (2014)	Casca de arroz	Leito de jorro

2.4. Leito de Jorro

2.4.1. Aspectos gerais

O leito de jorro foi desenvolvido em 1954 no Canadá, por Gishler e Mathur e utilizado, inicialmente, na secagem de materiais granulados termo sensíveis, com diâmetros de partículas superiores a 1 mm (PASSOS et al., 1997; EPSTEIN; GRACE, 2011). Ao perceber que essa técnica poderia ter uma aplicação mais ampla, estudou-se as características do leito de jorro para uma variedade de partículas de difícil fluidização e para processos que necessitam de um eficiente contato gás-sólido, como na secagem de pastas e sólidos particulados (MARRETO, 2006; ALMEIDA, 2009; CIRO-VELÁSQUEZ et al., 2010;

BORTOLOTTI, 2012), recobrimento de partículas (ROSA, 2010), extração mecânica de substâncias (CUNHA, 2008), granulação (BORONI et al., 2009) e pirólise rápida (AGUADO et al., 2000; OLAZAR et al., 2010a; OLAZAR et al., 2010b; SANTOS, 2011b).

O regime de jorro é estabelecido pela injeção de um fluido em um leito de sólidos particulados. Esse fluido entra na parte inferior do equipamento e quando atinge uma vazão suficientemente alta, provoca a formação de três regiões distintas, como pode ser observado na Figura 2.3.

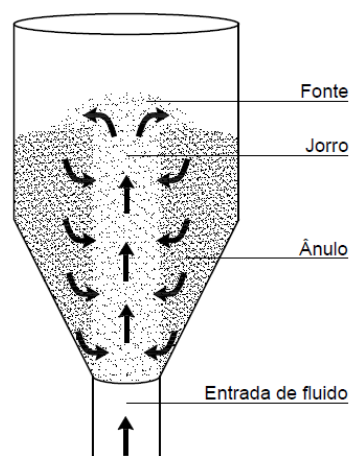


Figura 2.3 - Regiões características do leito de jorro.

O jorro, desenvolvido na parte central do leito, é uma região de alta porosidade, onde as partículas, arrastadas pelo ar, apresentam um movimento característico de transporte pneumático. Na região de fonte, as partículas, oriundas do jorro central, desaceleram e após atingir uma determinada altura, caem na região anular. Essa, situada entre a região de jorro e a parede da coluna que forma o leito, é caracterizada por apresentar baixa porosidade. Nessa região, as partículas iniciam um movimento descendente, contracorrente ao fluido, que prossegue até que elas atinjam o jorro, sendo novamente lançadas verticalmente. A repetição sistemática dessa trajetória ascendente e descendente percorrida pelas partículas no interior do equipamento dá origem ao movimento cíclico e uniforme dos sólidos (BACELOS, 2006; EPSTEIN; GRACE, 2011; SANTOS, 2011b).

Esse movimento característico do leito de jorro produz um efetivo contato entre o fluido e o sólido e proporciona altas taxas de transferência de calor e massa, inclusive quando se trabalha com mistura de partículas. Além dessas vantagens, o baixo investimento inicial e custo operacional têm incentivado pesquisas que tratam da aplicação do leito de jorro como reator de pirólise, como as apresentadas a seguir (BACELOS, 2006; SANTOS, 2011b).

Arabiourrutia et al. (2012) estudaram a pirólise de diferentes plásticos em um reator de leito de jorro cônico. Os autores verificaram que esse equipamento é uma alternativa adequada para a realização da pirólise em baixa temperatura e para se obter ceras, as quais podem ser aproveitadas como matéria prima em unidades de craqueamento.

Du et al. (2014) realizaram um estudo sobre a pirólise catalítica rápida do miscanthus gigante. Os autores avaliaram o efeito das condições operacionais e dos catalisadores sobre a distribuição dos produtos e verificaram que temperaturas mais elevadas favorecem a produção de gás e bio-óleo.

Amutio et al. (2012) e Alvarez et al. (2014) avaliam a influência da temperatura na pirólise rápida da serragem da madeira de pinheiro e da casca de arroz, respectivamente. O processo foi realizado em um leito de jorro cônico, e verificou-se que a temperatura exerce grande efeito na composição e rendimento dos produtos. O alto rendimento de bio-óleo obtido foi atribuído à elevada capacidade de transferência de calor e massa, bem como o tempo de residência reduzida no leito de jorro cônico.

2.4.2. Leitos de jorro não convencionais

Apesar das vantagens apresentadas, o leito de jorro apresenta algumas limitações que podem levar a um regime de instabilidade, e conseqüentemente, diminuição da sua eficiência quando projetado em escala industrial. Nesse contexto, Dutra (1984) lista as seguintes limitações da aplicação do leito de jorro convencional:

- dificuldade na ampliação da escala (*scale-up*);
- elevada queda de pressão para o estabelecimento de um jorro estável;
- existência de uma altura máxima de leito que limita a carga do equipamento;
- fluxo de ar governado mais pelas necessidades do jorro do que pelas necessidades de transferência de calor e massa.

Com o intuito de superar tais limitações, o leito de jorro convencional vem sofrendo modificações em sua configuração, dando origem a diferentes tipos, dentre os quais se destacam:

- Leito de Jorro Cônico: tem como principal característica a ausência de partículas na região cilíndrica, permite uma maior flexibilidade e possibilita a alimentação de uma maior carga inicial, quando comparada ao leito de jorro convencional. Ao utilizar diâmetros de partícula equivalentes e uma carga menor de sólidos, o leito cônico pode operar em altas velocidades de fluidização e obter regimes pneumáticos como o denominado *Jet Spouted Bed* (BÉTTEGA, 2009). A Figura 2.4 apresenta um esquema do leito de jorro cônico operando normalmente e em regime de *jet*.

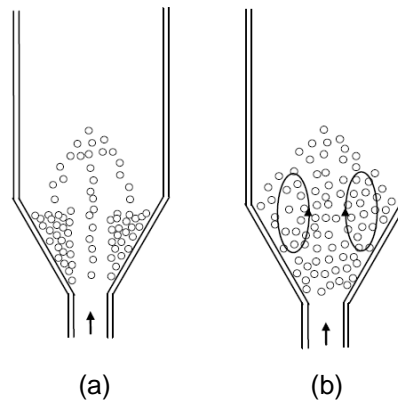


Figura 2.4 - Leitos de jorro cônicos: (a) Convencional; (b) Jet Spouted Bed.
Fonte: Béttega (2009).

- Leito de Jorro com Tubo Interno (tubo *draft*): caracterizado pela inserção de um tubo concêntrico à parte cilíndrica do leito. Dessa forma, ocorre o direcionamento de ar na região do jorro central, melhora o comportamento fluidodinâmico e possibilita uma redução na queda de pressão máxima. Além disso, obtém-se um melhor controle da circulação de sólidos no interior do equipamento, evitando o arraste prematuro de partículas localizadas próximas ao canal de jorro (BÉTTEGA, 2009). Esse equipamento apresenta como desvantagem o comprometimento da permeação de ar e a diminuição das taxas de transferência de calor e massa na região anular. Um tubo *draft* poroso pode ser utilizado para reduzir esse problema, promovendo um meio de controle da movimentação das partículas e um bom contato gás-sólido na operação (EPSTEIN; GRACE, 2011).
- Leito de Jorro Aerado: a porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, acarretando em um aumento da porosidade nessa região e em melhores taxas de transferência de massa e calor no processo (CONCEIÇÃO FILHO, 1997 apud CUNHA, 2008).
- Leito de Seção Retangular: utilizado geralmente para estudos da influência do ângulo da base como uma das variáveis de processo de recobrimento. É composto de um prisma retangular com uma base de tronco piramidal (CONCEIÇÃO FILHO, 1997 apud CUNHA, 2008).

· Leito Vibro - Jorrado: um sistema de vibração localizado na base do leito proporciona uma maior movimentação das partículas (CONCEIÇÃO FILHO, 1997 apud CUNHA, 2008).

2.4.3. Características fluidodinâmicas de um leito de jorro

O comportamento fluidodinâmico do leito de jorro pode ser descrito por meio de um gráfico da queda de pressão em função da velocidade do fluido, conhecido como curva característica. Essa curva representa a transição do leito fixo ao leito em regime de jorro e está ilustrada na Figura 2.5.

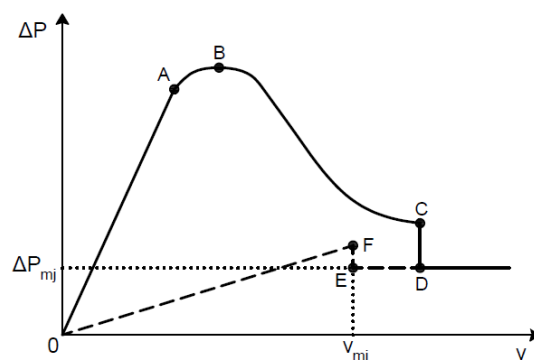


Figura 2.5 - Curva característica do leito de jorro.

A linha sólida é obtida para a velocidade do ar crescente, enquanto a tracejada é adquirida no processo inverso. Segundo Bacelos (2006), a histerese existente entre as duas curvas ocorre porque no processo de redução da velocidade do ar não existe a necessidade de uma energia mecânica, suficientemente alta para romper o jorro, como ocorre na operação inversa. As etapas do mecanismo de transição de leito fixo ao regime de jorro descritas por Mathur e Epstein (1974) são apresentadas a seguir:

- a) em baixas velocidades, o fluido simplesmente atravessa o leito, percolando pelos espaços vazios em seu interior, sem perturbar o arranjo de partículas. A queda de pressão aumenta linearmente com o acréscimo da velocidade, como em um leito fixo (trecho O-A);
- b) ao atingir certa velocidade do ar, inicia-se o deslocamento das partículas situadas nas proximidades do orifício de entrada do fluido, formando uma cavidade relativamente vazia. As partículas em torno dessa cavidade são comprimidas contra o restante do leito, formando um arco compacto que oferece maior resistência para o escoamento do fluido. Por isso, apesar da existência de uma cavidade oca, a queda de pressão no leito continua aumentando, mas deixa de apresentar o comportamento linear (trecho A-B);
- c) ainda com velocidades crescentes, a pequena cavidade alonga-se para um jorro interno. O arco de sólidos compactados localizados acima desse jorro aumenta expressivamente até a queda de pressão atingir o valor máximo no ponto B (ΔP_{\max});
- d) um novo aumento na velocidade além do ponto B provoca uma diminuição na queda de pressão. Isso ocorre porque a altura do jorro interno se torna grande em comparação aos sólidos empacotados, diminuindo assim a resistência ao escoamento do fluido (trecho B-C);
- e) próximo ao ponto C, nota-se uma expansão significativa do leito proporcionada pelo deslocamento de sólidos da região central e conseqüentemente, uma diminuição da queda de pressão. Com um pequeno aumento na velocidade do ar, atinge-se o jorro incipiente (ponto C);
- f) com o acréscimo na velocidade do ar além do ponto C, o jorro interno rompe a superfície do leito. Quando isso ocorre, a concentração de sólidos na região diretamente acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma considerável redução na queda de pressão para o ponto D. Assim, todo o leito torna-se móvel e em estado de jorro contínuo;
- g) a partir do ponto D, um novo aumento na velocidade do fluido não acarreta mudanças significativas na queda de pressão, uma vez que a quantidade adicional de ar injetado na coluna escoar na região de jorro, onde é oferecida a menor resistência. A fonte se desenvolve e a circulação de partículas é uniforme, caracterizando o regime de jorro estável.

A velocidade de jorro incipiente e o início do jorro observado durante o processo crescente de velocidade não são reproduzíveis, visto que dependem do estado inicial de compactação das partículas. Dessa forma, a condição de mínimo jorro é obtida por meio do decréscimo gradual e progressivo da velocidade de gás a partir do leito remanescente em estado de jorro (MATHUR; EPSTEIN, 1974).

Com velocidades de gás decrescentes, a altura da fonte diminui e o jorro estabelecido mantém-se até o ponto E da curva. Esse ponto corresponde a queda de pressão de jorro mínimo e a menor velocidade de ar capaz de manter um jorro estável. O decréscimo gradual da velocidade do ar a partir do ponto de mínimo jorro provoca o seu colapso e um aumento repentino na queda de pressão (ponto F). Ainda em processo decrescente da velocidade do gás, observa-se que a queda de pressão diminui continuamente ao longo do trecho FO.

Parâmetros fluidodinâmicos importantes são determinados a partir das curvas características. A queda de pressão máxima (ΔP_{max}) é utilizada para calcular a potência do soprador necessária para se atingir o regime de jorro estabelecido. A queda de pressão de jorro estável e a velocidade de mínimo jorro, ΔP_{mj} e V_{mj} , determinam as exigências das condições de operação (EPSTEIN; GRACE, 2011).

Ademais, vale ressaltar a importância de se analisar a composição de misturas de partículas e altura de leito estático durante os ensaios fluidodinâmicos. Por meio desse estudo, é possível verificar as misturas capazes de formar um jorro estabelecido, e a altura máxima do leito em que é possível se obter um sistema estável, sem que ocorra fluidização heterogênea ou movimento empistonado.

No regime de jorro estável, o escoamento das partículas deve estabelecer um movimento cíclico ordenado e mantido em uma altura de fonte estável situada na parte central da superfície do leito. Por outro lado, o regime de jorro instável é caracterizado pela rápida oscilação da altura da fonte de partículas e pulsação do leito (MATHUR; EPSTEIN, 1974; XU et al., 2004). A verificação da estabilidade do regime de jorro foi realizada visualmente por muito tempo. Entretanto, como essa prática não é possível em equipamentos em escala

industrial, pesquisadores se empenharam no estudo de algumas técnicas de análise da flutuação de pressão nos leitos de jorro, as quais atualmente desempenham um papel importante na identificação dos regimes de escoamento (BACELOS, 2006).

Xu et al. (2004) propuseram uma análise estatística da flutuação da pressão para identificar regimes estáveis e instáveis em leitos de jorro cilíndricos de base cônica. Essa técnica baseia-se na análise do desvio padrão (σ) da queda de pressão total no leito em função da velocidade do ar (v), como ilustra a Figura 2.6.

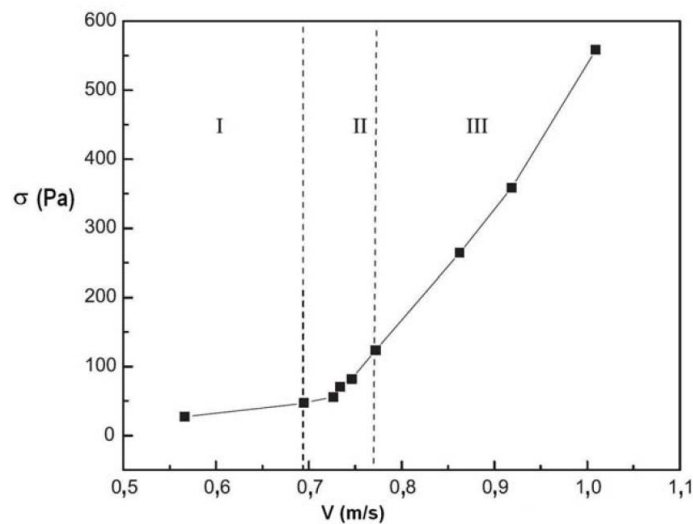


Figura 2.6 - Desvio padrão do sinal de queda de pressão (σ) do leito em função da velocidade do ar (v) para vários regimes de escoamento: I - leito fixo; II - jorro estável; III - jorro instável. Fonte: Xu et al. (2004).

Observa-se na Figura 2.6 que o desvio padrão do sinal de queda de pressão no leito (σ) aumenta ligeiramente com o acréscimo da velocidade do ar na região de leito fixo, caracterizando o aumento da complexidade da dinâmica do escoamento ar-sólido. Em seguida, ao passar do regime de leito fixo para o de jorro, o desvio padrão da queda de pressão continua aumentando, embora ainda se mantenha estável. O aumento abrupto acontece quando a velocidade do ar é significativamente superior à velocidade de mínimo jorro, gerando assim, o regime de jorro instável.

2.4.4. Segregação da mistura de partículas em leito de jorro

O emprego do leito de jorro no processo de pirólise implica diretamente na adição de material particulado inerte, geralmente areia. Além de conferir estabilidade fluidodinâmica, as partículas de areia são responsáveis pela maior parte do aquecimento da biomassa. Nesse contexto, torna-se necessário um estudo detalhado sobre os mecanismos de mistura e segregação nesse equipamento.

Segundo Kutluoglu et al. (1983), a segregação em leitos móveis ocorre principalmente devido à diferença de velocidade terminal das partículas. As maiores e mais densas partículas possuem um tempo de recirculação menor devido a uma trajetória mais curta. Dessa forma, quando são arrastadas pelo ar na região de jorro, essas partículas sobem a uma altura menor na fonte e caem numa parte mais interna da região anular. Outro fator também destacado foi a colisão das partículas na região da fonte. Apesar da dispersão devido às colisões aleatórias, existe uma forte correlação entre a posição radial na qual as partículas entram na região de fonte, a altura máxima atingida e a posição radial em que caem sobre a superfície anular. Ao estudar o efeito da velocidade sobre o grau de mistura das partículas, os autores puderam verificar que a segregação é atenuada com o aumento do fluxo de ar.

San José et al. (1994) estudaram a segregação radial e longitudinal para misturas binárias e ternárias em leito de jorro cônico e estabeleceram correlações úteis que relacionam o índice global de mistura às variáveis de projeto e às propriedades da mistura de sólidos.

Por meio de observações visuais, Bacelos (2006) estudou o processo de segregação ocorrido em um leito de jorro cônico preenchido com partículas esféricas de diferentes tamanhos e concluiu que o fenômeno de segregação é predominantemente governado pela ação da inércia das partículas e da força gravitacional sobre as mesmas. Segundo o autor, o deslocamento de cada partícula na direção radial depende de sua inércia, ou seja, quanto menor o diâmetro da partícula, maior é o seu deslocamento na direção radial.

Hao et al. (2008) realizaram experimentos com misturas de partículas em um leito de jorro com entrada de ar anular. Foi verificado que ao fazer a alimentação utilizando um cone rotativo, houve um aumento significativo no grau de mistura, visto que as partículas são projetadas de forma mais homogênea para o interior do leito. Além disso, o aumento da velocidade do gás, em geral, causa uma elevação no grau de mistura, principalmente na região de jorro.

Santos (2011b) estudou a segregação de misturas de esferas de vidro de diferentes diâmetros, bem como de misturas de areia e bagaço de cana-de-açúcar. No caso das misturas de esferas de vidro, foi observado comportamento semelhante ao verificado por Kutluoglu et al. (1983) e Bacelos (2006), com as partículas maiores concentradas na parte central do leito e as menores próximas à parede. Com relação as misturas de biomassa e areia, constatou-se que a segregação é mais acentuada em misturas ricas em bagaço. Ainda segundo o autor, em misturas de partículas com densidades diferentes, pode-se verificar que as mais densas, apesar de terem a trajetória mais curta na fonte, e caírem próximas à região de jorro, elas descem até a base do leito. Por outro lado, os materiais de menor densidade, como as partículas de bagaço, apresentam dificuldade de escoar e permanecem próximas à parede, na região superior do leito.

2.4.5. Porosidade de misturas binárias

A fluidodinâmica em leito de jorro é altamente influenciada pela porosidade do leito estático. Leitos com maior empacotamento oferecem maior resistência ao escoamento das partículas, chegando a maiores picos de queda de pressão. Ademais, se a porosidade na região anular é menor, o escoamento do fluido concentra-se na região central do leito, exigindo assim uma vazão de ar menor para iniciar o regime de jorro.

Muitos trabalhos na literatura buscam investigar os mecanismos que interferem na porosidade de leitos empacotados. No caso de leitos compostos por partículas de diferentes esfericidades, como a maioria das misturas de biomassa e areia, o mecanismo de preenchimento é observado (SANTOS, 2011b).

O leito composto por sólidos menos esféricos apresenta maior porosidade, formando uma matriz de partículas com grande quantidade de espaços vazios (preenchidos com ar). Assim, ao adicionar as partículas da outra fase, esses vazios são preenchidos sem que o esqueleto se desfaça, o que indica uma redução da porosidade.

2.5. Simulações computacionais da dinâmica de partículas em leito de jorro e modelo matemático

2.5.1. Aspectos gerais

O emprego de *softwares* de simulação via Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) vem crescendo e se tornando cada vez mais comum na investigação de fenômenos físicos e físico-químicos que ocorrem em escoamentos multifásicos. No caso do estudo da fluidodinâmica de um leito de jorro, essa técnica permite explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática e obter informações detalhadas, como a distribuição de velocidade das partículas e do fluido, perfil de porosidade do leito e queda de pressão.

Trabalhos sobre simulações computacionais da dinâmica de partículas em leito de jorro estão disponíveis na literatura e demonstram avanços significativos. Duarte et al. (2005), por exemplo, simularam a fluidodinâmica das partículas e

do gás no interior de um leito de jorro. Os resultados encontrados para a velocidade e perfis de porosidade foram comparados com dados experimentais obtidos em laboratório, para um leito de jorro bidimensional usando sementes de soja, e com os resultados de He et al. (1994), para um leito de jorro cilíndrico com esferas de vidro, demonstrando uma boa correlação entre ambos.

Du et al. (2006) realizaram um estudo de simulação pela técnica de CFD para entender a influência de modelos de arraste na modelagem de um leito de jorro convencional. Modelos de arraste conhecidos na literatura (Di Felice, 1994; Richardson e Zaki, 1954; Syamlal e O'Brien, 1988; Arastoopour et al., 1990; Gidaspow, 1994) foram analisados e a fluidodinâmica resultante da incorporação de cada modelo foi comparada com os dados experimentais de He et al. (1994). O estudo mostrou que os diferentes modelos levam a diferenças significativas nas simulações e que o modelo de Gidaspow (1994) foi o que proporcionou as melhores concordâncias com as observações experimentais, tanto qualitativamente como quantitativamente.

