

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPIRITO SANTO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

**PRISCILLA DE SOUZA ALMEIDA**

**ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA DA CASCA DE CACAU EM LEITO  
DE JORRO – ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO VIA CFD**

**SÃO MATEUS – ES**

**2016**

**PRISCILLA DE SOUZA ALMEIDA**

**ANÁLISE DA FLUIDODINÂMICA DA CASCA DE CACAU EM LEITO  
DE JORRO – ESTUDO EXPERIMENTAL E SIMULAÇÃO VIA CFD**

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

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Taisa Shimosakai de Lira.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro

**SÃO MATEUS – ES**

**2016**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por iluminar os meus passos e me abençoar durante mais essa etapa da minha vida.

Aos meus pais, Edimar e Alci, e aos meus irmãos Julio Cesar e Dorianana pelo apoio, confiança e amor incondicional. Sem a ajuda de vocês este trabalho não aconteceria.

Aos meus amigos, pela amizade e carinho, em especial a Kamilla e a Thais, pelo companheirismo e por me ajudarem durante todo este período.

A minha orientadora Taisa, pela dedicação e empenho, e por acreditar no meu potencial desde a Graduação.

Agradeço a FAPES pelo suporte financeiro.

A todos vocês, muito obrigada.

## RESUMO

A substituição de recursos não renováveis por renováveis é um dos grandes objetivos almejados mundialmente. O Brasil é um país que tem obtido sucesso nesta corrida por uma matriz energética onde as fontes alternativas são predominantes. A biomassa é uma fonte renovável promissora que ao ser utilizada com adequadas tecnologias é capaz de gerar produtos com alto potencial energético. A pirólise se destaca no cenário das tecnologias de conversão termoquímica, sendo os reatores mais indicados no processo aqueles capazes de fornecer uma excelente mistura dos componentes a serem pirolisados. O leito de jorro, por ser um equipamento que proporciona um elevado contato entre sólidos e fluido, adequa-se como um bom reator de pirólise. Sendo assim, um estudo fluidodinâmico do comportamento das partículas envolvidas neste processo é uma das etapas básicas para aplicação desta técnica. A casca do cacau é o principal resíduo do processo de beneficiamento do cacau, compondo cerca de 80% do fruto. Utilizada normalmente para produção de ração animal e fertilizantes, essa biomassa pode ser vista como uma conveniente fonte energética. O presente trabalho tem como objetivo principal estudar a fluidodinâmica de uma mistura binária composta por partículas de casca de cacau e areia em um leito de jorro. Foram avaliados parâmetros como velocidade de mínimo jorro e queda de pressão de jorro estável através de análises estatísticas para diferentes alturas de leito estático (6, 8 e 10 cm) e frações mássicas de casca de cacau (25, 50 e 75%). A segregação das misturas foi analisada nas alturas de leito e frações mássicas da casca de cacau adotadas no estudo fluidodinâmico, variando a velocidade do ar em 10, 20 e 30% acima da velocidade de mínimo jorro. O regime de jorro estável foi estabelecido na região experimental estudada. Constatou-se que a velocidade de mínimo jorro não foi influenciada por variações na fração mássica, diferentemente da queda de pressão de jorro estável que sofreu interferência tanto da fração mássica quanto da altura de leito estático. A segregação das partículas foi observada nas regiões do topo e do fundo do leito. Simulações via CFD foram realizadas empregando o modelo Euleriano para descrever o escoamento gás-sólido no leito de jorro e utilizando uma malha bidimensional estruturada. As simulações se mostraram de acordo com o observado experimentalmente com relação ao comportamento fluidodinâmico e a segregação no fundo do leito.

Palavras-chave: Biomassa. Pirólise. Segregação. Leito de jorro. Fluidodinâmica computacional.