Duarte et al. (2009) realizaram experimentos e simulações CFD de um leito de jorro semi-cilíndrico com misturas binárias de esferas de vidro em diferentes proporções e tamanhos de partículas. Nesse trabalho foram obtidos perfis experimentais de velocidade de sólidos ao utilizar uma câmera de alta precisão. Os valores de velocidade das partículas obtidos experimentalmente foram comparados com os valores simulados e apresentaram boa concordância. Por fim, os autores verificaram que o modelo Euleriano Granular Multifásico é uma boa opção para avaliar a fluidodinâmica em um leito de jorro de sistemas com duas e três fases.

Béttega et al. (2009) abordaram a ampliação de escala de um leito de jorro com base nos parâmetros adimensionais apresentados por He et al. (1997). Os autores puderam verificar que a técnica de CFD é capaz de prever o comportamento de leitos em maiores escalas, baseando-se no princípio da similaridade.

Santos et al. (2010) realizaram simulações empregando a técnica CFD a fim de reproduzir alguns aspectos fluidodinâmicos de segregação em leitos de jorro

cônico operando com misturas binárias de esferas de vidro. A posição dos sólidos no leito e o fluxo de gás foram simulados numericamente utilizando o modelo Euleriano Granular. Pelas simulações, pôde-se prever a velocidade e a queda de pressão no jorro mínimo com ótima concordância com os dados experimentais. Os perfis de contorno possibilitaram visualizar as regiões de segregação no leito e mostraram que as partículas maiores são encontradas em maior proporção na parte interna e superior da região anular. Além disso, o efeito do aumento da velocidade de ar na entrada sobre o índice de mistura de partículas foi reproduzido pelas simulações e mostraram que a segregação foi atenuada com o aumento do fluxo de ar.

Melo (2014) analisou experimentalmente e por simulações numéricas via técnica CFD o comportamento fluidodinâmico de misturas de areia e compósito PEBD/Al. As simulações foram consideradas adequadas para prever o comportamento fluidodinâmico do leito de jorro, apesar de subestimar os valores experimentais. Para os dados de velocidade de mínimo jorro, queda de pressão de mínimo jorro e queda de pressão máxima no leito, foram observados erros relativos máximos na ordem de -13,9; -9,9; e -23,0 respectivamente.

2.5.2. Dinâmica dos Fluidos Computacional – CFD

A Dinâmica dos Fluidos Computacional baseia-se na solução de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia através do emprego de métodos numéricos. A solução de problemas por meio dessa técnica exige a execução de três principais etapas, como verificado na Figura 2.7 (TU et al., 2008).

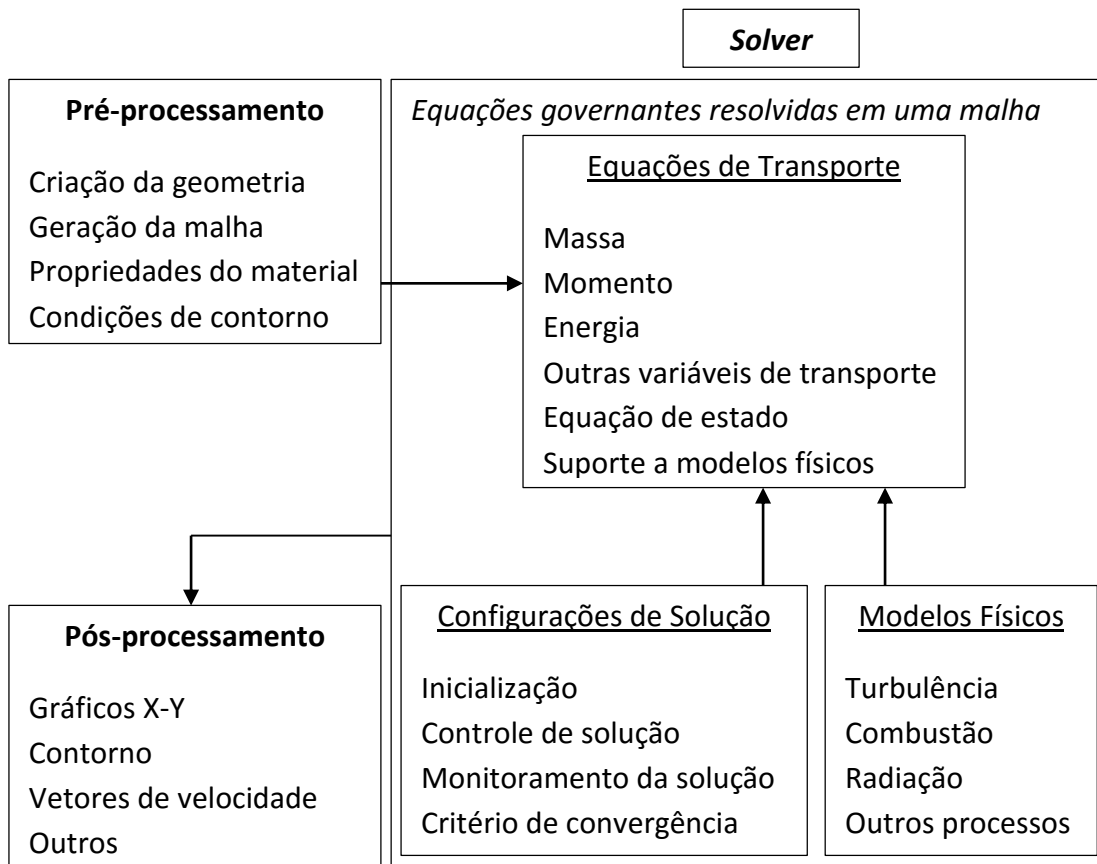


Figura 2.7 - Principais elementos e funções que compõem a técnica CFD.
Fonte: Tu et al., 2008

A primeira etapa, o pré-processamento, consiste na definição do problema e engloba a seleção dos fenômenos físicos e químicos que serão simulados; definição da geometria da região de interesse, ou seja, do domínio computacional; geração da malha; definição das propriedades dos fluidos e especificação das condições de contorno apropriadas (TU et al., 2008; SANTOS, 2010).

Definido o problema, o *solver* implementa as técnicas numéricas de solução e os parâmetros para resolver os problemas de modo apropriado. Nessa etapa, as equações de conservação são integradas em todos os volumes de controle do domínio, ocorre a transformação do sistema de equações diferenciais parciais em um sistema de equações algébricas, o qual será resolvido por métodos numéricos iterativos (TU et al., 2008; SANTOS, 2010).

O pós-processador consiste na visualização e análise dos resultados. Devido aos avanços tecnológicos, a maioria dos softwares comerciais de CFD estão

equipados com ferramentas versáteis para visualização de campos escalares e vetoriais, incluindo a visualização da geometria e malha, gráficos de vetores, de contorno e visualizações de linhas de fluxo e de trajetórias das partículas (TU et al., 2008; SANTOS, 2010).

Malhas

A geração de malha consiste na divisão do domínio computacional em pequenos subdomínios não sobrepostos, chamados elementos. A precisão da solução em um problema de CFD depende do número de elementos e como esses estão distribuídos na malha. De maneira geral, a precisão melhora com o aumento do número de subdomínios. Entretanto, é necessário balancear a precisão da solução através do refinamento da malha com o custo computacional de se obter a solução no *hardware* disponível (MOURA, 2010).

Segundo Tu et al. (2008), as malhas estruturadas são construídas através da subdivisão dos eixos coordenados, gerando elementos bidimensionais e tridimensionais que são, geralmente, quadriláteros e hexaédricos respectivamente. Embora a topologia do elemento seja fixa, a grade pode ser moldada para sofrer alterações como torcer e esticar. Nessas malhas, cada elemento tem o mesmo número de subdomínios vizinhos, a não ser quando o mesmo pertence ao contorno.

As malhas não estruturadas distribuem os elementos de maneira aleatória, sem apresentar um padrão repetido. Ademais, a conectividade destas malhas varia ponto a ponto, ocorrendo assim elementos de diferentes formas e tamanhos, os quais podem apresentar vizinhos locais arbitrariamente variados (VAZ, 2003). Em problemas bidimensionais, os elementos gerados são geralmente triangulares, enquanto nos tridimensionais, os elementos tetraédricos são dominantes, embora outras formas também podem ser utilizadas. Essas malhas representam facilmente geometrias mais complexas, devido à maior flexibilidade de forma que seus elementos podem assumir (TU et al., 2008).

De acordo com Duarte (2006), malhas híbridas são caracterizadas pela combinação de regiões de malhas estruturadas e não estruturadas e por não possuir características bem definidas.

2.5.3. Modelagem matemática de sistemas multifásicos utilizando a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD)

Para modelar um sistema multifásico é necessário levar em consideração a conservação de propriedades das fases envolvidas e contabilizar a interação entre elas, exigindo assim um modelo multifásico apropriado. Atualmente, existem duas principais abordagens físico-matemáticas para a modelagem de sistemas multifásicos compostos por fases granulares: a abordagem Euler-Lagrange e a Euler-Euler (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

Diversos estudos têm demonstrado que a abordagem Euler-Euler é capaz de prever adequadamente o comportamento fluidodinâmico em leitos de jorro. Esse equipamento apresenta alta quantidade de sólido particulado em fase densa, o que torna a abordagem Euler-Lagrange inviável (VAN WACHEM, 2000; BÉTTEGA et al., 2009; SANTOS, 2011b).

Pela abordagem Euler-Lagrange, a fase discreta é tratada de forma lagrangeana. Tal fato implica em modelar a fase contínua pela resolução das equações de Navier-Stokes no tempo médio, completamente ausente da fase discreta, e posteriormente utilizar as informações fluidodinâmicas previamente levantadas para a descrição do comportamento da fase discreta. Nesta abordagem, o movimento de cada partícula é obtido individualmente e assume-se que essa fase não causa perturbação no campo de velocidade calculado para a fase contínua. Assim, sua aplicação é limitada a sistemas em que a fase dispersa ocupa baixa fração de volume, devido ao grande esforço computacional necessário na solução de seu equacionamento (DUARTE, 2006; ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

Na aproximação Euler-Euler, as diferentes fases são tratadas matematicamente como contínuas e interpenetrantes. Dessa descrição surge o conceito de frações volumétricas das fases (α), que são funções contínuas no espaço e no tempo e cuja soma equivale à unidade. As leis de conservação são satisfeitas para cada fase individualmente e ao conjunto das equações governantes de massa, momento e energia, acrescentam-se as equações constitutivas (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

O software comercial *ANSYS FLUENT* disponibiliza três diferentes modelos aplicáveis a escoamentos multifásicos sob a abordagem Euler-Euler: o Modelo de Volume de Fluidos, o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano. Dentre esses, o modelo Euleriano, apesar de ser o mais complexo, é o indicado para a modelagem do escoamento em leito de jorro. O Modelo Euleriano resolve um conjunto de equações de momento e da continuidade para cada fase, sendo aplicado nos casos em que a fração de volume da fase granulada é comparável ao da fase contínua, as forças de campo, como a gravidade, atuam de forma relevante no sistema e a interação entre as fases tem um papel significativo na fluidodinâmica do sistema (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

No Modelo Euleriano Granular, o material sólido é tratado como um pseudo-fluido com equações de conservação contendo termos adicionais para lidar com os fenômenos presentes no escoamento de material particulado. Cada um desses termos é modelado através da Teoria Cinética Granular (ANSYS FLUENT THEORY GUIDE, 2013).

Na Teoria Cinética Granular, abordada em detalhes por Lun et al. (1984), a fase particulada é descrita utilizando-se uma teoria análoga à Teoria Cinética dos Gases. A energia cinética associada às flutuações da velocidade na fase sólida é considerada responsável por propriedades e tensões no meio. Para representar esta energia é introduzida a variável temperatura granular, que representa uma temperatura “pseudotérmica” da fase particulada e é proporcional à metade do quadrado da velocidade das partículas.

2.5.4. Modelagem matemática do escoamento granular multifásico em leito de jorro

Diante do que foi exposto, o modelo Euleriano Granular Multifásico mostrou-se adequado para a simulação da fluidodinâmica em leito de jorro. Neste tópico serão descritas as principais equações conservativas e constitutivas do modelo.

Sistema sob análise

A Figura 2.8 apresenta um esquema do sistema em estudo, bem como as principais condições de contorno e iniciais empregadas na modelagem.

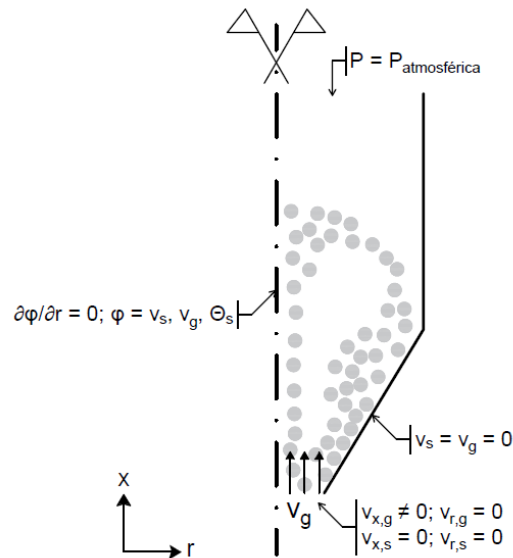


Figura 2.8 - Condições de contorno e iniciais do sistema sob análise.

Considera-se que a injeção de ar na entrada do leito é somente na direção axial e a velocidade inicial de sólidos é nula na direção radial e axial. Na saída do leito, a pressão é a atmosférica. No eixo de simetria, os gradientes radiais de temperatura granular e de velocidade são nulos para ambas as fases (gás e sólido), enquanto nas paredes, foi adotada uma condição de não deslizamento (*no slip*).

Modelo Euleriano Granular Aplicado ao Leito de Jorro

Com base na análise do modelo Euleriano e nas características do escoamento ar-partícula em leito de jorro, o problema pode ser modelado mediante as seguintes hipóteses simplificadoras:

- regime transiente;
- partículas esféricas;

- escoamento multifásico (gás-sólido) com fases contínuas;
- escoamento ar-sólido bidimensional (x,r);
- transferência de massa entre as fases primária e secundária nula;
- sem reação química;
- forças externas, forças de ascensão e força de massa virtual desprezadas.

Inicialmente, é importante ressaltar que o modelo Granular Euleriano Multifásico considera a fase fluida como contínua e a fase sólida dispersa. A fase contínua é dita primária e a dispersa secundária. Nas equações a seguir, a notação g (gás) refere-se a fase primária, enquanto s_1 (sólido 1 - casca) e s_2 (sólido 2 - areia) as fases secundárias. As Tabelas 2.5 e 2.6 apresentam as principais equações governantes e constitutivas empregadas ao modelo.

Tabela 2.5 - Equações governantes do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro.

Equações governantes			
1. <i>Equações da continuidade</i>			
(a)	Fase fluida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0$	(T5-1)
(b)	Fase sólida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0$	$s = s_1, s_2$ (T5-2)
		$\alpha_g + \alpha_{s_1} + \alpha_{s_2} = 1$	(T5-3)
2. <i>Conservação de momento</i>			
(a)	Fase fluida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + \beta(\vec{v}_s - \vec{v}_g)$	$s = s_1, s_2$ (T5-4)
(b)	Fase sólida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla P - \nabla P_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \beta(\vec{v}_g - \vec{v}_s)$	$s = s_1, s_2$ (T5-5)
3. <i>Conservação da energia cinética para fase granular</i>			
		$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{gs}$	$s = s_1, s_2$ (T5-6)

O primeiro termo nas Equações T5-1 e T5-2 representa o acúmulo de massa por unidade de volume e o segundo corresponde ao fluxo de massa convectivo no volume de controle, considerando-se nula a transferência de massa entre as fases.

Os termos do lado esquerdo das Equações T5-4 e T5-5 são respectivamente a taxa de acúmulo e a transferência de quantidade de movimento por convecção. No lado direito das equações, têm-se a contribuição do gradiente de pressão no escoamento, a transferência de quantidade de momento pelo mecanismo molecular, a ação gravitacional e a transferência de momento entre as fases. Para a equação de momento da fase sólida, o termo adicional de pressão de sólidos (p_s) pode ser observado.

Vale ressaltar que as forças de massa virtual e de ascensão foram desconsideradas nas equações de conservação de momento para ambas as fases. A força de massa virtual surge quando a fase dispersa acelera em relação à fase fluida, e se torne importante quando a densidade da fase secundária é significativamente menor que a densidade da fase primária, fato que não ocorre no sistema em análise. Da mesma forma, a força de ascensão também é negligenciada, uma vez que sua inclusão não é apropriada para leitos com alto empacotamento, como geralmente ocorre em leitos de jorro.

A temperatura granular (θ_s) é proporcional a energia cinética do movimento aleatório das partículas. Os termos da direita da equação de transporte (T5-6) representam, respectivamente a geração de energia pelo tensor tensão da fase sólida ($(-P_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla v_s$); os efeitos de difusão da temperatura granular na fase sólida ($k_{\theta_s} \nabla \theta_s$, em que k_{θ_s} é o coeficiente de difusão da temperatura granular); a dissipação de energia ocasionada pelas colisões (γ_{θ_s}) e a troca de energia entre as fases sólida e fluida (ϕ_{gs}).

Tabela 2.6 - Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro.

(continua)

Equações constitutivas

1. *Pressão de sólidos*
Lun et al. (1984)

$$P_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (\text{T6-1})$$

2. *Tensor das tensões viscosas*

(a) Fase fluida

$$\bar{\tau}_g = \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) + \left(\alpha_g \lambda_g - \frac{2}{3} \alpha_g \mu_g \right) \nabla \cdot \vec{v}_g \bar{I} \quad (\text{T6-2})$$

(b) Fase sólida

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \left(\alpha_s \lambda_s - \frac{2}{3} \alpha_s \mu_s \right) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{I} \quad (\text{T6-3})$$

3. *Viscosidade cisalhante*

Gidaspow et al. (1992)

$$\mu_s = \frac{4}{5} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} (1 + e_{ss}) \alpha_s g_{0,ss} \right]^2 \alpha_s \quad (\text{T6-4})$$

4. *Viscosidade bulk*

Lun et al. (1984)

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (\text{T6-5})$$

5. *Distribuição radial*

Ogawa et al. (1980)

$$g_{0,ss} = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (\text{T6-6})$$

6. *Modelos de arraste*

(a) Gidaspow et al. (1992) (coeficiente de troca gás-sólido)

$$\beta = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2.65}, \quad \alpha_g > 0,8 \quad (\text{T6-7})$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[1 + 0,15 (\alpha_g Re_s)^{0,687} \right] \quad (\text{T6-8})$$

$$\beta = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_g) \mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s}, \quad \alpha_g \leq 0,8 \quad (\text{T6-9})$$

(b) Syamlal (1987) (coeficiente de troca sólido-sólido)

$$\beta = \frac{|\vec{v}_{s_1} - \vec{v}_{s_2}|}{2\pi(\rho_{s_1} d_{s_1}^3 + \rho_{s_2} d_{s_2}^3)} \cdot \frac{3(1 + e_{s_1 s_2}) \left(\frac{\pi}{2} + C_{fr, s_1 s_2} \frac{\pi^2}{8} \right) \alpha_{s_1} \rho_{s_1} \alpha_{s_2} \rho_{s_2} (d_{s_1} + d_{s_2})^2 g_{0, s_1 s_2}}{\quad} \quad (\text{T6-10})$$

7. *Coeficiente de difusão*

Gidaspow et al. (1992)

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \alpha_s^2 \rho_s d_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (\text{T6-11})$$

Tabela 2.6 - Principais equações constitutivas do Modelo Euleriano para o escoamento gás-sólido em leito de jorro.

(conclusão)

Equações constitutivas	
8. <i>Dissipação de energia colisional</i> Lun et al. (1984)	$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1 - e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s\sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{3/2}$
	(T6-12)
9. <i>Troca de energia entre a fase sólida e fluida</i> Gidaspow et al. (1992)	$\phi_{gs} = -3\beta\theta_s$
	(T6-13)

A pressão de sólidos P_s (T6-1) é utilizada no termo do gradiente de pressão, ∇P_s , presente na equação de momento da fase granular (T5-5), e é composta por um termo cinético e um segundo termo que surge em virtude das colisões entre as partículas. Nessa equação, e_{ss} representa o coeficiente de restituição para colisões entre partículas e $g_{0,ss}$ a função de distribuição radial. O efeito de colisão representa uma parcela grande na pressão dos sólidos e resulta de duas formas distintas de interação partícula-partícula. A primeira é um efeito direto do contato entre as partículas, conhecida como efeito de longa duração, o qual ocorre principalmente em leitos fixos. A segunda forma é conhecida como efeito de curta duração e ocorre principalmente em leitos fluidizados, sendo decorrente do choque das partículas (BÉTTEGA, 2009).

O coeficiente de restituição representa a inelasticidade entre o choque de partículas. Seu valor pode ser tomado entre 0,9 e 0,99, embora também possa ser ajustado para se adaptar a um determinado tipo de partícula (DARTEVELLE, 2003). Neste trabalho adotou-se um valor de 0,9, o qual é usualmente encontrado na literatura (DUARTE, 2006; BÉTTEGA, 2009; SANTOS, 2011b).

Para o tensor das tensões viscosas, assume-se a forma Newtoniana para ambas as fases, conforme apresentado nas Equações T6-2 e T6-3. Nessas equações são inseridos os termos de viscosidade cisalhante (μ) e viscosidade *bulk* (λ).

A viscosidade de cisalhamento é obtida da soma das componentes colisional, cinética e friccional. A região mais diluída do escoamento é caracterizada por

apresentar uma dissipação viscosa cinética, resultante do movimento aleatório das partículas. Na região onde a concentração de sólidos é maior, a dissipação é dita viscosa colisional, pois as partículas além de se movimentarem aleatoriamente, podem sofrer colisões instantâneas. O efeito friccional surge para empacotamentos muito altos da fase sólida, onde a dissipação viscosa deve-se ao atrito entre as partículas que compõem o sistema (SANTOS, 2011a).

Neste estudo, entretanto, optou-se por desprezar a viscosidade friccional de sólidos, baseando-se no trabalho de Du et al. (2006), que revela pouca influência da inclusão de um Modelo Friccional na fluidodinâmica do leito de jorro. Dessa forma, a viscosidade cisalhante apresenta a contribuição colisional e cinética, representadas pelo primeiro e segundo termo da Equação T6-4, respectivamente. A viscosidade bulk (T6-5) é o parâmetro responsável por contabilizar a resistência das partículas granulares à compressão e expansão.