## ABSTRACT

The replacement of non-renewable resources for renewable resources is a major desired objective worldwide. Brazil is a country that has been successful in this race for an energy matrix where alternative sources are prevalent. Biomass is a promising renewable source that if used with appropriate technology is able to generate products with high energy potential. Pyrolysis stands out in the scene of thermochemical conversion technologies, being the most suitable reactors in the process those able to provide an excellent mix of components to be pyrolyzed. The spouted bed, to be equipment which provides a high contact between solids and fluid, fits well as a pyrolysis reactor. Therefore, a fluid dynamic study of the behavior of the particles involved in this process is one of the basic steps for applying this technique. The cocoa shell residue is the main residue of cocoa process, comprising about 80% of the fruit. Normally used for animal feed production and fertilizer, this biomass can be viewed as a convenient energy source. This work has as main objective to study the fluid dynamics of a binary mixture consisting of cocoa shell particles and sand in a spouted bed. The minimum spouting velocity and stable pressure drop were evaluated through statistical analyzes for different static bed heights (6, 8 and 10 cm) and mass fractions of cocoa shell (25, 50 and 75%). The segregation of the mixtures was analyzed in the bed heights and mass fractions of cocoa shell adopted in fluid dynamic study, varying the velocity of the air at 10, 20 and 30% above the minimum spouting velocity. The stable spouted regime was established in the studied experimental region. It was found that the minimum spouting velocity was not influenced by variations in mass fraction, unlike the stable pressure drop which suffered interference as much as the mass fraction and the static bed height. The segregation of particles was observed in the regions of the top and bottom of the bed. CFD simulations were performed using the Eulerian model to describe the gas-solid flow in spouted bed and using a two-dimensional structured mesh. Simulations have shown agreement with the experimentally observed relative to the fluid-dynamic behavior and segregation in the bottom of the bed.

Keywords: Biomass. Pyrolysis. Segregation. Spouted bed. Computational fluid dynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Matriz elétrica brasileira do ano de 2014.....	15
Figura 2.1 - Fruto do cacau a) fruto recém-colhido b) estrutura do pericarpo .....	18
Figura 2.2 - Produção nacional de cacau a partir de 1990.....	20
Figura 2.3 - Produtos da pirólise dos principais componentes da biomassa. ....	25
Figura 2.4 - Leito de jorro com suas regiões características. ....	29
Figura 2.5 - Curva característica do leito de jorro.....	30
Figura 3.1 - Esquema do escoamento e condições de contorno .....	45
Figura 4.1 - Esquema do sistema utilizado nos experimentos de fluidodinâmica e segregação .....	53
Figura 4.2 - a) Leito de jorro cônico b) Base cônica do leito de jorro com guilhotinas.....	54
Figura 4.3 - Malhas computacionais a) Malha 1 com 8642 células b) Malha 2 com 16668 células c) Malha 3 com 26492 células.....	57
Figura 5.1 - Partículas de casca de cacau com diâmetro médio de 2,58 mm e de areia com 1,55mm.....	61
Figura 5.2 - Curvas características para a altura de leito estático de 8 cm a) 25% de casca de cacau b) 50% de casca de cacau c) 75% de casca de cacau. ....	62
Figura 5.3 - Curvas características para altura de leito estático de 8 cm: velocidade decrecente.....	63
Figura 5.4 - Desvios de queda de pressão em função de um adimensional de velocidade para altura de leito estático de 8 cm a) 25% de casca de cacau b) 50% de casca de cacau c) 75% de casca de cacau.....	64
Figura 5.5 - Superfície resposta para a velocidade de mínimo jorro.....	67
Figura 5.6 - Gráfico de normalidade dos resíduos para a equação da velocidade de mínimo jorro. ....	67
Figura 5.7 - Gráfico de resíduos vs valores previstos para a equação da velocidade de mínimo jorro. ....	68
Figura 5.8 - Gráfico de superfície para a queda de pressão de jorro estável. ....	70
Figura 5.9 - Gráfico de normalidade dos resíduos para a equação da queda de pressão de jorro estável. ....	70
Figura 5.10 - Gráfico de resíduos vs valores previstos para a equação da queda de pressão de jorro estável .....	71

Figura 5.11 - Índice de mistura para altura de leito estático de 8 cm a) 10% acima da $V_{mj}$ b) 20% acima da $V_{mj}$ c) 30% acima da $V_{mj}$ .....	72
Figura 5.12 - Índice de mistura para região de fundo a) 6cm b) 8cm c) 10cm. ....	73
Figura 5.13 - Perfil de velocidade do ar em função da distancia axial.....	74
Figura 5.14 - Contornos de frações volumétricas em diversas velocidades a) casca b)areia ...	75
Figura 5.15 - Vetores de velocidade a) casca de cacau b) areia .....	76
Figura 5.16 - Curva característica experimental e simulada para $X=25\%$ e $H=10$ cm .....	76
Figura 5.17 - Contorno de fração volumétrica para areia a) fração mássica de 25% de casca de cacau b)fração mássica de 75% de casca de cacau.....	78

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Produção de cacau em amêndoas (mil toneladas) .....	19
Tabela 2.2- Valores aproximados de algumas características físicas do fruto do cacau maduro e seus componentes .....	21
Tabela 2.3 - Composição de biomassas lignocelulósicas .....	22
Tabela 2.4- Rendimentos e condições operacionais de processos de pirólise .....	24
Tabela 4.1 - Planejamento de experimentos: velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão de jorro estável.....	55
Tabela 4.2 - Modelos utilizados nos testes de malha e para as simulações.....	58
Tabela 4.3- Características físicas do ar, areia e casca utilizados nas simulações .....	58
Tabela 5.1 - Resultados da análise imediata e da caracterização química da casca de cacau. .	59
Tabela 5.2 - Resultados do diâmetro médio, esfericidade e massa específica aparente da casca de cacau e da areia. ....	60
Tabela 5.3- Porosidade média de leitos de partículas constituídos por diversas frações mássicas de casca de cacau.....	61
Tabela 5.4 - Velocidades de mínimo jorro para as frações mássicas de 25, 50 e 75% nas alturas de leito estático: 6, 8 e 10 cm.....	65
Tabela 5.5 - Efeitos, desvios-padrão e p-valor dos parâmetros para o modelo de regressão de velocidade de mínimo jorro. ....	66
Tabela 5.6 - Quedas de pressão de jorro estável para as frações mássicas de 25, 50 e 75% nas alturas de leito estático: 6, 8 e 10 cm.....	68
Tabela 5.7- Efeitos, desvios-padrão e p-valor dos parâmetros estimados para o modelo de regressão de queda de pressão de jorro estável. ....	69
Tabela 5.8- Comparação das quedas de pressão simuladas com a experimental para as velocidades de mínimo jorro .....	77

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta P_{je}$  = Queda de pressão de jorro estável [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]

$\Delta P_{máx}$  = Queda de pressão máxima [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]

$C_D$  = Coeficiente de arraste

$C_{fr,sa}$  = Coeficiente de fricção entre as partículas das fases sólidas

$d_g$  = Diâmetro das gotas [ $M^0L^1T^0$ ]

$d_s, d_a$  = Diâmetro da partícula da fase sólida [ $M^0L^1T^0$ ]

$e_{ss}, e_{sa}$  = Coeficiente de restituição das partículas

$\vec{F}_{lift}$  = Força de ascensão [ $M^1L^1T^{-2}$ ]

$\vec{F}_{vm}$  = Força mássica virtual [ $M^1L^1T^{-2}$ ]

$g_{0,ss}, g_{0,as}$  = função de distribuição radial

$H$  = Altura de leito estático [ $M^0L^1T^0$ ]

$\bar{I}$  = Tensor unitário

$I_M$  = Índice de mistura

$K_{sg}$  = Coeficiente de troca de momento entre as fases

$k_{\theta_s}$  = Coeficiente de difusão de temperatura granular

$p$  = Pressão [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]

$p_s$  = Pressão de sólidos [ $M^1L^{-1}T^{-2}$ ]

$Q_{mj}$  = Velocidade de mínimo jorro [ $M^0L^1T^{-1}$ ]

$Re$  = Numero de Reynolds

$Res$  = Número de Reynolds relativo (Adota-se velocidade relativa em seu cálculo)

$v$  = Velocidade [ $M^0L^1T^{-1}$ ]

$V_L$  = Volume do leito [ $M^0L^3T^0$ ]

$V_M$  = Volume da amostra [ $M^0L^3T^0$ ]

$X$  = Fração mássica de casca [%]

### **Símbolos Gregos**

$\alpha_s, \alpha_a$  = Fração volumétrica da fase sólida

$\alpha_{s,max}$  = Limite máximo de empacotamento

$\alpha_g$  = Fração volumétrica da fase fluida

$\varepsilon$ : Porosidade

$\phi_{gs}$  = Troca de energia granular entre as fases

$\gamma_{\theta_s}$  = Energia de dissipação devido à colisão

$\lambda_s$  = viscosidade bulk dos sólidos [ $M^{-1}L^{-1}T^{-1}$ ]

$\mu_g$  = Viscosidade da fase gasosa [ $M^{-1}L^{-1}T^{-1}$ ]

$\mu_s$  = Viscosidade cisalhante dos sólidos [ $M^{-1}L^{-1}T^{-1}$ ]

$\theta_s$  = Temperatura granular

$\rho_g$  = Massa específica da fase fluida [ $M^1L^{-3}T^0$ ]

$\rho_s, \rho_a$  = Massa específica da fase sólida [ $M^1L^{-3}T^0$ ]