A função de distribuição radial (T6-6) descreve a probabilidade de encontrar duas partículas próximas o suficiente para colidirem. Também pode ser interpretada como uma função de distribuição que governa a transição da condição de compressibilidade ($\alpha < \alpha_{s,máx}$), onde o espaço entre as partículas pode continuar a diminuir, para a condição de incompressibilidade ($\alpha = \alpha_{s,máx}$), onde não pode ocorrer mais diminuição no espaço vazio (DUARTE, 2006).

Outro fator a ser considerado que possui grande influência nos resultados simulados é o modelo de arraste. A força de arraste tem a função de interligar as fases existentes em um escoamento multifásico, de forma a contabilizar a interação entre elas. Para os leitos de jorro, esse efeito da interação é particularmente importante devido à presença de altos gradientes de fração volumétrica das fases no sistema (alta porosidade na região do canal de jorro e baixa porosidade na região anular do leito). Tal fato torna a descrição correta deste efeito primordial para uma simulação representativa.

O modelo de Gidaspow et al. (1992), descrito pelas Equações T6-7, T6-8 e T6-9, é comumente utilizado para representar o coeficiente de troca de momento entre fases gás-sólido (β). Esse modelo faz uma combinação da equação de Wen e Yu (1966) para regiões mais diluídas e de Ergun (1952) para as mais

concentradas, e conseqüentemente, é sensível aos altos gradientes de fração volumétrica das fases no sistema. Encontram-se trabalhos na literatura que reiteram sua aplicabilidade na previsão do escoamento característico do leito de jorro, como os de Du et al. (2006) e Melo (2014).

Devido à presença de duas fases granulares, há a adição de um termo de troca de momento sólido-sólido (T6-10) definido por Syamlal (1987). Nessa equação, $e_{s_1s_2}$ representa o coeficiente de restituição entre as fases, C_{fr,s_1s_2} o coeficiente de fricção ($C_{fr,s_1s_2} = 0$), d_{s_1} e d_{s_2} os diâmetros das diferentes partículas; g_{0,s_1s_2} a função de distribuição radial entre as fases e $|\vec{v}_{s_1} - \vec{v}_{s_2}|$ a velocidade relativa entre as fases sólidas.

Os termos do coeficiente de difusão da temperatura granular (k_{θ_s}), dissipação de energia devido às colisões entre partículas da fase sólida (γ_{θ_s}) e transferência de energia cinética das flutuações aleatórias na velocidade da partícula da fase sólida para a fase fluida (ϕ_{gs}), presentes na equação de conservação da energia cinética (T5-6), são descritos pelas Equações T6-11, T6-12 e T6-13, respectivamente.

A questão da turbulência em escoamentos multifásicos é pouco abordada na literatura, não existindo consenso quanto ao modelo que melhor represente o fenômeno. Apesar disso, o emprego do modelo k- ϵ na modelagem da turbulência em leito de jorro pode ser verificado em alguns trabalhos (DU et al., 2006; SANTOS, 2008b; ROSA, 2010; MARQUES, 2013; MELO, 2014).

O modelo de turbulência k- ϵ é constituído de duas equações de transporte, uma para energia cinética turbulenta (k) e outra para sua taxa de dissipação das flutuações de velocidade (ϵ). O FLUENT apresenta três variações do modelo de turbulência k- ϵ : k- ϵ da mistura, k- ϵ disperso e k- ϵ para cada fase.

O modelo de turbulência k- ϵ da mistura é indicado para escoamentos multifásicos estratificados e quando a razão da densidade entre as fases é próxima a um. O modelo k- ϵ disperso é apropriado quando as concentrações das fases secundárias são diluídas. Nesse caso, as colisões entre as partículas são negligenciadas e o processo dominante no movimento aleatório da fase

secundária é definido pela turbulência da fase primária. Por último, o modelo de turbulência k-ε para cada fase é adequado para sistemas em que a transferência de momento turbulento entre as fases é dominante.

O modelo de fase dispersa foi escolhido para este trabalho em vista da fase particulada densa do leito de jorro estar situada basicamente na região anular e apresentar um movimento descendente muito lento. Na região do canal de jorro, onde o regime de escoamento é de uma fase particulada mais dispersa, as partículas alcançam maiores velocidade e estão em contato com um ar escoando também a uma alta velocidade, sendo, portanto, mais influenciadas por efeitos de turbulência (BÉTTEGA, 2009).

A Tabela 2.7 apresenta as principais equações do modelo de turbulência disperso.

Tabela 2.7 – Equações do modelo de turbulência k-ε disperso.

(continua)

Modelo de turbulência k-ε disperso (fase contínua)

1. Tensor tensão de Reynolds

$$\bar{\tau}_g = -\frac{2}{3}(\alpha_g \rho_g k_g + \alpha_g \rho_g \mu_{t,g} \nabla \cdot \vec{v}_g) \bar{I} + \alpha_g \rho_g \mu_{t,g} (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T) \quad (T7-1)$$

2. Viscosidade turbulenta

$$\mu_{t,g} = \rho_g C_\mu \frac{k_g^2}{\varepsilon_g} \quad (T7-2)$$

3. Tempo de relaxação turbulento

$$\tau_{t,g} = -\frac{2}{3} C_\mu \frac{k_g}{\varepsilon_g} \quad (T7-3)$$

4. Escala do comprimento dos vórtices

$$L_{t,g} = -\sqrt{\frac{2}{3}} C_\mu \frac{k_g^{3/2}}{\varepsilon_g} \quad (T7-4)$$

5. Equações de transporte

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g k_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g k_g) \\ = \nabla \cdot \left(\alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} \nabla k_g \right) + \alpha_g G_{k,g} - \alpha_g \rho_g \varepsilon_g + \alpha_g \rho_g \Pi_{k_g} \end{aligned} \quad (T7-5)$$

Tabela 2.7 – Equações constitutivas do modelo de turbulência k- ε disperso.

(conclusão)

Modelo de turbulência k-ε disperso (fase contínua)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_g \rho_g \varepsilon_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \varepsilon_g) \\ & = \nabla \cdot \left(\alpha_g \frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon_g \right) + \alpha_g \frac{\varepsilon_g}{k_g} (C_{1\varepsilon} G_{k,g} - C_{2\varepsilon} \rho_g \varepsilon_g) + \alpha_g \rho_g \Pi_{\varepsilon_g} \end{aligned} \quad (T7-6)$$

$$G_{k,g} = \mu_{t,g} (\nabla \vec{v}_g + (\nabla \vec{v}_g)^T) : \nabla \vec{v}_g \quad (T7-7)$$

$$C_\mu = 0,09; C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; \sigma_k = 1; \sigma_\varepsilon = 1,3$$

No modelo de turbulência, o tensor das tensões de Reynolds ($\overline{\tau}_{t,g}$), aplicado na equação da conservação de quantidade de movimento para a fase fluida, assume a forma apresentada na Equação T7-1, onde k_g representa a propriedade k da turbulência e $\mu_{t,g}$ a viscosidade turbulenta. O termo de viscosidade turbulenta escrito em função da energia cinética da fase fluida ($\mu_{t,g}$), o tempo que um vórtice turbulento leva para surgir e desaparecer do escoamento ($\tau_{t,g}$) e o comprimento desse vórtice ($L_{t,g}$) estão representados pelas Equações T7-2, T7-3 e T7-4, respectivamente. Para essas últimas equações, ε_g corresponde a propriedade ε da turbulência.

As predições turbulentas para a fase contínua são obtidas a partir das Equações T7-5 e T7-6. Os termos Π_{k_g} e Π_{ε_g} , incluídos ao modelo para contabilizar a influência das fases dispersas sobre a fase contínua, foram desconsiderados neste trabalho após constatar após testes que essa simplificação não trazia diferenças significativas no resultado.

Nas equações de transporte, o termo que representa a geração de energia cinética turbulenta devido a média do gradiente de velocidade ($G_{k,g}$) é calculado a partir da Equação T7-7. Os valores padrões para os números de Prandtl efetivo para k (σ_k) e ε (σ_ε), bem como das demais constantes, C_μ , $C_{1\varepsilon}$ e $C_{2\varepsilon}$ estão expostos na Tabela 2.7.

A descrição da turbulência na fase dispersa é realizada através de uma extensão dos resultados da teoria de Tchen para a dispersão de partículas pelo movimento turbulento de fluidos. Coeficientes de dispersão, funções de correlação e energia cinética turbulenta de cada fase dispersa são considerados em termos das características do movimento turbulento da fase contínua utilizando-se escalas de tempo para caracterizar a interação entre os movimentos oscilatórios (SIMONIN; VIOLLET, 1990).

3. METODOLOGIA

3.1. Metodologia experimental

3.1.1. Obtenção e preparo da amostra

Para a obtenção da casca nas condições desejadas de umidade e tamanho, o coco verde, pertencente à variedade Anão e coletado na cidade de São Mateus - ES, é submetido a uma sequência de operações. Inicialmente, ocorre a retirada da casca do coco – mesocarpo. Devido à elevada umidade da casca *in natura* – em torno de 85% (PINO, 2005), faz-se necessária a etapa de secagem em estufa à 105°C por 24 horas, antes do processo de moagem. Ao término da secagem, as amostras são moídas em moinho de facas e por fim peneiradas para a determinação do tamanho das partículas.

Durante a realização dos ensaios fluidodinâmicos no leito de jorro cônico, são utilizadas as amostras de coco verde e areia como material inerte, os quais estão ilustrados na Figura 3.1.

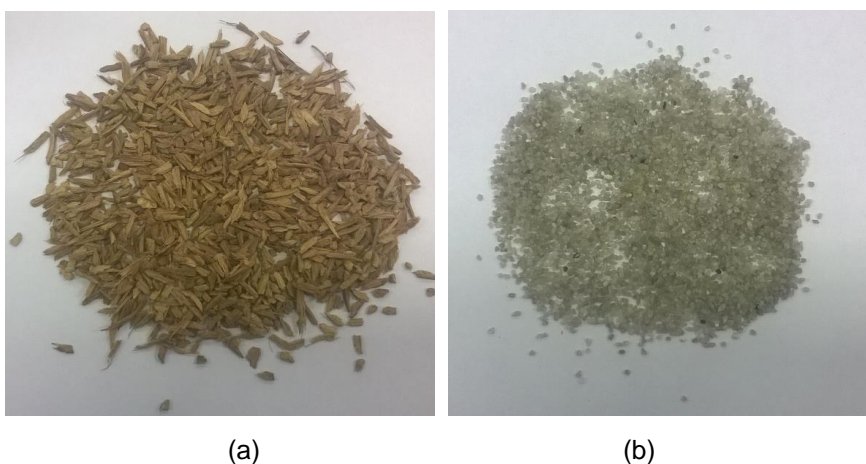


Figura 3.1 - Material utilizado nos ensaios fluidodinâmicos: (a) casca de coco (b) areia.

3.1.2. Caracterização das partículas

3.1.2.1. Caracterização Física

Massa específica aparente (ρ_a)

A massa específica aparente é obtida por picnometria utilizando-se éter de petróleo e água destilada como fluido picnométrico para a casca de coco e areia, respectivamente. Como a biomassa em questão é um material poroso, a realização de um procedimento antes do emprego da picnometria convencional é necessária.

Seguindo a metodologia empregada por Jones (1981, apud RASUL et al., 1999), a amostra é, inicialmente, imersa em um béquer contendo água, aquecida até o ponto de ebulição da água e mantida nessa condição até que toda casca esteja decantada no fundo do recipiente. Em seguida, após retirar o excesso de líquido, a amostra úmida é colocada em estufa de convecção natural (modelo S250SD, Fabricante Biopar) a 105 °C, permanecendo na mesma até que a superfície das partículas pareça estar seca. Nessa etapa, a maioria dos poros ainda está preenchida com água. Por conseguinte, é realizada a picnometria convencional empregando a amostra saturada com água. Parte do material úmido deve permanecer em estufa a fim de determinar a massa de água contida em seus poros.

Os cálculos foram realizados utilizando a Equação 3.1.

$$\rho_a = \frac{m}{V_{pic} - V_l} \quad (3.1)$$

em que m é a massa real de partículas adicionada ao picnômetro, ou seja, aquela que desconsidera a água presente nos poros; V_{pic} representa o volume total do picnômetro e V_l o volume de líquido utilizado.

Massa específica real (ρ_r)

A densidade real da casca de coco foi obtida empregando o método de picnometria a gás (*Micromeritics-Acuumpyc 1331*).

Diâmetro médio (d_p)

O diâmetro médio das partículas (d_p) é obtido através da técnica de peneiramento. As partículas, após o processo de moagem, são alimentadas a um conjunto de peneiras de marca Bertel com aberturas distintas e permanecem em vibração por aproximadamente 5 minutos. No caso da areia, são selecionadas as partículas passantes na peneira com abertura de 1,70 mm e retidas na de 1,40 mm (equivalente a 10 e 12 mesh na escala Tyler, respectivamente). Para a biomassa, foram utilizadas as partículas passantes na peneira de abertura de 2,80 mm e retidas na de 2,36 mm (equivalente a 7 e 8 mesh na escala Tyler, respectivamente). Por fim, o diâmetro médio é estimado através de média aritmética entre o limite superior (1,70 mm para a areia e 2,80 mm para a casca de coco) e o limite inferior (1,40 mm para a areia e 2,36 mm para a casca de coco). Escolheu-se trabalhar com partículas de diâmetros médios diferentes, para verificar sua influência na fluidodinâmica e facilitar o processo de separação durante o procedimento de segregação.

Esfericidade (ϕ)

As partículas de casca de coco e areia foram dispostas em uma bancada e fotografadas com uma câmera de 8 MP. Foram adquiridas diversas fotografias de cada partícula a fim de garantir um mínimo de imagens representativas com resolução e contraste adequados para posterior análise. Para a casca de coco, foi utilizada uma amostra de 200 partículas e para a areia de 100.

As fotografias foram processadas pelo *software* livre desenvolvido no National Institute of Health dos EUA, ImageJ (RIBEIRO et al., 2013). Primeiramente, as imagens receberam um pré-tratamento, utilizando operações de ajuste de contraste e nitidez, alinhamento e corte e após esse processo, as esfericidades das partículas foram determinadas.

3.1.2.2. Análise imediata

As amostras de casca de coco foram submetidas a uma série de etapas com a finalidade de quantificar o teor de umidade, teor de cinzas, teor de voláteis e carbono fixo. As análises foram realizadas em triplicata e de acordo com o que está regulamentado na Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), NBR 8112 – Carvão vegetal – Análise Imediata.

Teor de umidade

Uma massa de aproximadamente dois gramas de casca de coco foi colocada em uma estufa de convecção natural (modelo S250SD, Fabricante Biopar) previamente aquecida a 105°C, permanecendo na mesma até que a massa da amostra fique constante. O teor de umidade é calculado pela diferença percentual entre a massa de amostra inicial e a massa de amostra após o processo de secagem.

Esse procedimento foi realizado com a casca de coco *in natura* e com a amostra utilizada nos ensaios fluidodinâmicos, ou seja, aquela obtida após os procedimentos descritos no Tópico 3.1.1.

Teor de voláteis (T_v)

O teor de voláteis é quantificado medindo-se a fração de massa da biomassa padronizada e previamente seca que volatiliza durante o aquecimento até temperaturas de aproximadamente 850°C em um forno mufla (marca Fornitec) por sete minutos. Após a extração dos voláteis, fica como resíduo o carbono fixo e as cinzas. O teor de voláteis é então determinado pela diferença percentual entre a massa da amostra antes do experimento e a massa residual após o experimento.

Teor de cinzas (T_{cinzas})

Aproximadamente um grama de amostra de biomassa, sem umidade e voláteis, é colocado em um cadinho e levado ao interior de uma mufla de marca Fornitec. Sua temperatura é elevada para 710°C, e nessa condição, permanece por uma hora. Ao final, no interior do cadinho estarão somente as cinzas. O teor de cinzas é expresso em base seca e calculado pela razão entre a massa da amostra após o experimento e a massa de casca de coco inicial.

Carbono fixo (T_{cf})

Após a determinação dos teores de material volátil e de cinzas da amostra, o teor de carbono fixo (T_{cf}) é obtido por diferença, como apresentado na Equação 3.2.

$$T_{cf} = 100 - (T_v + T_{cinzas}) \quad (3.2)$$

em que T_v representa o teor de voláteis em base seca e T_{cinzas} o teor de cinzas.

3.1.2.3. Caracterização Química

Extrativos totais

O processo de determinação dos extrativos totais da biomassa é baseado no padrão TAPPI T204 cm-97 e realizado em três etapas: a primeira corresponde à extração com etanol e tolueno, a segunda com etanol e a terceira com água quente em banho Maria.

Na primeira etapa, os sachês de papel filtro contendo aproximadamente seis gramas de partículas de biomassa livres de umidade são alojados no extrator Soxhlet. Ao balão de vidro, é adicionada a mistura de solventes etanol e tolueno na proporção 1:1 e o conjunto balão-extrator é colocado em uma manta

aquecedora e conectado ao condensador, iniciando, assim, a primeira etapa de extração.

O processo de extração consiste na ebulição da solução, que sobe até o trocador, é condensada e cai sobre os sachês. Após atingir certo limite do sifão, o líquido desce para o balão, onde é novamente transformado em vapor. Este processo ocorre diversas vezes durante as 5 horas de extração e permite que os extrativos sejam retirados das amostras e se alojem no balão. O mesmo procedimento é realizado por mais quatro horas na segunda etapa com a solução de etanol.

Na última parte da extração, o sachê é aberto e seu conteúdo depositado em um béquer com 150 mL de água destilada. Em seguida, o béquer é levado ao banho Maria em uma temperatura de aproximadamente 98 °C por uma hora. Após esse tempo, realiza-se a filtração a vácuo com a utilização de um funil de vidro sinterizado nº 1. Utiliza-se 500 mL de água quente para lavar a amostra e por fim o funil é levado à estufa (modelo S250SD, Fabricante Biopar) por 24 horas a 105 °C. Da massa obtida após a secagem foi subtraída a massa do funil, encontrando-se, portanto, a massa das partículas livre de extrativos.

Teor de Lignina

A determinação da lignina Klason é realizada segundo a norma TAPPI T 222 om-02. Aproximadamente um grama de biomassa sem umidade e extrativos é colocado em um béquer com 15,0 mL de solução de ácido sulfúrico 72% (m/m). A amostra é mantida em temperatura ambiente e sob agitação durante 2 horas. Posteriormente, o conteúdo do béquer e 560 mL de água destilada são transferidos a um balão e o sistema colocado sob refluxo a uma temperatura de 100 °C. Após 4 horas, a lignina insolúvel é filtrada com funil de vidro sinterizado nº 4 e seca em estufa (modelo S250SD, Fabricante Biopar) a 105 °C até atingir massa constante.

O filtrado é coletado para posterior análise da lignina Klason solúvel pelo método de Goldschimid (1971), no qual se realiza uma varredura da absorbância de 280 nm a 215 nm.

Teor de holocelulose

A holocelulose é o produto resultante da extração da lignina e é constituída por celulose e hemicelulose. Esse processo de deslignificação utiliza o clorito de sódio e está baseado na reação entre a lignina e íons cloreto.

O procedimento para obtenção da holocelulose é realizado pelo método descrito por Morais et al. (2010). Em um erlenmeyer de 500 mL, são adicionados 120 mL de água destilada e cerca de 3 gramas de biomassa, sem umidade e extrativos. Em uma capela de exaustão, o erlenmeyer é colocado em banho Maria a 70 °C e a ele é adicionado 1,0 mL de ácido acético glacial e 2,5 gramas de clorito de sódio, nesta ordem, vedando o erlenmeyer para que não ocorra a perda do gás produzido na reação. O erlenmeyer é mantido em banho Maria a 70 °C e sob agitação por uma hora. Após esse tempo, são realizadas mais duas novas adições de 2,5 gramas de clorito de sódio e 1,0 mL de ácido acético, entre intervalos de uma hora.

Após as três horas de reação, a mistura é resfriada à 10 °C, filtrada em funil de vidro sinterizado nº1, e lavada com água destilada à 5 °C até que o resíduo fibroso apresente coloração esbranquiçada e o pH próximo ao da água utilizada. Verificando-se a neutralidade, é realizada uma lavagem com cerca de 50 mL de acetona ou metanol, seguida de mais um enxague com água destilada. Posteriormente, o resíduo fibroso é seco em estufa (modelo S250SD, Fabricante Biopar) a 105 °C até atingir massa constante.

Teor de celulose

O procedimento para obtenção da celulose é realizado pelo método descrito por Morais et al. (2010). Cerca de um grama da holocelulose seca é adicionado a um almofariz, juntamente com 15 mL de solução de NaOH a 17,5% (m/m). Após dois minutos de contato entre a solução e a holocelulose, o material é triturado por oito minutos. Findo esse período, 40 mL de água destilada é adicionado ao almofariz.

Posteriormente, o conteúdo é filtrado em funil de vidro sinterizado nº 1 e o precipitado recolhido é lavado com água destilada até alcançar pH neutro. O funil

é então levado para uma estufa (modelo S250SD, Fabricante Biopar) a 105 °C e seco até atingir peso constante.

3.1.3. Porosidade do leito de partículas

A porosidade do leito de partículas puras bem como das misturas de casca de coco e areia é determinada utilizando uma proveta graduada de 250 ml. Este método consiste em preencher a proveta com as partículas (ou misturas) até o volume limite (250 mL) e pela Equação 3.3 é possível determinar a porosidade (ε_{lp}).

$$\varepsilon_{lp} = 1 - \frac{V_p}{V_{mp}} \quad (3.3)$$

em que V_{mp} representa o volume do meio poroso (250 mL) e V_p o volume da amostra de partículas.

O volume das partículas é determinado a partir da massa pesada inicialmente de cada amostra e suas respectivas massas específicas. Assim, para misturas de areia e casca, o volume pode ser calculado pela Equação 3.4.

$$V_p = \frac{M_1}{\rho_{a1}} + \frac{M_2}{\rho_{a2}} \quad (3.4)$$

em que, M_1 e ρ_{a1} representam a massa e a massa específica aparente da casca de coco, e M_2 e ρ_{a2} , da areia.

3.1.4. Análise Fluidodinâmica

3.1.4.1. Unidade Experimental

Os ensaios fluidodinâmicos foram realizados em um leito de jorro cônico em escala piloto. A Figura 3.2 apresenta um esquema da unidade de leito de jorro instalada no Laboratório de Eficiência Energética I do PPGEN/UFES.

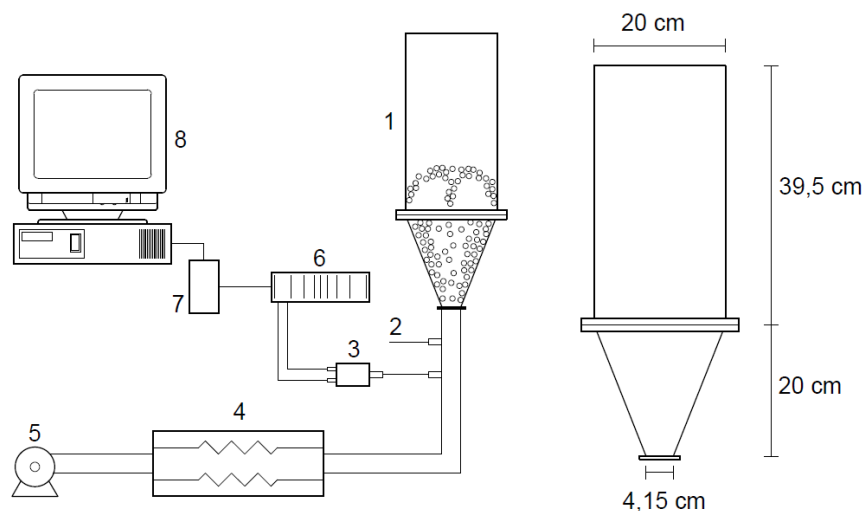


Figura 3.2 - Esquema da unidade experimental: 1) leito de jorro cônico, 2) termopar, 3) transdutor de pressão, 4) sistema de aquecimento, 5) soprador, 6) condicionador de sinais, 7) placa de aquisição de dados, 8) microcomputador.

A unidade experimental é constituída por um leito de jorro cônico-cilíndrico; soprador centrífugo de marca IBRAM com vazão de ar máxima de $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$ e potência de $2,0 \text{ cv}$; sistema de aquecimento de ar com controle PID de temperatura; e transdutor de pressão de marca Dwyer que opera em uma faixa de 0 a 20 polegadas de água e está localizado na tubulação de entrada de ar. A aquisição de dados é realizada em um computador (CORE I3, 3.30GHz, 4GB de memória RAM), acoplado a um condicionador de sinais e uma placa de aquisição de dados A/D (analógico digital) do fabricante National Instruments.

Vale ressaltar que o leito de jorro é adaptado com um sistema de guilhotinas que permite realizar amostragens da mistura em diferentes posições axiais no leito (cinco regiões), como mostra a Figura 3.3.

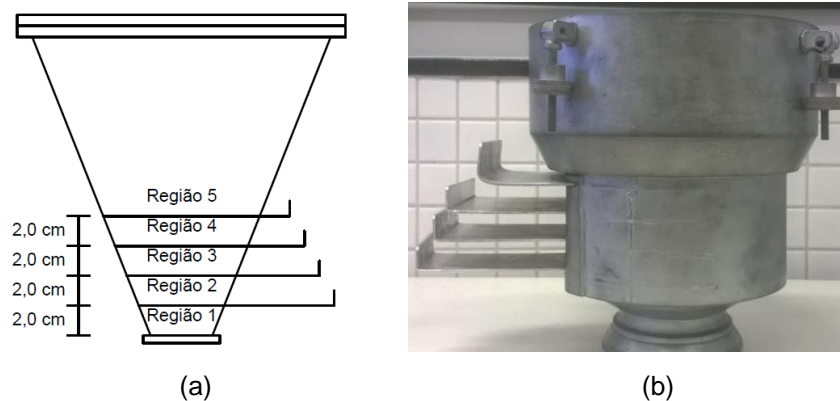


Figura 3.3 - Base cônica do leito: (a) esquema das guilhotinas; (b) equipamento.

3.1.4.2. Condição de mínimo jorro: Planejamento Experimental

Um planejamento de experimentos foi realizado com o objetivo de analisar os efeitos da composição da mistura, ou seja, fração mássica das partículas de casca de coco (X) e altura de leito estático (H) sobre a mínima velocidade de ar em que os materiais encontram-se jorrando (V_{mj}) e sua respectiva queda de pressão (ΔP_{mj}).

A Tabela 3.1 apresenta a matriz do planejamento fatorial 3^2 com dois pontos centrais, resultando em 11 experimentos. A variável X_1 representa a fração mássica das partículas de casca de coco (X) e X_2 corresponde à altura de leito estático (H). As Equações 3.5 e 3.6 representam a codificação da fração mássica da biomassa na mistura e da altura de leito estático, respectivamente.

$$X_1 = \frac{X-0,25}{0,15} \quad (3.5)$$

$$X_2 = \frac{H-8}{2} \quad (3.6)$$

Tabela 3.1 - Matriz do planejamento fatorial: condição de mínimo jorro.

Teste	X (X ₁)	H [cm] (X ₂)	X ₁	X ₂
1	0,10	6	-1	-1
2	0,10	8	-1	0
3	0,10	10	-1	1
4	0,25	6	0	-1
5	0,25	8	0	0
6	0,25	10	0	1
7	0,40	6	1	-1
8	0,40	8	1	0
9	0,40	10	1	1
10	0,25	8	0	0
11	0,25	8	0	0

As alturas de leito estático foram determinadas com base nas alturas das guilhotinas presentes na parte cônica do equipamento. Como pode ser observado na Figura 3.3, a altura da última guilhotina é 8 cm e a distância entre cada uma delas é de 2 cm. Desse modo, a máxima altura de leito estático plausível de ser trabalhada é 10 cm.

Ademais, sabe-se que as partículas de casca de coco apresentam grande dificuldade para estabelecer um regime de jorro estável devido sua baixa densidade e escoabilidade. Assim, fez-se necessário a adição de areia e a realização de testes para determinar a mistura de maior fração mássica da casca de coco capaz de operar no equipamento de forma estável.

Para as alturas trabalhadas (6, 8 e 10 cm), verificou-se que ao operar o leito de jorro com misturas de frações mássicas de casca de coco maiores que 40%, os movimentos cíclicos da mistura não eram estabelecidos. Essas misturas não possuíam areia suficiente para empurrar a biomassa, provocando a segregação das partículas. A areia, localizada em sua maioria próxima à base do leito, jorrava sozinha com baixa altura de fonte, enquanto quase toda casca de coco permanecia próxima à parede do leito, na região superior do cone. Para as demais condições trabalhadas no planejamento de experimentos, verificou-se que o jorro ocorria de forma satisfatória.

Durante os experimentos, as massas das partículas são mensuradas de acordo com a composição da mistura. As amostras de cada material são misturas e adicionadas ao recipiente cônico, até atingir a altura de leito estático do respectivo teste. Em seguida, o ar é injetado ao leito, de forma que sua velocidade seja gradativamente aumentada até um valor 20% maior que a velocidade de jorro incipiente e, em seguida, reduzida à velocidade mínima alcançada pelo equipamento.

O valor da velocidade do ar injetado ao equipamento é obtido por meio de um anemômetro, localizado acima da parte cilíndrica do leito. Com o diâmetro do anemômetro, a velocidade mensurada por ele, e conhecendo o diâmetro de entrada do leito, é possível determinar a velocidade de entrada do fluido por meio de um balanço de massa. Assim, tal velocidade é calculada de acordo com a Equação 3.7.

$$V_{in} = \frac{V_{anem} \cdot d_{anem}^2}{d_{in}^2} \quad (3.7)$$

em que V_{in} e d_{in} representa a velocidade do ar e o diâmetro na entrada do leito, respectivamente, V_{anem} , a velocidade mensurada pelo anemômetro e d_{anem} o diâmetro de abertura do anemômetro.

Para cada valor de velocidade do ar injetada no leito, 1024 pontos de sinal de pressão a uma frequência de aquisição de 1000 Hz foram endereçados ao conversor analógico digital da National Instruments. A comunicação USB permite que os dados de queda de pressão sejam processados em um microcomputador pelo programa de aquisição de dados do Labview.

A partir da realização desses experimentos e em posse dos pares de velocidade e queda de pressão do leito, as curvas características são construídas e pode-se identificar a condição de mínimo jorro, V_{mj} e ΔP_{mj} . Vale ressaltar que a velocidade de mínimo jorro é obtida pelo processo de velocidade decrescente do ar.

3.1.4.3. Estudo da segregação das misturas em leito de jorro

O fenômeno de segregação das misturas em leito de jorro pode ocorrer devido às diferenças nas propriedades das partículas, como tamanho, massa específica e características da superfície do material. Alguns fatores operacionais também podem atenuar ou aumentar este fenômeno, como a altura de leito estático e velocidade do ar utilizado durante a operação. Nesse contexto, decidiu-se analisar a segregação axial das partículas, quando o leito de jorro é operado com misturas de diferentes composições, alturas de leito estático e velocidades do ar.

Trabalhou-se com misturas composta por 10, 25 e 40 % em massa de casca de coco, alturas de leito estático de 6, 8, 10 cm e velocidades do ar 10, 20, 30 % superiores a velocidade de mínimo jorro.

Durante os experimentos de segregação, a mistura de partículas é submetida à velocidade correspondente durante 5 minutos. Em seguida, o soprador é desligado instantaneamente e as guilhotinas inseridas ao leito. As amostras contidas em cada uma das regiões mostradas na Figura 3.3 são coletadas e submetidas a um processo de peneiramento. Por fim, quantifica-se a massa de areia e biomassa nas regiões, e calcula-se a fração mássica de cada partícula nas diferentes posições axiais do leito.

Para caracterizar o nível de segregação em leito de jorro, utiliza-se o conceito de índice de mistura (I_M), análogo ao proposto por Rowe et al. (1972) para reatores de leito fluidizado. A Equação 3.8 é utilizada nos cálculos desse parâmetro.

$$I_M = \frac{X_R}{X_0} \quad (3.8)$$

em que X_R é a fração mássica da maior partícula (casca de coco) em uma dada região do leito e X_0 é a fração mássica inicial do componente. Valores do índice de segregação próximos a um indicam uma condição ideal de mistura.

3.2. Metodologia Numérica

As principais etapas para a solução do problema utilizando a técnica dinâmica dos fluidos computacional, bem como os *softwares* utilizados são apresentados na Figura 3.4.

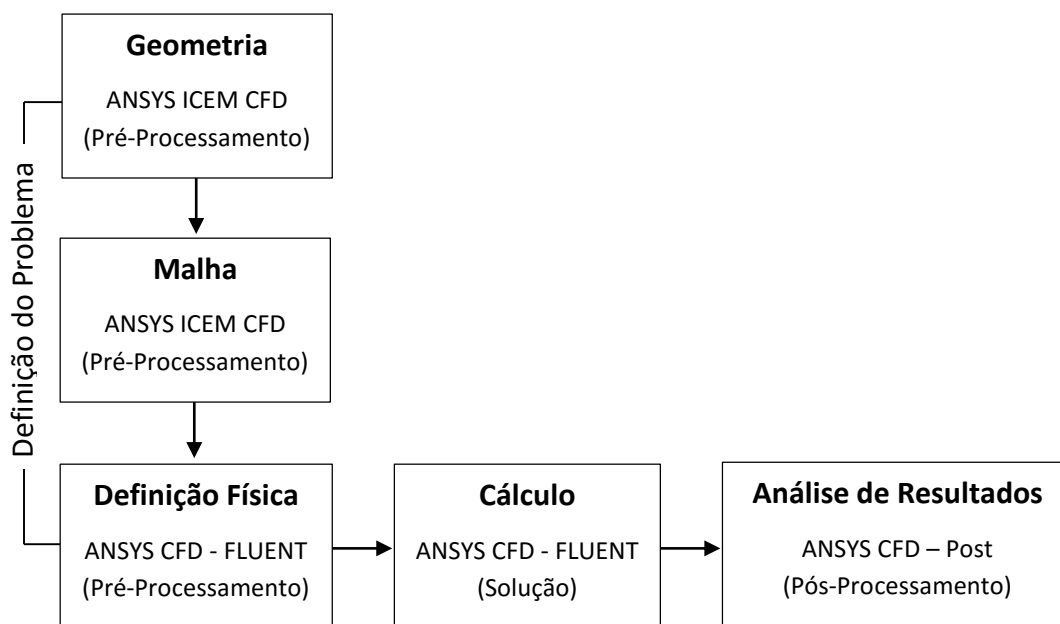


Figura 3.4 - Etapas do estudo de simulação utilizando a técnica CFD

3.2.1. Confeção da malha computacional e teste de independência de malhas

A quantidade de células contidas em uma malha pode alterar os resultados numéricos e influenciar no tempo de processamento do modelo. Dessa maneira, o teste de independência de malhas é necessário por permite determinar a partir de qual refinamento do volume de controle, as características do escoamento não sofrem alterações significativas.

Inicialmente, foi construída uma malha estruturada em duas dimensões e grosseira, com elementos quadriláteros e eixo de simetria na direção axial. O plano de simetria foi definido, a fim de diminuir a quantidade de células e conseqüentemente o esforço computacional.

Em seguida, o refinamento da malha é realizado por meio de sucessivas divisões das células, gerando ao final desse processo três malhas estruturadas com diferentes espaçamentos.

O fechamento de uma malha estruturada exige que as faces opostas tenham o mesmo número de células. Como o leito de jorro é composto por uma parte cônica, em que as faces paralelas à face de entrada possuem raio maior, o fechamento da malha gera células de tamanhos diferentes ao longo da parte cônica, sendo a região próxima à entrada a mais refinada.

Testes de independência são realizados para as três malhas geradas, utilizando o Modelo Euleriano Multifásico para três fases (ar, areia e casca de coco) e o resolvidor numérico FLUENT. Esses testes foram realizados para uma mistura contendo 25% em massa de casca de coco, altura de leito estático de 8 cm, velocidade do ar 10 % acima da velocidade de mínimo jorro e aplicando as condições de simulação descritas no tópico a seguir.

3.2.2. Parâmetros empregados nas simulações CFD e procedimento numérico

A Tabela 3.2 apresenta os principais parâmetros empregados na simulação CFD. A escolha desses parâmetros baseou-se nas características do equipamento e das partículas estudadas, bem como nos modelos apresentados no Tópico 2.5.3.1.

Tabela 3.2 - Parâmetros empregados nas simulações CFD

Item Setup	Parâmetro	Descrição/valor	
Solver	<i>Pressure-based</i> Transiente		
Modelos	Modelo Euleriano Multifásico	3 fases (ar, areia e casca de coco)	
	Modelo de Turbulência	k-epsilon padrão disperso	
Materiais	Densidade do ar	1,205 kg m ⁻³	
	Viscosidade do ar	1,82.10 ⁻⁵ kg m ⁻¹ s ⁻¹	
	Modelo de arraste gás-sólido	Gidaspow et al. (1992)	
	Modelo de arraste sólido-sólido	Syamlal (1987)	
	Viscosidade granular	Gidaspow et al. (1992)	
	Viscosidade <i>bulk</i>	Lun et al. (1984)	
	Coeficiente de difusão	Gidaspow et al. (1992)	
	Pressão de sólidos	Lun et al. (1984)	
	Distribuição radial	Lun et al. (1984)	
	Diâmetro	Areia	0,00155 m
		Casca de coco	0,00258 m
	Massa específica	Areia	2645 kg m ⁻³
		Casca de coco	479 kg m ⁻³
Condições de contorno	Entrada	<i>Inlet velocity</i> – o gás entra na direção axial com um perfil plano de velocidade	
	Saída	<i>Outlet pressure</i> – pressão atmosférica	
	Parede	Condição de não deslizamento para ambas as fases	
Condição inicial	Altura de leito estático	0,06 m; 0,08 m e 0,10 m	
	Porosidade	Definida para cada mistura de acordo com a Tabela 4.4	

O código ANSYS FLUENT 15.0 tem seu solver estruturado para resolver o problema através do método de volumes finitos, que fornece robustez e precisão aos cálculos. Neste estudo, optou-se por um critério de convergência para o resíduo médio das equações no valor de 10^{-3} , aceitável para escoamentos multifásicos. O acoplamento pressão-velocidade é resolvido através do algoritmo *Phase Couple SIMPLE* e o esquema de interpolação *First Order Upwind* foi aplicado na resolução das equações do modelo.

As simulações foram realizadas em regime transiente, por 5 segundos em tempo real e com um passo de tempo de 1×10^{-4} segundos. Geralmente, o número de Courant (N_c) é utilizada na escolha do passo de tempo, sendo esse calculado pela Equação 3.9.

$$N_c = \vec{v} \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (3.9)$$

em que \vec{v} corresponde a velocidade da fase em estudo, Δt o passo de tempo e Δx a dimensão da malha. De acordo com estudos sobre o bom comportamento dos cálculos durante a simulação, Gobin et al. (2003) propuseram o valor máximo de 0,3 para esse parâmetro adimensional. Para todas as condições de velocidade do ar trabalhadas neste trabalho e adotando-se o passo de tempo de 1×10^{-4} segundos, valores inferiores a 0,3 para N_c foram obtidos.

O software foi programado para gravar os resultados em um curto período de tempo, evitando perda dos dados em caso de falhas no equipamento ou problemas de convergência.

Para a construção de uma curva característica simulada é necessário adquirir os valores de queda de pressão correspondentes a cada velocidade do ar. Um arquivo de flutuação de pressão é gerado, em que se armazena o valor da pressão na mesma posição em que foi adquirida experimental. Como a queda de pressão oscila com o tempo, o resultado simulado apresentado é a média desses valores.

Por fim, os resultados simulados para a queda de pressão na condição de mínimo jorro foram comparados quantitativamente com os dados experimentais, calculando-se o erro relativo por meio da Equação 3.10.

$$Erro\ relativo = \frac{\Delta P_{simulado} - \Delta P_{experimental}}{\Delta P_{experimental}} \quad (3.10)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Resultados Experimentais

4.1.1. Caracterização das partículas

Os resultados obtidos na caracterização física das partículas de areia e casca de coco estão expostos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Propriedades físicas das partículas de areia e casca de coco.

Propriedade física	Areia	Casca de coco
Massa específica aparente (ρ_a) [kg/m ³]	2644,98±5,36	478,62±3,04
Massa específica real (ρ_r) [kg/m ³]	-	1539,50±1,20
Diâmetro Médio (d_p) [mm]	1,55±0,15	2,58±0,22
Esfericidade (ϕ)	0,79±0,05	0,60±0,09

De acordo com as massas específicas e diâmetros mostrados na Tabela 4.1, as partículas de casca de coco e areia utilizadas neste trabalho pertencem ao grupo D de Geldart, possuindo então, habilidade para produzir regimes de jorro quando submetidas a um fluxo de gás. Vale ressaltar que a baixa massa específica da casca de coco contribuiu na escolha de partículas de maior diâmetro, com o objetivo de melhorar a fluidodinâmica no leito.

Ademais, pode-se destacar as diferenças significativas na massa específica e diâmetro médio das partículas de casca de coco e areia. Essas diferenças podem proporcionar a segregação das misturas durante os ensaios fluidodinâmicos e esse aspecto será abordado mais a seguir neste trabalho.

Pela análise dos dados de massa específica aparente e real da casca de coco, pode-se concluir que a biomassa em estudo apresenta alta quantidade de poros, os quais estão inclusos no volume utilizado para o cálculo da massa específica aparente.

A diferença na esfericidade das partículas reflete diretamente na porosidade das misturas. As misturas com maior quantidade de casca de coco (partículas menos esféricas) apresentam elevada porosidade. Ao adicionar as partículas de areia (maior esfericidade), a porosidade do leito tende a diminuir.

Na Tabela 4.2, são apresentados os resultados da análise imediata da casca de coco.

Tabela 4.2 – Resultados da análise imediata da casca de coco.

Referência	Umidade (%)		Voláteis (%bs)	Cinzas (%bs)	Carbono fixo (%bs)
	Casca <i>in natura</i>	Casca após preparo			
Este trabalho	87,75±0,26	8,49±0,15	82,35±0,44	2,56±0,07	15,09±0,51
Cortez et al. (2009)	-	-	73,30	3,21	23,42
Vale et al. (2004)	-	-	75,12	3,80	21,08

A alta umidade da casca de coco *in natura* evidencia a necessidade de uma secagem prévia para posterior conversão termoquímica, uma vez que biomassas com alto teor de umidade resultam em um combustível com baixo poder calorífico (TUMULURU et al., 2011).

Ainda pela análise da Tabela 4.2, verifica-se um teor significativo de voláteis e baixo teor para as cinzas, similarmente aos quantificados por Cortez *et al.* (2009) e Vale et al. (2004). Tal fato sinaliza o potencial da casca de coco verde na geração de bio-óleo. De forma geral, o elevado teor de voláteis é comum para a biomassa.

A Tabela 4.3 apresenta os resultados da caracterização química da casca de coco obtidos neste trabalho e um comparativo com composições encontradas na literatura.

Tabela 4.3 – Composição química da casca de coco

Referência	Extrativos (%)	Lignina (%)	Hemicelulose (%)	Celulose (%)
Este trabalho	8,12±0,14	30,30±0,04	29,68±0,49	30,32±0,02
Khalil et al. (2006)	6,4	32,8	12,1	44,2
Leão (2012)	8,60±0,87	41,06±0,22	19,79±1,34	27,96±1,61

Pela análise da Tabela 4.3, verifica-se que os resultados encontrados são condizentes com os apresentados por outros autores. De maneira geral, pode-se observar que a casca do coco apresenta porcentagens próximas e elevadas de celulose, hemicelulose e lignina. Assim, quando essa biomassa é submetida ao processo de pirólise, uma ampla variedade de produtos pode ser gerada.

As diferenças nos resultados encontrados neste trabalho e por outros autores, tanto na análise química quanto na imediata, podem ser decorrentes de características do fruto, como sua região de cultivo e ponto de maturação.

4.1.2. Porosidade das misturas de areia e casca de coco

A Tabela 4.4 apresenta a porosidade média de misturas compostas por diferentes frações mássicas de casca de coco, bem como a fração volumétrica de cada material.

Tabela 4.4 – Dados da composição e porosidade das misturas de casca de coco e areia.

Fração mássica da casca de coco na mistura	Porosidade Média	Fração volumétrica da casca de coco	Fração volumétrica da areia
0,00	0,465±0,008	0,000±0,000	0,535±0,008
0,10	0,478±0,010	0,198±0,003	0,324±0,006
0,20	0,479±0,004	0,296±0,002	0,225±0,000
0,25	0,481±0,002	0,334±0,001	0,185±0,001
0,30	0,494±0,027	0,359±0,032	0,147±0,014
0,40	0,496±0,017	0,373±0,016	0,131±0,004
0,50	0,495±0,009	0,435±0,006	0,070±0,002
0,60	0,505±0,016	0,441±0,014	0,054±0,002
0,70	0,510±0,008	0,464±0,007	0,026±0,001
0,80	0,521±0,013	0,470±0,012	0,009±0,001
0,90	0,526±0,004	0,473±0,005	0,009±0,001
1,00	0,542±0,006	0,458±0,006	0,000±0,000

Como esperado, verificou-se um aumento da porosidade à medida que a fração mássica de casca de coco aumenta. Tal fato caracteriza o mecanismo de preenchimento, em que a adição de partículas com maior esfericidade (areia) em um leito formado por partículas de menor esfericidade (casca de coco) provoca um decréscimo da porosidade do leito.

Comportamento semelhante foi encontrado por Santos (2011b) e Bortolotti (2012) ao estudarem as misturas de areia e bagaço de cana de açúcar e soja e semente de acerola, respectivamente. Nesses trabalhos, a adição de areia e soja a uma matriz composta por partículas de biomassa fez com que a porosidade do leito diminuísse.

4.1.3. Análise Fluidodinâmica

A Figura 4.1 ilustra o leito de jorro cônico operando com uma mistura composta por 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 8 cm. Observa-se a formação de uma fonte, caracterizando o regime de jorro e a não ocorrência de segregação radial nessa mistura.



Figura 4.1 - Leito de jorro com mistura composta por 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 8 cm: (a) regime de jorro (b) leito fixo.

A Figura 4.2 apresenta a curva característica e o gráfico do desvio padrão do sinal da queda de pressão obtidos para a mistura composta por 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 8 cm.

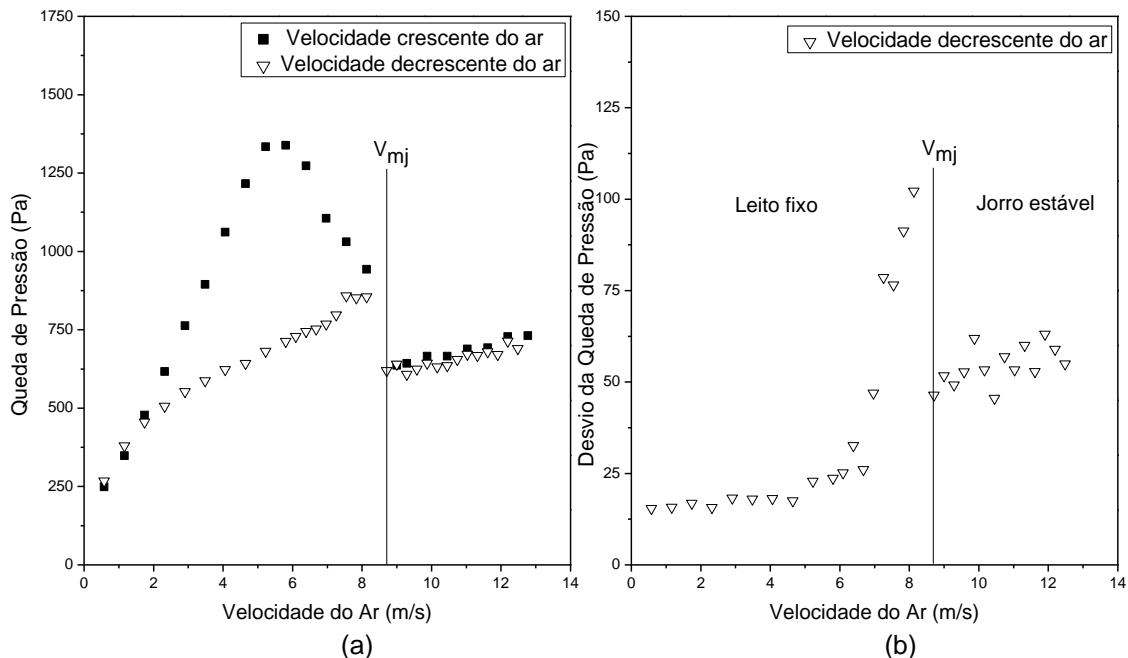


Figura 4.2 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para uma mistura com 10% em massa da casca de coco e altura de leito estático de 8 cm.

A curva característica da Figura 4.2 apresenta comportamento fluidodinâmico típico de regime de jorro. No processo de velocidade decrescente, por exemplo, pode-se constatar que a queda de pressão não se altera significativamente durante o jorro estabelecido. Quando a velocidade é reduzida abaixo do mínimo jorro, ocorre um aumento da queda de pressão. Por fim, observa-se a região de leito fixo, onde a queda de pressão diminui à medida que a velocidade do ar é reduzida. Essa etapa não ocorre de maneira totalmente linear, entretanto é característico do processo de acomodação do leito de misturas de partículas de diferentes tamanhos e massas específicas.

Com relação ao gráfico do desvio padrão da queda de pressão, nota-se um comportamento semelhante ao reportado na literatura para regime de jorro estável (BACELOS; FREIRE, 2006). No caso das medidas feitas com velocidades do ar decrescentes, observa-se que a partir do patamar correspondente ao jorro estável, os valores do desvio padrão tendem a

aumentar, mostrando que o leito passou de uma condição de jorro estabelecido, para a formação da cavidade interna, diminuindo em seguida devido ao desaparecimento gradual dessa cavidade. Assim, pode-se concluir que a transição entre os regimes de jorro estável e leito fixo é caracterizada pela mudança brusca do desvio da queda de pressão, evidenciando a maior estabilidade em manter a condição de mínimo jorro.

Para as demais condições determinadas pelo planejamento de experimento, curvas com comportamento semelhante foram obtidas, e são apresentadas no Apêndice A.

Pela curva construída para velocidades crescentes do ar, pode-se obter a queda de pressão máxima (ΔP_{max}) de cada uma das condições experimentais trabalhadas, as quais são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Queda de pressão máxima.

Queda de pressão máxima (ΔP_{max})			
Altura de leito estático (H)	Fração mássica da casca de coco (X)		
	0,10	0,25	0,40
6 cm	989,70 Pa	835,05 Pa	641,99 Pa
8 cm	1338,43 Pa	1223,82 Pa	1091,85 Pa
10 cm	1640,00 Pa	1615,14 Pa	1478,39 Pa

Pela análise da Tabela 4.5, verifica-se que ao operar o leito de jorro cônico com maiores alturas de leito estático e menores frações mássicas da casca de coco, maior será a potência do soprador necessária para se atingir o regime de jorro estabelecido.

A Figura 4.3 apresenta as curvas de queda de pressão no leito em função da velocidade decrescente do ar para as diferentes condições de composição da mistura e altura de leito estático.

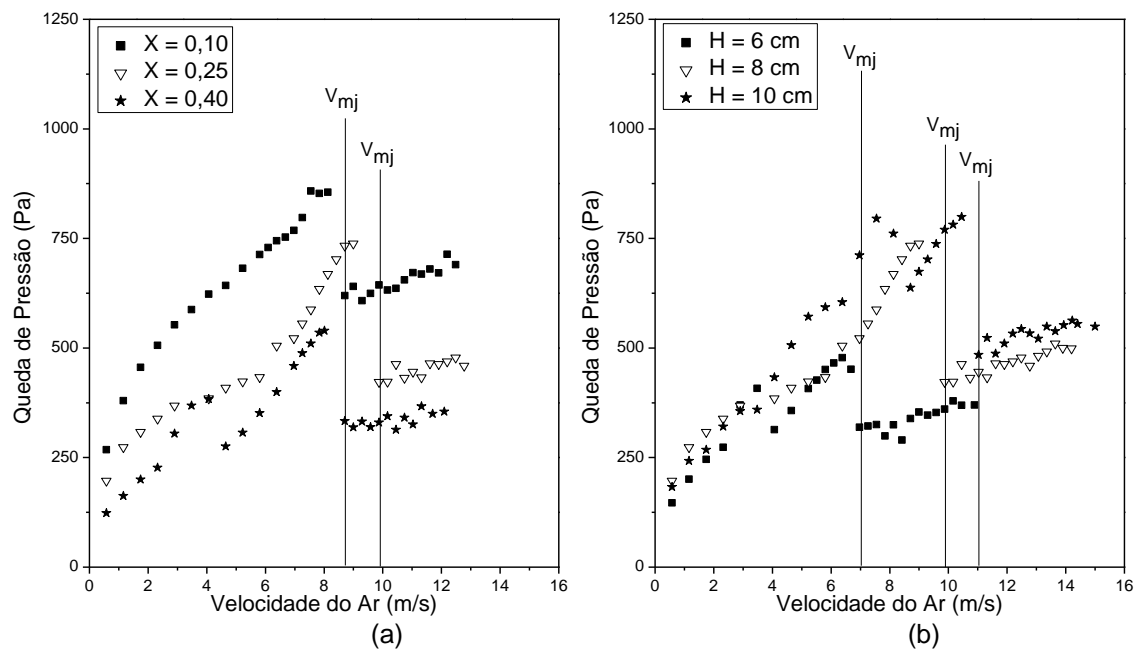


Figura 4.3 - Curvas características obtidas para a) mistura de diferentes composições e altura de leito estático igual a $H=8$ e b) uma mistura com fração mássica da casca de coco de $X=0,25$ com diferentes alturas.

Nota-se que as curvas características obtidas para cada condição trabalhada diferem quanto ao jorro mínimo. A análise estatística poderá elucidar como a velocidade do ar e queda de pressão no jorro mínimo variam em função da composição da mistura e da altura de leito estático.

4.1.4. Condições de Mínimo Jorro

A Tabela 4.6 apresenta as velocidades do ar (V_{mj} [m/s]) e quedas de pressão (ΔP_{mj} [Pa]) referentes ao jorro mínimo de cada uma das condições do planejamento experimental.

Tabela 4.6 - Planejamento fatorial 3²: condição de jorro mínimo.

Teste	X	H [cm]	X ₁	X ₂	V _{mj} [m/s]	ΔP _{mj} [Pa]
1	0,10	6	-1	-1	6,97	486,57
2	0,10	8	-1	0	8,71	619,55
3	0,10	10	-1	1	9,87	724,96
4	0,25	6	0	-1	6,97	319,04
5	0,25	8	0	0	9,58	421,43
6	0,25	10	0	1	11,03	484,39
7	0,40	6	1	-1	6,10	253,46
8	0,40	8	1	0	8,71	333,26
9	0,40	10	1	1	11,03	393,65
10	0,25	8	0	0	9,58	424,41
11	0,25	8	0	0	9,87	421,97

O erro experimental, obtido a partir dos pontos centrais, foi de 1,73 % e 0,38 % para as respostas velocidade de mínimo jorro e queda de pressão, respectivamente.

Para a análise estatística destes resultados, foram calculados os efeitos de cada variável independente (termos lineares e quadráticos), bem como das possíveis interações, nas respostas analisadas. A determinação dos parâmetros significativos do modelo de regressão é realizada por meio de um teste de hipótese utilizando a distribuição *t-student* com nível de significância de 5%. Os resultados obtidos para as variáveis respostas queda de pressão e velocidade de mínimo jorro são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Efeitos de X e H sobre as variáveis respostas.

Variável Resposta	Fator	Efeito	Desvio Padrão	t(5)	p-valor
ΔP _{mj} (R ² =0,9986)	Média	449,037	2,249	199,639	0,000
	X	-283,570	5,824	-48,685	0,000
	X ²	-58,614	4,481	-13,078	0,000
	H	181,311	5,824	31,128	0,000
	H ²	16,077	4,482	3,587	0,016
	X . H	-49,098	7,134	-6,883	0,001
V _{mj} (R ² =0,9925)	Média	8,806	0,064	138,379	0,000
	X	0,096	0,165	0,587	0,583
	X ²	0,725	0,127	5,723	0,002
	H	3,968	0,165	24,076	0,000
	H ²	0,435	0,127	3,434	0,019
	X . H	1,016	0,202	5,034	0,004

Para a resposta queda de pressão na condição de mínimo jorro, verifica-se que os termos lineares e quadráticos da fração mássica da casca de coco e altura do leito estático, bem como o termo de interação entre as variáveis são significativos para o modelo, visto que apresentaram um p-valor inferior a 0,05 (termos em vermelho).

Pela análise da Tabela 4.7, verifica-se que a queda de pressão aumenta com o acréscimo da altura do leito estático e decréscimo da fração mássica da casca de coco na mistura. Esse fato demonstra que os valores de queda de pressão estão ligados diretamente a massa total da mistura de partículas presente no leito, ou seja, são maiores para as maiores alturas de leito estático ou quando a mistura é rica em areia, que corresponde a partícula mais densa.

Com relação a velocidade de mínimo jorro, nota-se que o efeito linear da fração mássica da casca de coco não foi significativo para o intervalo de condições determinadas pelo planejamento de experimentos ($0,10 < X < 0,40$ e $6\text{cm} < H < 10\text{cm}$). Os outros termos apresentaram p-valor inferior a 0,05, mostrando-se significativos neste estudo.

O fato da fração mássica da casca de coco não apresentar efeito linear significativo sobre a velocidade de mínimo jorro decorre do efeito conflitante entre a massa total do leito de partículas e da porosidade da mistura sobre essa variável resposta. Se por um lado, o leito rico em casca de coco possui menor massa total de partículas, refletindo diretamente na diminuição da velocidade do ar necessária para o jorro, por outro sabe-se que leitos com misturas de alta porosidade, como os ricos em biomassa, necessitam de uma velocidade do ar maior para jorrar as partículas. Esse fato ocorre porque parte do ar que escoaria na região de jorro, percorre a região anular, exigindo, dessa forma, uma maior velocidade do ar para manter o regime de jorro estável.

Com relação ao efeito da altura de leito estático, nota-se que a velocidade do ar na condição de jorro mínimo aumenta com o incremento da altura de partículas no leito, como esperado.

Os modelos matemáticos (Equações 4.1 e 4.2) para predição da queda de pressão e velocidade do ar na condição de mínimo jorro somente com os termos significativos estão expostos na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Modelos matemáticos em termos das variáveis codificadas.

Equação	Validade
$\Delta P_{mj} = 449,037 - 141,785X_1 - 29,307X_1^2 + 90,656X_2 + 8,038X_2^2 - 24,549X_1X_2 \quad (4.1)$	$0,10 < X < 0,40$ $6 < H < 10$ $R^2 = 0,9986$
$V_{mj} = 8,806 + 0,363X_1^2 + 1,984X_2 + 0,218X_2^2 + 0,508X_1X_2 \quad (4.2)$	$0,10 < X < 0,40$ $6 < H < 10$ $R^2 = 0,9920$

A Figura 4.4 apresenta as superfícies de resposta para queda de pressão e velocidade do ar na condição de jorro mínimo. Sua análise confirma os comportamentos citados anteriormente.

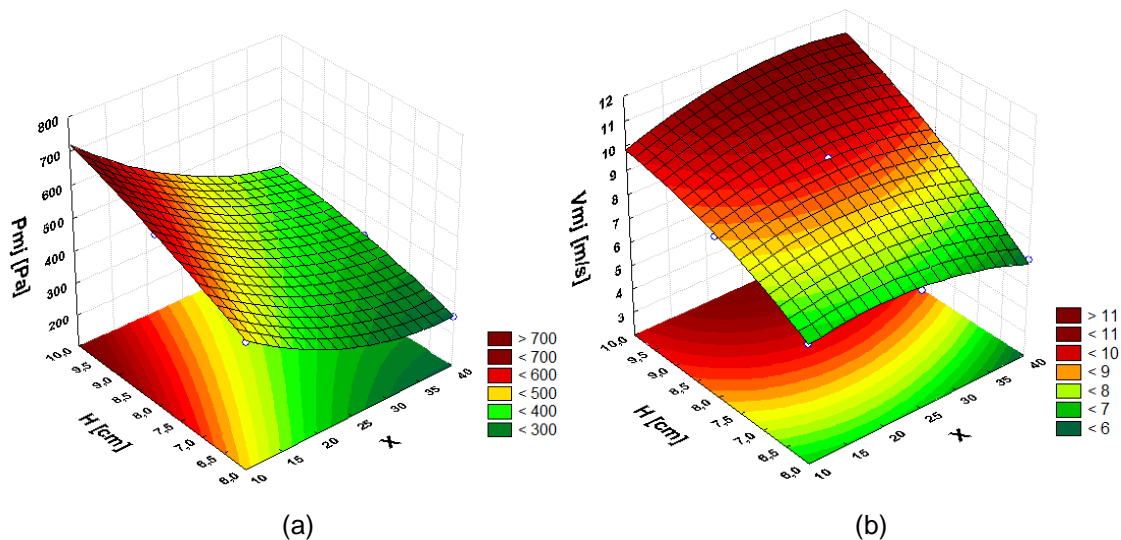


Figura 4.4 - Superfície de resposta para (a) queda de pressão e (b) velocidade do ar na condição de jorro mínimo em função da fração mássica da casca de coco na mistura e da altura do leito estático.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam a análise de resíduos destes modelos: os gráficos da probabilidade normal dos resíduos e a distribuição dos resíduos em função dos valores previstos. Pelo primeiro, confirma-se a normalidade dos

resíduos, uma vez que os pontos experimentais estão próximos da linha contínua. Pelo segundo, pode-se certificar a independência e variância constante dos resíduos, visto que os pontos estão aleatórios em torno da reta correspondente ao resíduo nulo.

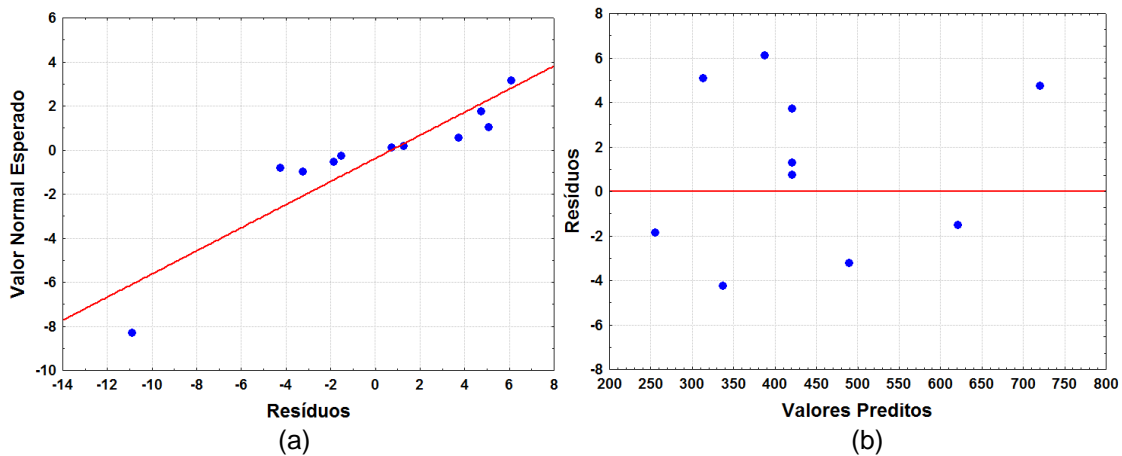


Figura 4.5 - Modelo proposto para a queda de pressão na condição de mínimo jorro: (a) gráfico da probabilidade normal dos resíduos; (b) distribuição dos resíduos.

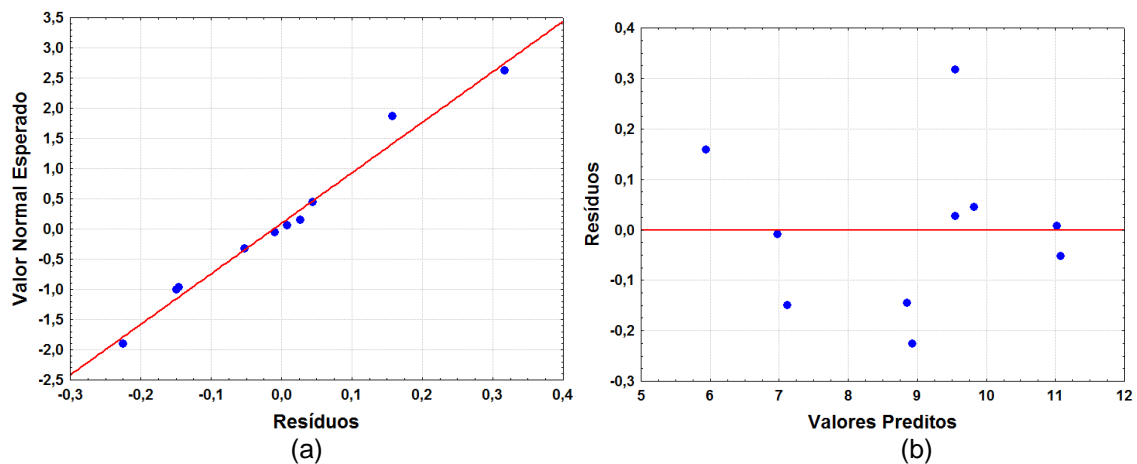


Figura 4.6 - Figura 19 – Modelo proposto para a velocidade de mínimo jorro: (a) gráfico da probabilidade normal dos resíduos; (b) distribuição dos resíduos.

4.1.5. Segregação de partículas em leito de jorro

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam uma análise comparativa entre os índices de mistura (I_M), relacionados a diferentes condições de velocidade do ar (V), altura do leito estático (H) e fração mássica da casca de coco (X).

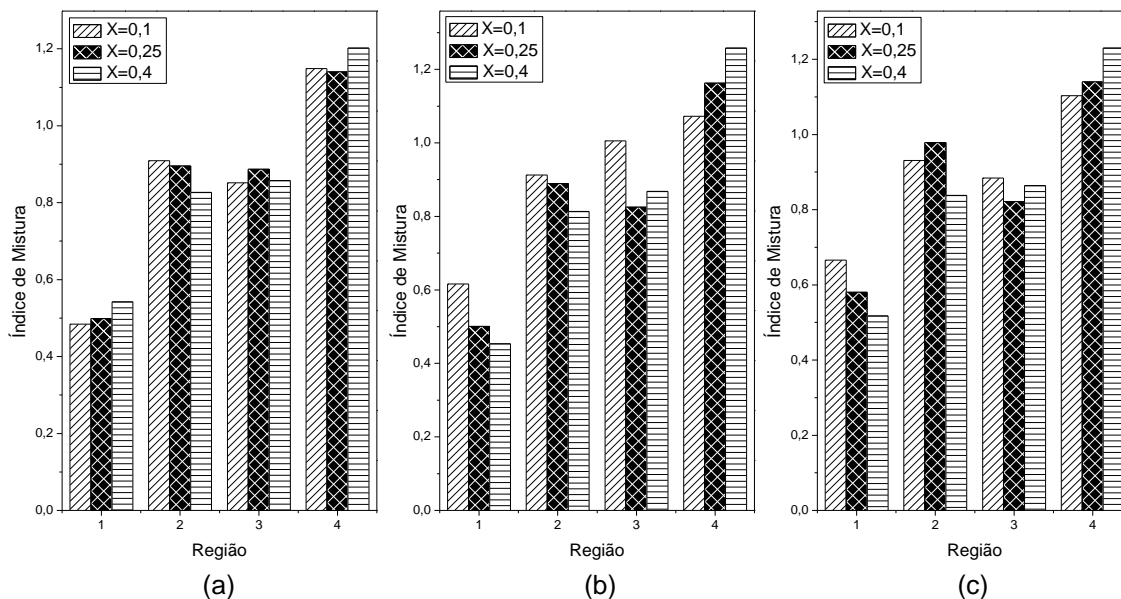


Figura 4.7 - Índice de mistura nas regiões do leito de jorro para uma altura de leito estático de 8 cm e velocidades do ar de (a) $V = 1,1 V_{mj}$; (b) $V = 1,2 V_{mj}$ e (c) $V = 1,3 V_{mj}$.

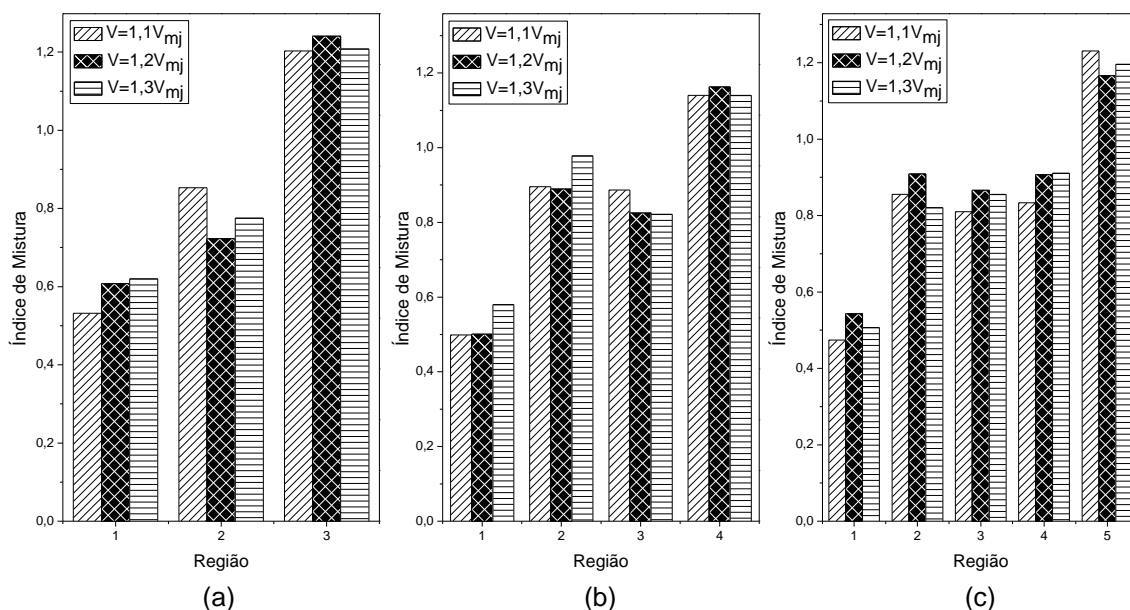


Figura 4.8 - Índice de mistura nas regiões do leito de jorro para uma mistura de fração mássica de $X = 0,25$ e altura de leito estático de (a) $H = 6\text{cm}$; (b) $H = 8\text{cm}$ e (c) $H = 10\text{cm}$.

A condição ideal é atingida quando o índice de mistura é um. Pela análise das Figuras 4.7 e 4.8, pode-se verificar que a região superior do leito (região 3 para altura de leito estático de 6cm; região 4 para altura de leito estático de 8cm e região 5 para altura de leito estático de 10cm) apresenta valores de I_M próximos a 1, independentemente da velocidade do ar, fração mássica da mistura e altura de leito estático. Por outro lado, a base do leito (região 1) corresponde ao local onde o índice de mistura se desviou mais do ideal.

Assim, pode-se concluir que a segregação das partículas ocorre para todas as condições experimentais trabalhadas, de forma que as partículas mais densas se concentram na base do equipamento, enquanto as de menor densidade permanecem na parte superior do leito. Esse fato ocorre porque as partículas mais densas, como a areia, apesar de terem a trajetória mais curta na fonte, e caírem próximas à região de jorro, elas descem até o fundo do leito. A casca de coco, no entanto, por ser um material pouco denso e fibroso, apresenta dificuldade de escoar e concentra-se na parte superior do equipamento.

O fenômeno de segregação radial não foi verificado visualmente em nenhuma das misturas estudadas. O bom nível de mistura observado pode ser explicado pela ação das forças de gravidade e arraste. Como as partículas não são esféricas, à medida que caem sobre a região anular, elas apresentam diferentes orientações, que causam uma boa distribuição das partículas sobre a superfície do leito (MARQUES, 2013).

4.2. Resultados Simulados

4.2.1. Teste de independência de malha

Uma malha grosseira, composta por 4144 elementos quadriláteros foi construída inicialmente. Em seguida, por meio de sucessivas divisões das células, outras duas malhas foram formadas e são apresentadas na Figura 4.9.

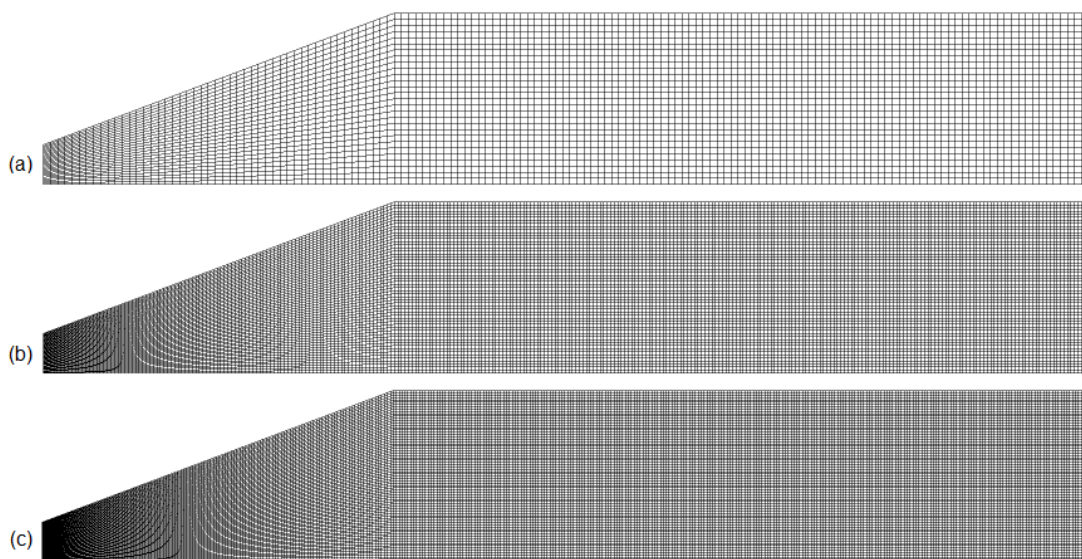


Figura 4.9 - Malha computacional: (a) malha 1 – 4144 células; (b) malha 2 – 16688 células; (c) malha 3 – 26492 células.

Os testes de malha foram realizados para uma mistura contendo 25% em massa de casca de coco, altura de leito estático de 8 cm, velocidade do ar 10 % acima da velocidade de mínimo jorro e aplicando os modelos e parâmetros de simulação descritos no Tópico 3.2.2. A Figura 4.10 mostra a comparação da velocidade do ar em função da distância axial para as três malhas testadas.

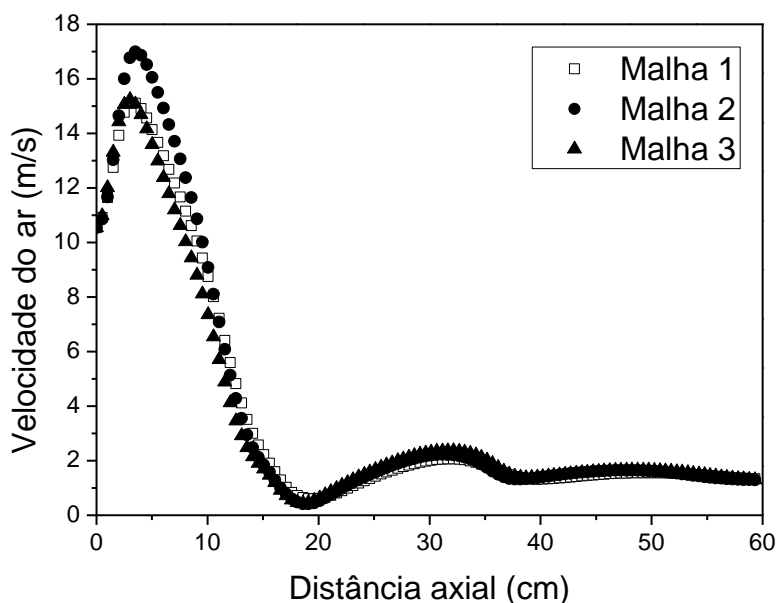


Figura 4.10 - Teste de independência da malha.

Pela análise da Figura 4.10, nota-se que valores próximos para a velocidade do ar foram obtidos com as malhas testadas. Uma vez que visivelmente não foi possível verificar uma influência significativa do refinamento da malha, optou-se por seguir a metodologia proposta por van Wachem (2000). Segundo o autor, o tamanho da malha deve ser determinado pelo refinamento até que as mudanças nas propriedades médias do sistema sejam menores que 4%. A Tabela 4.9 apresenta os resultados de queda de pressão simulada, bem como a mudança no resultado obtido por cada malha em relação à anterior.

Tabela 4.9 - Dados de queda de pressão simulados empregando diferentes malhas computacionais.

	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Nº células	4144	16688	26492
ΔP [Pa]	317,160	301,826	305,483
Erro em relação a malha anterior (%)	-	- 4,835	1,212

Diante dos dados apresentados, a malha 2 (16688 células) foi escolhida para proceder as simulações, pois apresenta uma considerável redução no tempo de simulação quando comparado à malha 3 e obtém um resultado semelhante a esta.

4.2.2. Verificação do modelo – Análise qualitativa

Os valores de queda de pressão no leito obtidos através da fluidodinâmica computacional devem ser comparados com os resultados experimentais. Mas para isso, um teste preliminar deve ser realizado para verificar se a modelagem proposta é adequada para descrever o comportamento qualitativo do leito de jorro preenchido com misturas de casca de coco e areia.

Para as mesmas condições empregadas no teste de malha, ou seja, velocidade do ar 10% superior à de jorro mínimo, altura de leito estático de 0,08 m e mistura com 25% em massa de casca de coco, os perfis da fração volumétrica dos sólidos foram obtidos e podem ser observados na Figura 4.11.

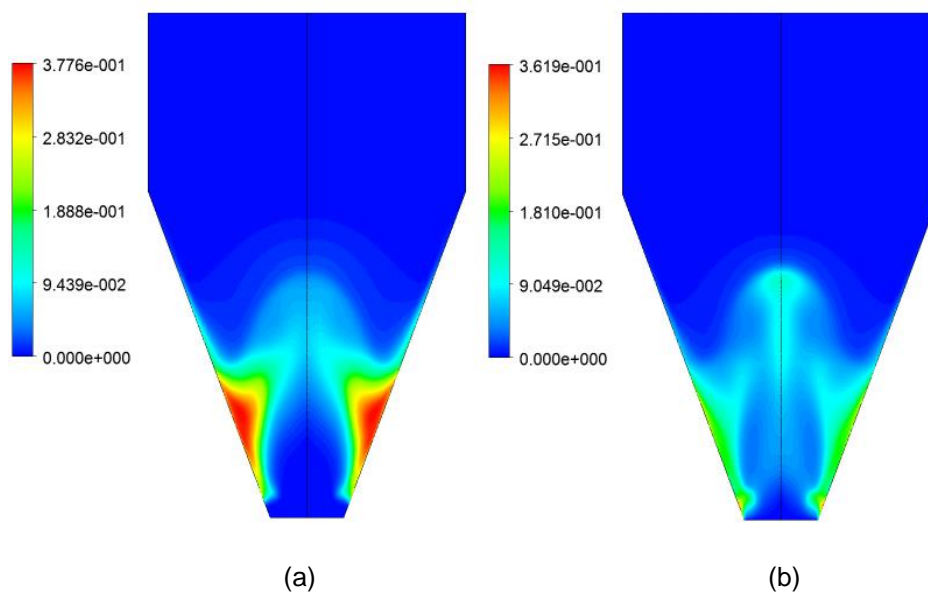


Figura 4.11 - Contornos de fração volumétrica de (a) casca de coco e (b) areia para o leito em regime de jorro.

A partir da Figura 4.11 é possível observar que o comportamento qualitativo do escoamento ar-partícula no interior do leito de jorro obtido ao adotar a modelagem proposta é semelhante ao comportamento experimental. As três regiões características do equipamento, região anular, de jorro e fonte, estão bem evidenciadas nos perfis de fração volumétrica dos sólidos.

Outro aspecto a ser destacado pelo perfil de distribuição dos sólidos é a mistura efetiva alcançada no leito de jorro, apesar da diferença significativa na massa específica das partículas (areia de 2645 kg/m^3 e casca de coco de 479 kg/m^3). Verifica-se ainda, que a fração volumétrica de areia é levemente maior nas regiões inferiores do leito, como observado nos testes de segregação deste trabalho.

A Figura 4.12 ilustra o mapa de vetores de velocidade obtidos para as partículas de casca de coco e areia em regime de jorro estabelecido. Através da orientação e intensidade dos vetores, pode-se observar que as partículas seguem uma trajetória cíclica com movimento ascendente no jorro, alcançando as maiores velocidades nessa região. Na fonte, as partículas mudam de direção e caem sobre a região anular em movimento descendente até atingirem à interface jorro-ânulo, sendo novamente lançadas verticalmente.

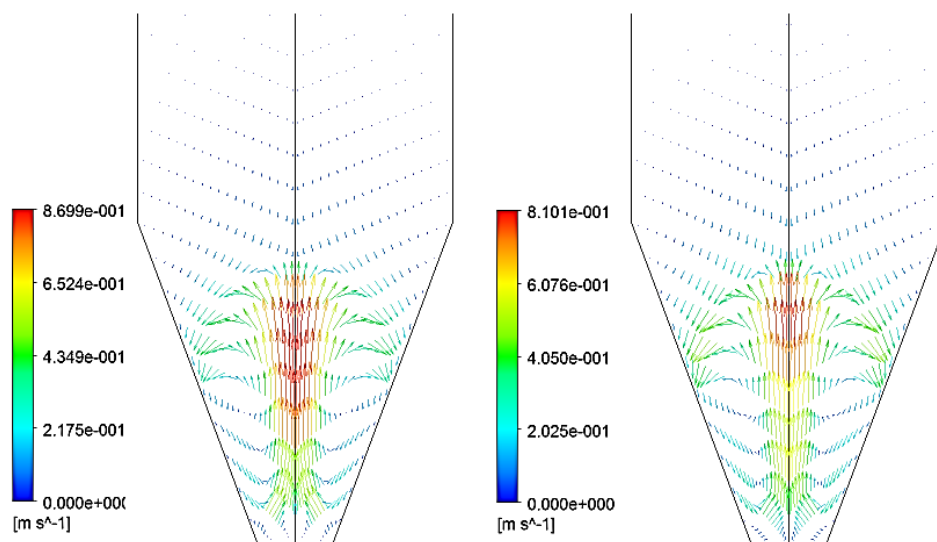


Figura 4.12 - Mapa de vetores de velocidade para partículas de (a) casca de coco e (b) areia obtidos para o regime de jorro estabelecido.

Diante do exposto, as demais simulações foram realizadas adotando-se a modelagem e o procedimento numérico propostos.

4.2.3. Comparação dos resultados simulados e experimentais

Optou-se pela construção da curva característica para uma mistura de 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 10 cm, por corresponder a condição que apresenta o melhor comportamento fluidodinâmico (elevada proporção de areia) e maior quantidade de material.

A curva característica simulada foi obtida por meio de simulações de 5 segundos em tempo real referentes a diferentes valores de velocidade do ar alimentada no leito. Gráficos de flutuação de pressão em função do tempo são obtidos para cada simulação. Um gráfico típico utilizado na determinação de um ponto simulado pode ser visualizado na Figura 4.13.

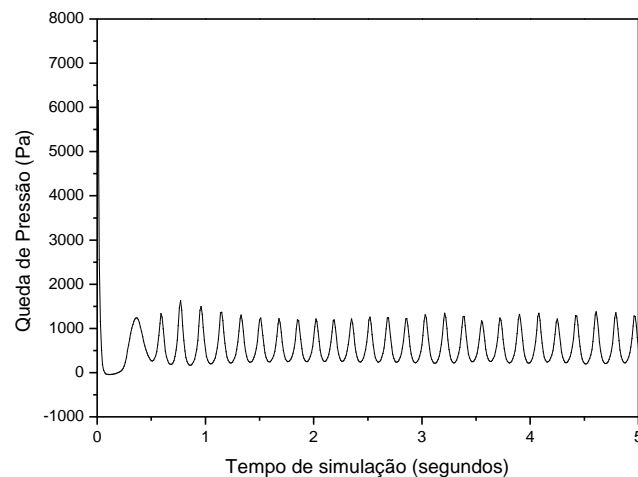


Figura 4.13 - Flutuação da pressão em um leito de jorro.

Pode-se verificar que após um segundo de simulação, as propriedades médias do sistema não se alteram significativamente. Assim, o valor da pressão adotado

como resultado de cada simulação foi calculado pela média dos últimos quatro segundos.

A Figura 4.14 apresenta a comparação da curva característica experimental e simulada obtida para a mistura de 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 10 cm. Para essa curva, foram adquiridos quatro pontos na região de jorro estável e dois pontos na região de leito fixo.

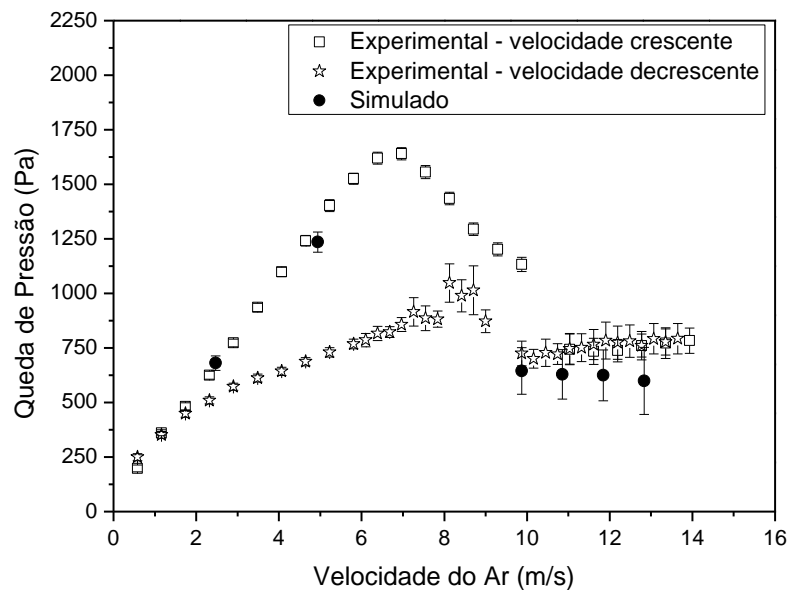


Figura 4.14 - Comparação da curva característica para uma mistura composta por 10% em massa de casca de coco e altura de leito estático de 10 cm.

Pela análise da curva característica simulada, observa-se um comportamento coerente para o escoamento no interior deste equipamento, uma vez que a queda de pressão se mantém praticamente constante na região de jorro estável. Os resultados obtidos na região de leito fixo são bem próximos aos valores de queda de pressão alcançados nos experimentos ao operar o leito com vazões crescentes do ar.

Para o regime de jorro estável, foram adquiridos os contornos de fração volumétrica da casca de coco, areia e ar, os quais estão expostos na Figura 4.15. Por meio desses perfis, pode-se observar o aumento na altura da fonte

provocado pelo incremento na velocidade do ar, comportamento também verificado experimentalmente.

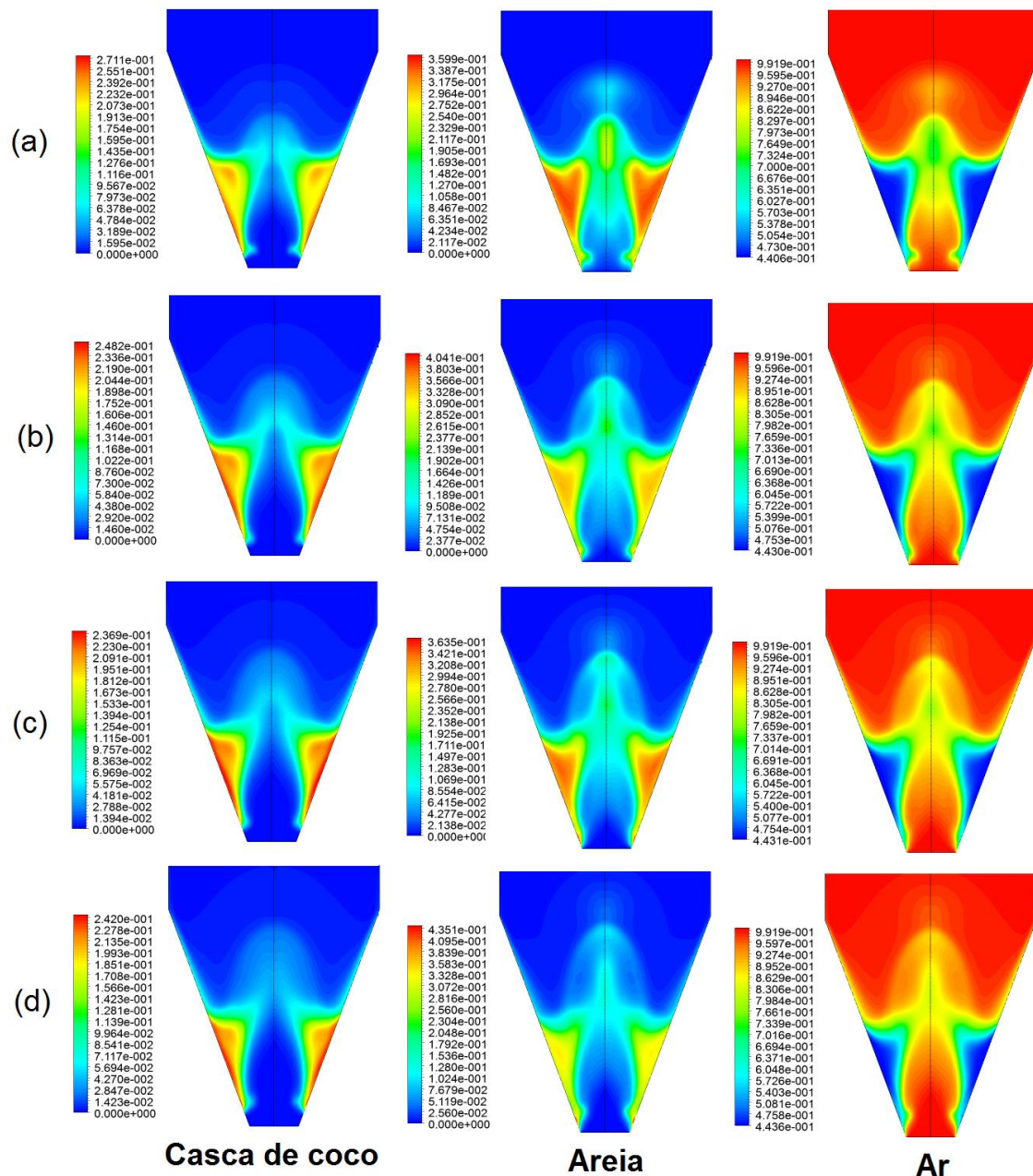


Figura 4.15 – Contorno de fração volumétrica da casca de coco, areia e ar para velocidade do ar igual (a) 9,87 m/s; (b) 10,86 m/s; (c) 11,84 m/s; (d) 12,83 m/s.

Ainda pela análise da Figura 4.14, nota-se que alguns valores simulados de quedas de pressão diferem significativamente dos experimentais. A quantificação desse desvio é apresentada na Tabela 4.10, que exhibe a

comparação entre os resultados de queda de pressão obtidos experimentalmente e por simulação para a velocidade de jorro mínimo de cada uma das condições do planejamento de experimentos.

Tabela 4.10 - Dados experimentais e simulados de ΔP_{mj} para as misturas de areia e casca de coco.

X (X₁)	H [cm] (X₂)	ΔP_{mj} experimental	ΔP_{mj} simulado	Erro relativo (%)
0,10	6	486,57	417,46	-14,20
0,10	8	619,55	523,18	-15,55
0,10	10	724,96	644,48	-11,10
0,25	6	319,04	262,03	-17,87
0,25	8	421,43	336,84	-20,07
0,25	10	484,39	411,94	-14,96
0,40	6	253,46	190,29	-24,92
0,40	8	333,26	219,09	-34,26
0,40	10	393,65	263,73	-33,00

Nota-se que os resultados simulados subestimam os experimentais em todas as condições e que os maiores erros relativos foram alcançados ao se trabalhar com mistura de maiores frações mássicas da casca de coco. Esse fato pode ser explicado pela maior instabilidade que essas misturas apresentam no regime de jorro em comparação às demais. Além disso, a baixa esfericidade dos sólidos utilizados neste trabalho e a grande diferença na massa específica das partículas de areia e casca de coco podem acabar comprometendo os resultados simulados.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões obtidas pelo estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica das misturas de casca de coco e areia.

A caracterização física da casca de coco e areia permitiu o levantamento de informações importantes para a análise do comportamento fluidodinâmico desses materiais. A diferença na massa específica e diâmetro das partículas utilizadas evidenciaram a possibilidade da ocorrência de segregação durante os ensaios fluidodinâmicos.

Os resultados obtidos na caracterização química da casca de coco se mostraram condizentes com os apresentados por outros autores e demonstraram o potencial da biomassa na produção de energia renovável a partir da pirólise, apesar da alta umidade do material *in natura*.

As partículas de casca de coco apresentam grande dificuldade para estabelecer o regime de jorro, devido sua baixa densidade e escoabilidade. Assim, fez-se necessário a adição da areia como material inerte e pela análise experimental, verificou-se que o regime de jorro estável somente é atingido em leitos de misturas com frações mássicas de casca de coco inferiores a 40%.

Por meio de um planejamento de experimentos, constatou-se que as maiores quedas de pressões são obtidas ao se operar o leito de jorro com maiores alturas de leito estático e menores frações da casca de coco. Com relação a velocidade de mínimo jorro, observou-se que o efeito linear da fração mássica da biomassa não foi significativo para o intervalo de condições determinadas pelo planejamento de experimentos. Por outro lado, maiores velocidades de ar são exigidas ao se aumentar a altura de leito estático. Esses resultados evidenciam a grande influência da massa e porosidade do leito de partículas sobre a condição de mínimo jorro. Adicionalmente, foram obtidos modelos matemáticos estatísticos para as duas respostas analisadas.

Os testes de segregação mostraram que esse fenômeno ocorreu em todas as condições trabalhadas. A região superior do leito apresenta valores de índice de mistura ligeiramente superiores a 1, independentemente da velocidade do ar, composição da mistura e altura de leito estático. Por outro lado, a base do leito corresponde à região onde o índice de mistura se desviou mais do ideal, com predominância de areia nesse local. Esse fato ocorre porque as partículas mais densas, como a areia, apesar de terem a trajetória mais curta na fonte, e caírem próximas à região de jorro, elas descem até o fundo do leito. A casca de coco, no entanto, por ser um material pouco denso e fibroso, apresenta dificuldade de escoar e concentra-se na parte superior do equipamento.

Com relação aos estudos da fluidodinâmica computacional, o modelo Euleriano Granular Multifásico mostrou-se adequado para representar qualitativamente a fluidodinâmica das partículas utilizadas nesta pesquisa, uma vez que as regiões características do leito de jorro (fonte, ânulo e jorro) foram facilmente identificadas pelos perfis de fração volumétrica das fases ar, areia e casca de coco.

Entretanto, ao se analisar os valores de queda de pressão de mínimo jorro para cada uma das condições trabalhadas, observou-se que os resultados simulados subestimam os experimentais, alcançando o valor máximo de erro relativo de -34,26%. Este fato é decorrente da maior dificuldade em simular o comportamento fluidodinâmico de partículas que apresentam alta razão de densidade e baixa esfericidade, como é o caso das misturas de areia e casca de coco.

Diante dos resultados obtidos, nota-se que esse equipamento pode ser um bom reator para a realização do processo de pirólise da biomassa em estudo, visto que regimes de jorro estáveis foram alcançados e um baixo grau de segregação entre as partículas presentes em seu interior foi verificado.

Visando a aplicação no processo de pirólise, o emprego de uma mistura como 40% em massa da casca de coco (37,3% em volume) seria inadequado, uma vez que a areia (que representaria somente 13,1% do volume) não estaria em

contato direto com toda a biomassa, reduzindo a transferência de calor e assim, a eficiência de conversão do reator.

Assim, como sugestão deste trabalho, os testes iniciais de pirólise em leito de jorro podem ser realizados com misturas compostas por 25% em massa de casca de coco, que corresponde a uma fração em volume de aproximadamente 33%. Entretanto, deve-se avaliar a eficiência da transferência de calor entre as fases sólidas (areia e casca de coco). Caso a quantidade de areia não seja suficiente para aquecer a biomassa adequadamente, misturas com menor proporção de casca de coco devem ser empregadas.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar continuidade a este trabalho, seguem algumas sugestões para futuras investigações:

- realizar ensaios de pirólise da casca de coco a fim de identificar os principais produtos obtidos na conversão termoquímica;
- avaliar a viabilidade econômica da pirólise da casca de coco e seus produtos;
- estudar o efeito da geometria do leito de jorro sobre a fluidodinâmica da mistura de partículas;
- avaliar a segregação das misturas de casca de coco e areia por meio de estudos de fluidodinâmica computacional;
- utilizar a abordagem de modelos de arraste híbridos ou combinados, a fim de identificar equações de arraste capazes de descrever adequadamente o comportamento fluidodinâmico de partículas não esféricas, melhorando assim a previsão da queda de pressão no leito;
- incorporar o comportamento térmico ao modelo a fim de analisar a influência da temperatura na fluidodinâmica do leito de jorro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO, R.; OLAZAR, M.; BARONA, A.; BILBAO, J. Char-formation kinetics in the pyrolysis of sawdust in a conical spouted bed reactor. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 75, p. 583–588, 2000.

ALMEIDA, A. R. F. **Análise da secagem de pastas em leito de jorro**, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

ALMEIDA, M. B. B. **Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gás-óleo em craqueamento catalítico**, 2008. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ALMEIDA, T. M. **Caracterização química de bio-óleo obtido da fibra de coco verde**. 2013. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial, Universidade de Tiradentes, Aracaju.

ALVAREZ, J.; LOPEZ, G.; AMUTIO, M.; BILBAO, J.; OLAZAR M. Bio-oil production from rice husk fast pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Fuel**. v. 128, p. 162-169, 2014.

AMUTIO, M.; LOPEZ, G.; ARTETXE, M.; ELORDI, G.; OLAZAR, M.; BILBÃO, J. Influence of temperatura on biomassa pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Resources, Conservation and Recycling**. v. 59, p.23-31, 2012.

ANDRADE, L. A. **Reaproveitamento do caroço de manga: um estudo de viabilidade da pirólise usando energia solar**, 2015. Dissertação (Mestrado em Energia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ANSYS FLUENT THEORY GUIDE. **Multiphase Flows**. ANSYS, Inc. 2013.

ANTAL JR., M. J.; ALLEN, S. G.; DAI, X.; SHIMIZU, B.; TAM, M. S.; GRONLI, M. Attainment of the theoretical yield of carbon from biomass. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 39, p. 4024-4031, 2000.

ARABIOURRUTIA, M.; ELORDI, G.; LOPEZ, G.; BORSELLA, E.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Characterization of the waxes obtained by the pyrolysis of polyolefin plastics in a conical spouted bed reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 94, p. 230-237, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8112: carvão vegetal - análise imediata**. Rio de Janeiro, 1986.

BACELOS, M. S. **Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanhos de partículas**, 2006. Tese (Doutorado em

Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

BACELOS, M. S.; FREIRE, J. T. Stability of spouting in conical spouted beds with inert particle mixtures. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 45, p. 808-817, 2006.

BASU, P. **Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory**. Oxford: Elsevier, 2010.

BATTISTI, R. **Proposta de uma unidade de pirólise de biomassa lipídica provenientes de microalgas para produção de biocombustíveis**. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2009.

BERNDES, G.; HOOGWJIK, M.; BROEK, R., V. The Contribution of biomass in the future global energy supply: a review of 17 studies. **Biomass and Bioenergy**. v.25, p. 1-28, 2003.

BÉTTEGA, R. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro utilizando-se CFD**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

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, p. 193-203, 2009.

BORONI, G. B; ANDRADE, T. C.; FREITAS, L. A. P. Hot melt granulation of coarse pharmaceutical powders in a spouted bed. **Powder Technology**, v. 189, p. 520–527, 2009.

BORTOLOTTI, C. T. **Estudo experimental da fluidodinâmica de uma mistura de resíduos de acerola e soja em leito de jorro**, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

BUSETTO, L.; FABBRI, D.; MAZZONI R.; SALMIA, M.; TORRI, C.; ZANOTTI, V. Application of the Shvo catalyst in homogeneous hydrogenation of biooil obtained from pyrolysis of white poplar: new mild upgrading conditions. **Fuel**. v. 90, p. 1197-1207, 2011.

CARRIER, M.; HUGO, T.; GORGENS, J.; KNOETZE H. Comparison of slow and vacuum pyrolysis of sugar cane bagasse. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v. 90, p. 18-26, 2011.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R. S.; MAKISHIMA, N. Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola. **Horticultura Brasileira**, v. 20, p. 533-535, 2002.

CIRO-VELÁSQUEZ, H. J.; CUNHA, R. L.; MENEGALLI, F. C. Drying of xanthan gum using a two-dimensional spouted fluidized bed (2DSFB) with inert particles:

performance and rheological considerations. **Drying Technology**, v. 28, p. 389–401, 2010.

CORTEZ, L. A. B.; PEREZ, J. M. M.; ROCHA, J. D.; JORDAN, R. A.; MESA, H. R. M. Processamento de casca e fibra de coco verde por carbonização para agregação de valor. **BioEng. Campinas**. v. 3, p. 21-30, 2009.

CUNHA, F. G. **Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro**, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.

DARTEVELLE, S. **Numerical and granulometric approaches to geophysical granular flows**. Tese (Doutorado em Filosofia da Geologia) - Department of Geological and Mining Engineering and Sciences, Michigan Technological University, Michigan, 2003.

DINIZ, J. **Cobertura térmica de casca de arroz à baixa temperatura: produção de bioóleo e resíduo sílico-carbonoso adsorvente**. 2005. Tese (Doutorado em Química) – Centro de Ciências Naturais e Exatas, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

DU, S.; SUN, Y.; GAMLIEL, D. P.; VALLA, J. A.; BOLLAS, G. M. Catalytic pyrolysis of miscanthus x giganteus in a spouted bed reactor. **Bioresource Technology**, v. 169, p. 188-197, 2014.

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, p. 1401-1420, 2006.

DUARTE, C. R.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. A study of the fluid dynamics of the spouted bed using CFD. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. v. 22, p. 263–270, 2005.

DUARTE, C. R. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

DUARTE, C. R.; BARROSO, M. A. S.; SANTOS, D. A.; JÚNIOR, I. P. **Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica do leito de jorro operando com mistura de partículas**. Trabalho apresentado no VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia, 2009.

DUTRA, C. H. M. C. **Dinâmica do leito de jorro não convencional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1984.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Agroenergético**. Brasília, edição nº 63, 2015.

EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. **Spouted and spout-fluid beds: fundamentals and applications**. New York: Cambridge University Press, 2011.

ERGUN, S. Fluid Flow through Packed Columns. **Chemical Engineering Progress**, v. 48(2), p. 89–94, 1952.

FERREIRA, A. D. **Utilização da levedura *Pichia stipitis* UFMG-IMH 43.2 para obtenção de etanol em hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2010.

FERREIRA, N. L. **Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo**. Dissertação (Mestrado em Química – Físico-Química) - Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

FIGUEIREDO, A. L. **Pirólise termoquímica de pós da fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Petróleo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

FOALE, M.; HARRIES, H. **Farm and forestry production and marketing profile for coconut (*Cocos nucifera*)** In: Elevitch, C.R. (ed.). Specialty Crops for Pacific Island Agroforestry. Permanent Agriculture Resources (PAR), Holualoa, Hawaii, 2009.

GIDASPOW, D. **Multiphase Flow and Fluidization**. San Diego: Academic Press, 1994

GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. **Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach**. In: Fluidization, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. p. 75–82, 1992.

GOBIN, A.; NEAU, H.; SIMONIN, O.; LLINAS, J. R.; REILING, V.; SÉLO, J. L. Fluid dynamic numerical simulation of gas phase polymerization reactor. **International Journal for numerical methods in fluids**. v. 43, p. 1199-1220, 2003.

GOLDSCHMID, O. Ultraviolet spectra. In: SARKANEN, K.V.; LUDWIG, C.H. (Eds.) **Lignins: occurrence, formation, structure and reactions**. New York: Wiley-Interscience, 1971. p.241-266.

GÓMEZ, E. O. **Estudo da pirólise rápida de capim elefante em leito fluidizado borbulhante mediante caracterização dos finos de carvão**. 2002. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

HAO, H.; GUOXIN, H.; FENGCHAO, W. Experimental study on particles mixing in an annular spouted bed. **Energy Conversion and Management**, v. 49, p. 257-266, 2008.

HE, Y. L.; LIM, C. J.; GRACE, J. R. Scale-up Studies of Spouted Beds. **Chemical Engineering Science**. v. 52, 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. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 72, p. 561-568, 1994.

HUBER, G.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. **Chemical Reviews**. v. 106, p. 4044-4098, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal: culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro, v. 40, p. 1-102, 2013.

INEE – INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Projeto carvão verde – Fazenda São Domingos**. Disponível em: <http://www.inee.org.br/biomassa_carvao.asp?Cat=biomassa>. Acesso em: 20 dez. 2015.

JI-LU, Z. Bio-oil from fast pyrolysis of rice husk: yields and related properties and improvement of the pyrolysis system. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 80, p. 30-35, 2007.

KHALIL, H. P. S. A.; ALWANI, M. S.; OMAR, A. K. Chemicam Composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of Malaysian plant waste fibers. **BioResources**. v. 1, p. 220-232, 2006.

KIMURA, L. M. **Uma contribuição à pirólise de biomassa**: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

KLAUTAU, J. V. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente para secagem de grãos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) - Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

KUTLUOGLU, E.; GRACE, J. R.; MURCHIE, K. W.; CAVANAGH, P. H. Particle segregation in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**. v. 61, p. 308-324, 1983.

LAVOYER, F. C. G. **Estudo da secagem de polpa de coco verde em leito de jorro e viabilidade de sua utilização na indústria**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Programa de Pós Graduação de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São José do Rio Preto.

LEÃO, R. M. **Tratamento superficial de fibra de coco e aplicação em materiais compósitos como reforço do polipropileno**. 2012. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

LÉDÉ, J.; BROUST, F.; NDIAYE F. T.; FERRER, M. Properties of bio-oils produced by biomass fast pyrolysis in a cyclone reactor. **Fuel**, v. 86, p. 1800–1810, 2007.

MARQUES, I. I. D. R. **Investigação do leito de jorro como reator em potencial de pirólise partículas cartonadas**. 2013. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa De Pós-Graduação Em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, 2013.

MARRETO, R. N. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**, 2006. Tese (Doutorado em Ciências Farmacêuticas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.

MARTINS, C. R.; JESUS JÚNIOR, L. A. **Produção e comercialização de coco no Brasil frente ao comércio internacional: panorama 2014**. Embrapa Tabuleiros Costeiros, Aracaju, 2014.

MATHUR, K. B; EPSTEIN, N. **Spouted beds**. New York: Academic Press, 1974. 304 p.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource Technology**. v. 83, p. 37-46, 2002.

MELO, J. L. Z. **Análise do leito de jorro como sistema de contato para pirólise de composto PEBD/AL**. 2014. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Resenha energética brasileira: exercício de 2014**. Brasília, 2015

MORAES, J. P. S.; ROSA, M. F.; MARCONCINI, J. M. **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010.

MOURA, H. L. de. **Análise do fenômeno da cavitação em válvula de controle utilizando a fluidodinâmica computacional**. Monografia (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MULLEN, C. A.; BOATENG A. A. Chemical composition of bio-oils produced by fast pyrolysis of two energy crops. **Energy & Fuel**. v. 22, p. 2104-2109, 2008.

OGAWA, S.; UMEMURA, A.; OSHIMA, N. On the Equation of Fully Fluidized Granular Materials. **J. Appl. Math. Phys**. v. 31, p. 483-493. 1980.

OLAZAR, M.; LOPEZ, G.; AGUADO, R.; ELORDI, G.; AMUTIO, M.; ARTETXE, M.; BILBAO, J. Vacuum pyrolysis of waste tires by continuously feeding into a conical spouted bed reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, p. 8990–8997, 2010a.

OLAZAR, M.; LOPEZ, G.; ARTETXE, M.; AMUTIO, M.; ELORDI, G.; AGUADO, R.; BILBÃO, J. Recycling poly-(methyl methacrylate) by pyrolysis in a conical spouted bed reactor. **Chemical Engineering and Processing**, v. 49, p. 1089 – 1094, 2010b.

PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T., MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. **Drying Technology: An International Journal**, v. 15, p. 605-624, 1997.

PÉREZ, J. M. M. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado**: critérios para sua otimização. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

PINO, G. A. H. **Biossorção de metais pesados utilizando pó da casca de coco verde (*cocos nucifera*)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.

PRADO, A. G.; MENEZES, R. S. C.; ABREU, C. A. M. **Quantificação dos extrativos, celulose e lignina da palma miúda (*Nopalea cochenillifera*)**. In: X jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2010.

RADLEIN, D. **The past and future of fast pyrolysis for the production of bio-oil**. In: Symposium on thermal and catalytic sciences for biofuels and biobased products. v. 52, p. 21-23, 2010.

RASUL, M. G.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. Physical properties of bagasse. **Fuel**. v. 78, p. 905–910, 1999.

RIBEIRO, S.; BONETTI, C. Variabilidade morfométrica de sedimentos arenosos: revisão de métodos e uso do software ImageJ na diferenciação de ambientes deposicionais na ilha de Santa Catarina e região continental, SC, Brasil. **Gravel**. v. 11, p. 37-47, 2013.

RICHARDSON, J.; BJORHEDEN, R.; HAKKILA, P.; LOWE, A. T.; SMITH, C. T. **Bioenergy from sustainable forestry: guiding principles and practice**. Forestry Sciences, 2002.

ROSA, G. S. **Recobrimento de uréia em leito de jorro para minimizar as perdas de nitrogênio por volatilização**, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

ROWE, P. N.; NIENOW, A. W.; AGBIM, A. J. The mechanism by which particles segregate in gas fluidised beds-binary systems of near-spherical particles. **Transactions of the Institution of Chemical Engineers**, v. 50, p. 310–323, 1972.

SAN JOSÉ, M. J.; OLAZAR, M.; PEÑAS, F. J.; BILBAO, J. Segregation in conical spouted beds with binary and ternary mixtures of equidensity spherical particles. **Ind. Eng. Chem. Res.** v. 33, p. 1838-1845, 1994.

SANTOS, D. A. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro – estudos experimentais e de simulação via CFD.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011a.

SANTOS, I. D. **Influência dos teores de lignina, holocelulose e extrativos na densidade básica e contração de madeira e nos rendimentos e densidade do carvão vegetal de cinco espécies lenhosas do cerrado.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2008a.

SANTOS, K. G. **Aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo,** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011b.

SANTOS, K. G. **Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008b.

SANTOS, K. G.; MURATA, V.; BARROZO, M. A. S. Estudo de fluidodinâmica computacional de um leito de jorro cônico com mistura binária de esferas de vidro. **Mecânica Computacional.** v. XXIX, p. 3359-3370, 2010.

SANTOS, M. M. **Simulação numérica do escoamento bifásico óleo-água em tubos.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

SANTOS, N. A. V. **Pirólise rápida de coprodutos do processo produtivo do biodiesel: efeito das condições de pirólise e caracterização dos produtos.** 2013. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) – Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SANTOS, R. M. **Avaliação da adição do pó da casca de coco verde, como material estruturante, na biorremediação de solo contaminado por petróleo.** 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SCHENA, T. **Pirólise da fibra de casca de coco: caracterização do bio-óleo antes e após a aplicação de dois processos de melhoramento.** 2015. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SENHORAS, E. M. **Estratégias de uma agenda para a cadeia agroindustrial do coco: transformando a ameaça dos resíduos em oportunidades eco-eficientes.** Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

SILVA, O. S. O.; SILVA, R. M. L.; VIANNA, F. M. A.; COSTA, W. M.; GUEDES, C. **Aceitabilidade de produtos para a construção civil produzidos a base de**

fibra de coco na visão de especialistas do setor: um estudo de caso para a cidade de Natal. Mestrado em Engenharia de produção, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

SILVEIRA, M. S. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em salvador – BA.** 2008. Dissertação (Mestrado em Produção Limpa) - Programa de Pós-graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SIMONIN, C.; VIOLLET, P. L. Predictions of an oxygen droplet pulverization in a compressible subsonic coflowing hydrogen flow. **Numerical Methods for Multiphase Flows.** v. 91, p. 65-82, 1990.

SYAMLAL, M., **The particle-particle drag term in a multiparticle model of fluidization,** National Technical Information Service, Springfield, VA, 1987.

TSAI, W.T.; LEE, M.K.; CHAN, Y.M. Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis,** v. 76, p. 230–237, 2006.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computacional Fluid Dynamics:** a practical approach. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2008.

TUMULURU, S. J.; SOKHANSAN, S.; WRIGHT, T. C.; BORDMAN, D.R.; YANCEY, A.N. A review on biomass classification and composition, co-firing issues and pretreatment methods. **ASABE Annual International Meeting,** 2011.

VALE, A. T.; BARROSO, R. A.; QUIRINO, W. F. Caracterização da biomassa e do carvão vegetal do coco-da-baía (*cocos nucifera L.*) para uso energético. **Biomassa & Energia,** v. 1, p. 365-370, 2004.

VAN WACHEM, B. G. M. **Derivation, implementation, and validation of computer simulation models for gas-solid fluidized beds.** Dissertação, Delf University of Technology, 2000.

VAZ, M. O. **Geração de malhas de elementos finitos triangulares em domínios planos usando o método do avanço da fronteira.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica Computacional), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2003.

WANG, X.; KERSTEN, S. R. A.; PRINS, W.; VAN SWAAIJ, W. P. M. Biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. Part 2: experimental validation of model results. **Industrial & Engineering Chemistry Research,** v. 44, p. 8786-8795, 2005.

WEN C. Y.; YU, Y. H. **Mechanics of Fluidization.** Chem. Eng. Prog. Symp. Series. v. 62, p. 100–111, 1966.

XU, J; BAO, X.; WEI, W.; SHI, G.; SHEN; S.; BI, H. T.; GRACE, J.R.; LIM, C. J. Statistical and frequency analysis of pressure fluctuations in spouted beds, **Powder Technology,** v. 140, p. 141-154, 2004.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion and Management**, v. 45, p. 651–671, 2004.

ZHANG Q.; CHANG J.; WANG T.; XU Y. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. **Energy Conversion and Management**. v. 48, p. 87-92, 2007.

APÊNDICE A

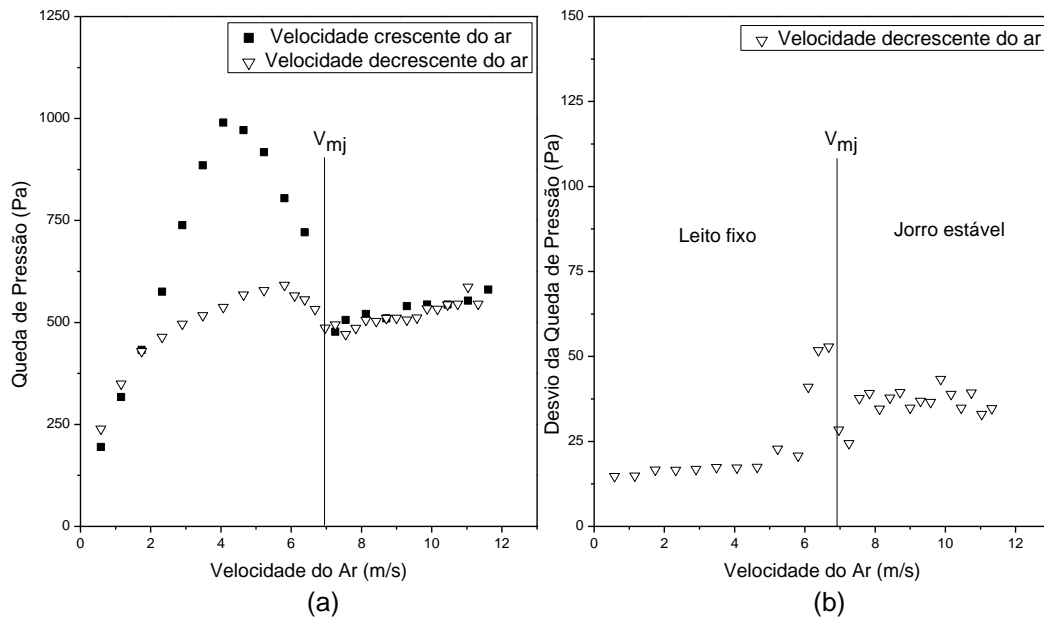


Figura A1 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,10$ e $H=6$ cm.

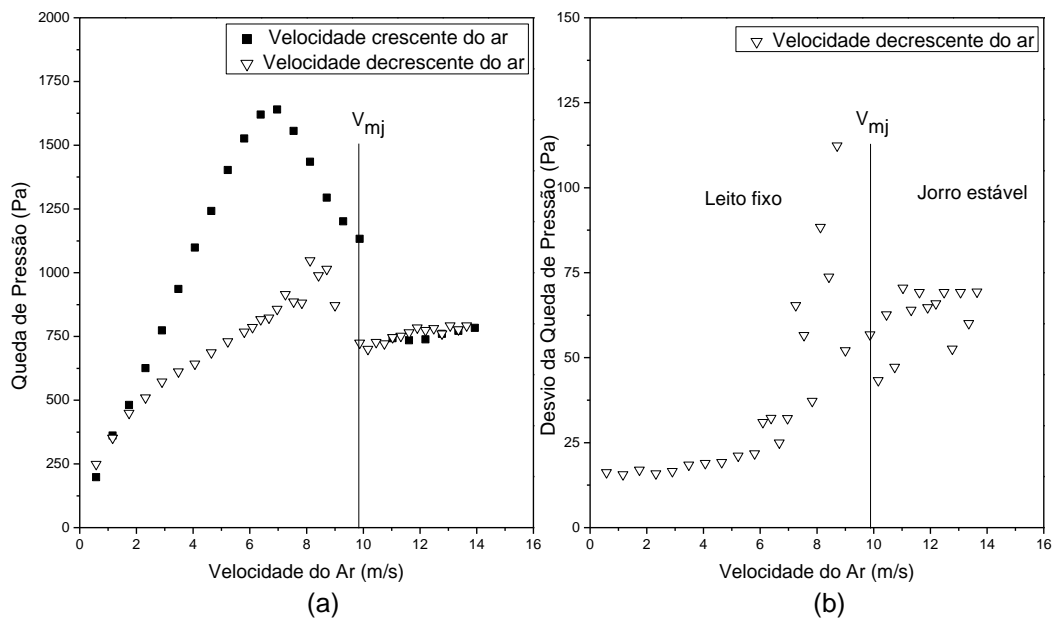


Figura A2 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,10$ e $H=10$ cm.

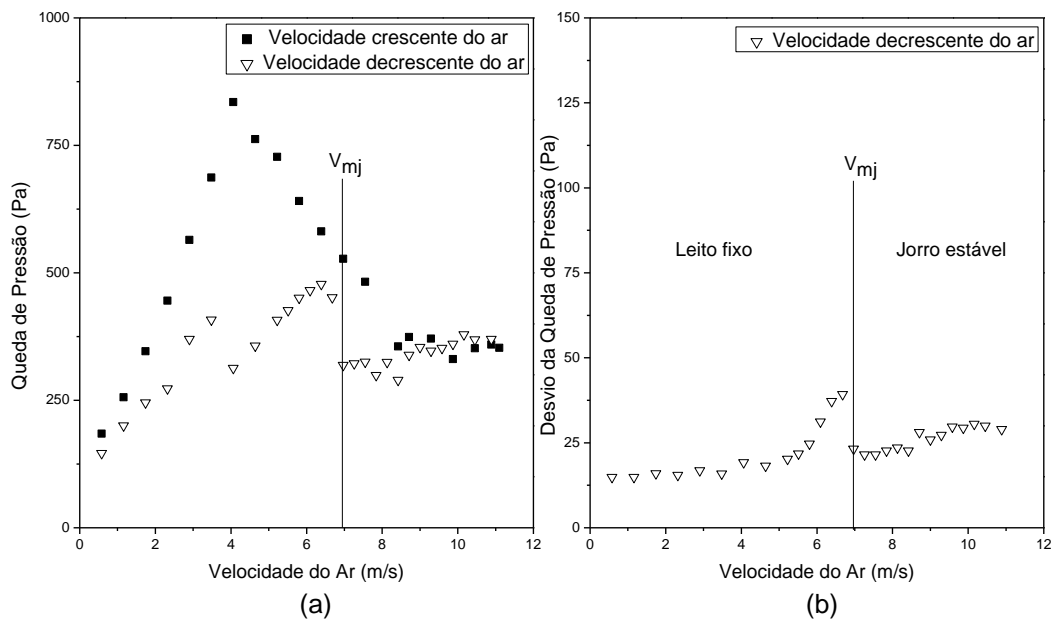


Figura A3 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,25$ e $H=6$ cm.

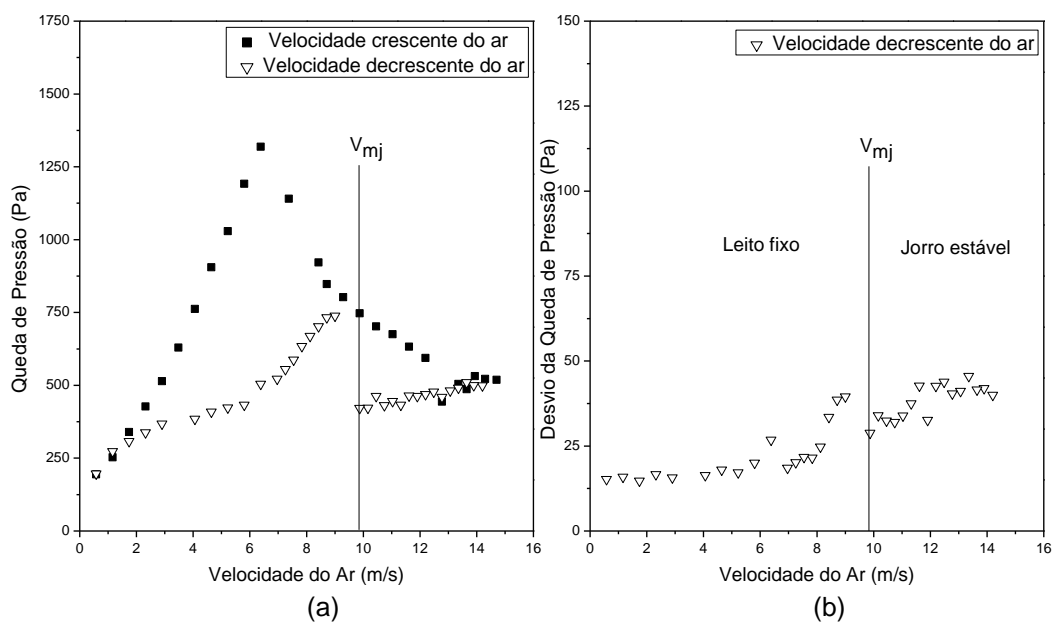


Figura A4 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,25$ e $H=8$ cm.

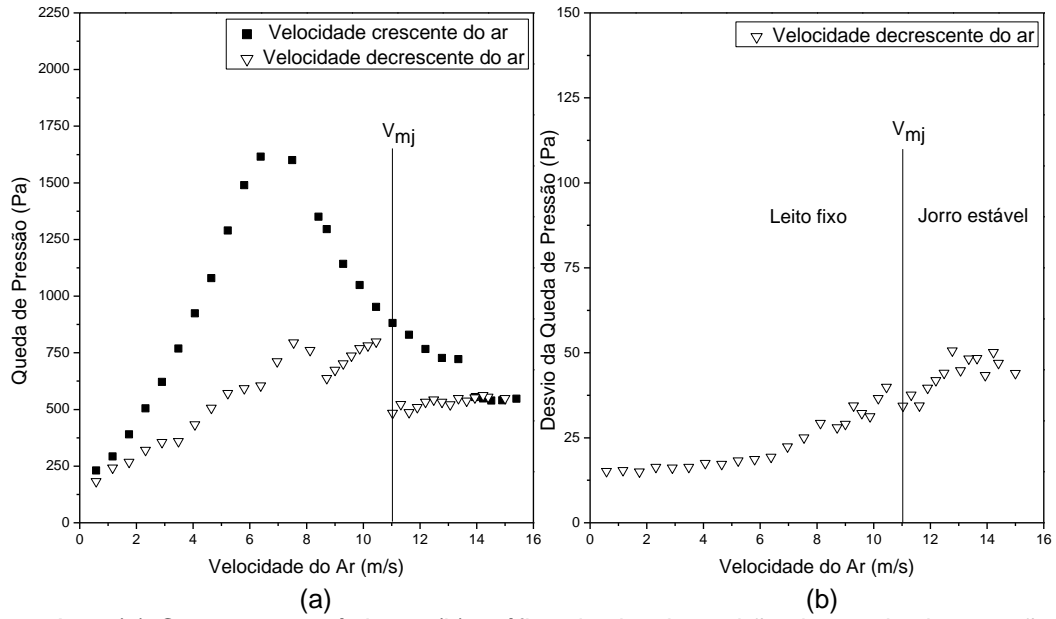


Figura A5 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,25$ e $H=10$ cm.

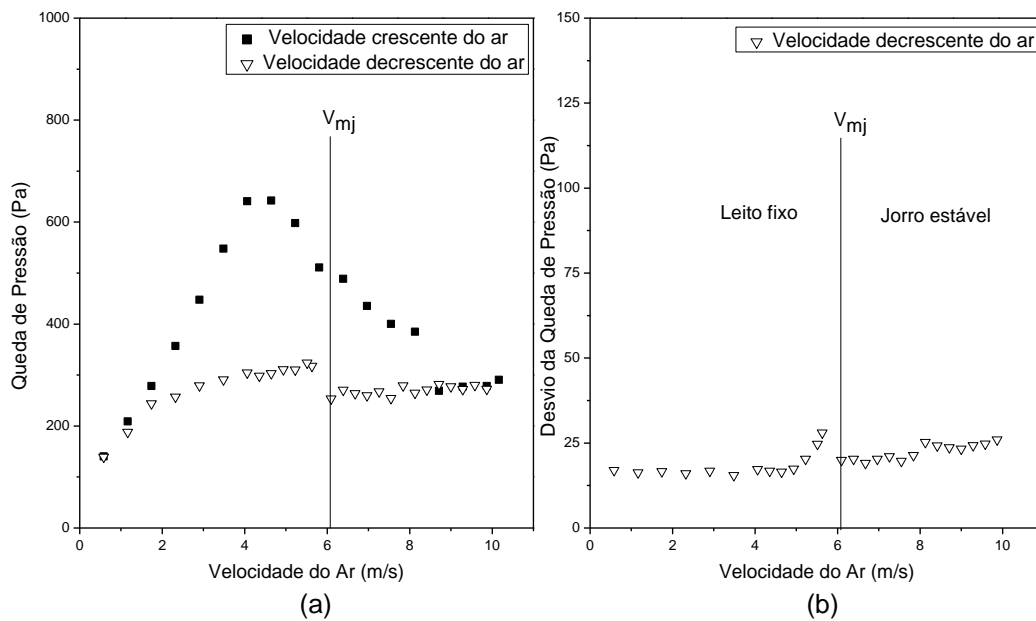


Figura A6 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,40$ e $H=6$ cm.

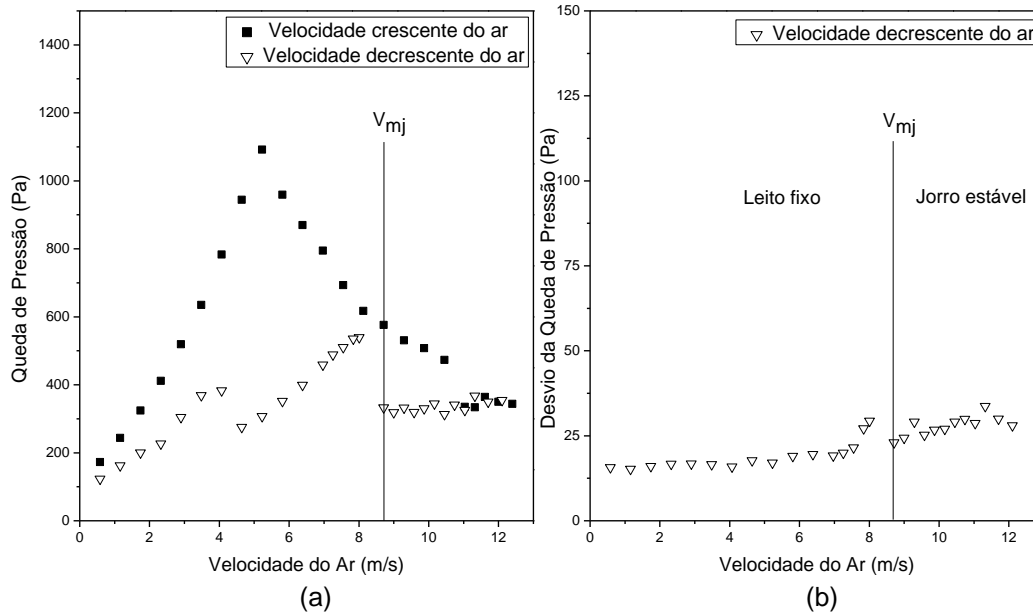


Figura A7 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,40$ e $H=8$ cm.

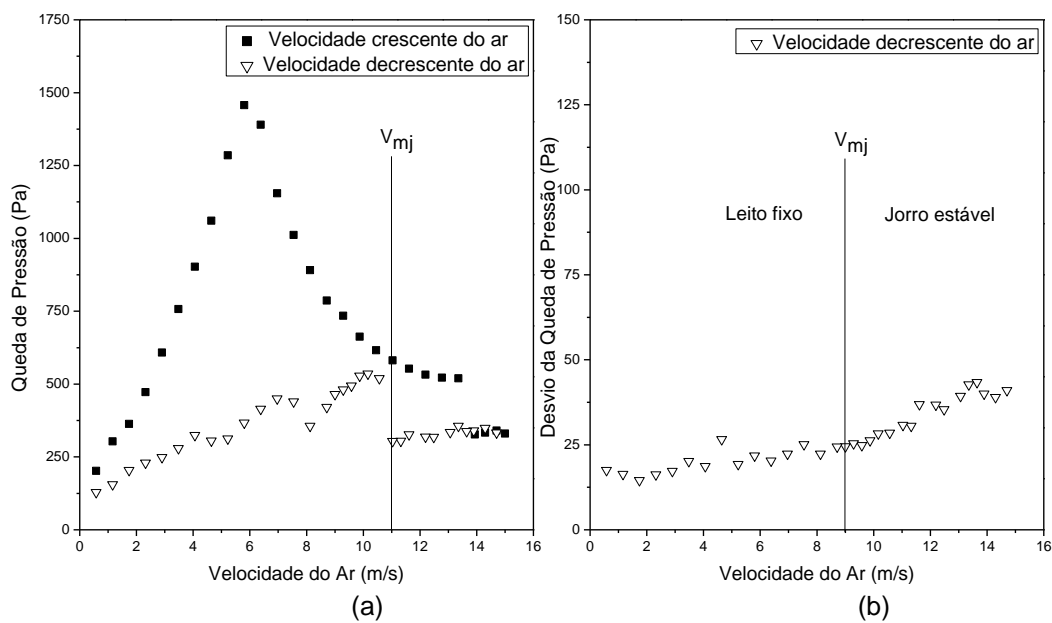


Figura A8 - (a) Curva característica e (b) gráfico do desvio padrão da queda de pressão em função da velocidade do ar para $X=0,40$ e $H=10$ cm.