$\bar{\tau}_s$  = Tensor tensão de sólidos

### **Subscritos**

$g$ : Fase fluida, ar

$s$ : Fase granular, sólida

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	15
1.1. Objetivo .....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. Cacau .....	18
2.1.1. Características gerais.....	18
2.1.2. Resíduos do cacau .....	20
2.2. Biomassa.....	22
2.3. Pirólise .....	23
2.3.1. Variáveis que influenciam no processo de pirólise de biomassa .....	25
2.3.2. Reatores para pirólise rápida.....	27
2.4. Leito de jorro .....	28
2.4.1. Tipos de leito de jorro .....	32
2.5. Segregação .....	33
2.6. Fluidodinâmica computacional.....	35
2.6.1. Fluidodinâmica computacional aplicada a leito de jorro .....	35
2.6.2. Malhas computacionais .....	37
3. MODELAGEM.....	39
3.1. Equações constitutivas .....	40
3.2. Teoria Cinética Granular .....	41
3.3. Coeficiente de troca sólido-sólido .....	44
3.4. Modelo de turbulência .....	44
3.5. Modelo Euleriano aplicado ao escoamento gás-sólido no leito de jorro .....	45
3.5.1. Condições de contorno e inicial .....	47
4. METODOLOGIA .....	48
4.1. Metodologia Experimental .....	48
4.1.1. Preparação das amostras de casca de cacau .....	48
4.1.2. Análise imediata.....	48
4.1.2.1. Teor de umidade .....	48
4.1.2.2. Teor de cinzas.....	48
4.1.2.3. Teor de voláteis .....	48
4.1.2.4. Carbono fixo.....	49

4.1.3.	Caracterização química da casca de cacau .....	49
4.1.3.1.	Pectina .....	49
4.1.3.2.	Extrativos totais .....	49
4.1.3.3.	Lignina.....	50
4.1.3.4.	Holocelulose .....	50
4.1.3.5.	Alfacelulose .....	51
4.1.3.6.	Hemicelulose .....	51
4.1.4.	Caracterização física das partículas.....	52
4.1.4.1.	Diâmetro médio .....	52
4.1.4.2.	Massa específica aparente .....	52
4.1.4.3.	Massa específica real .....	52
4.1.4.4.	Esfericidade .....	53
4.1.5.	Experimentos de fluidodinâmica.....	53
4.1.5.1.	Unidade experimental.....	53
4.1.5.2.	Condições experimentais .....	54
4.1.5.3.	Procedimento experimental .....	55
4.1.6.	Porosidade .....	56
4.2.	Metodologia computacional .....	57
4.2.1.	Estudo da malha .....	57
4.2.2.	Modelos empregados nas simulações .....	58
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	59
5.1.	Resultados Experimentais.....	59
5.1.1.	Análise imediata e caracterização química da casca de cacau .....	59
5.1.2.	Caracterização física das partículas.....	60
5.1.3.	Porosidade .....	61
5.1.4.	Curva característica .....	62
5.1.5.	Velocidade de mínimo jorro e Queda de pressão de jorro estável .....	65
5.1.6.	Segregação .....	71
5.2.	Resultados simulados.....	74
5.2.1.	Teste da malha.....	74
5.2.2.	Resultados qualitativos.....	74
6.	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

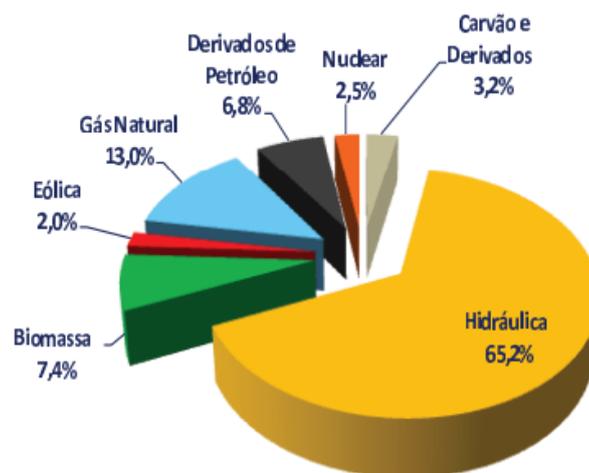
APÊNDICE A .....	89
------------------	----

## 1. INTRODUÇÃO

A biomassa é responsável por um terço da energia consumida nos países em desenvolvimento, sendo uma das fontes energéticas com maior potencial de crescimento nos próximos anos (HALL et al., 2005). Considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, é uma aliada na redução do uso de combustíveis provenientes de fontes não renováveis, sendo estes grandes responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub> e gases que provocam o efeito estufa.

Até os primeiros anos da década de 1990, o Brasil se encontrava economicamente fechado e estatizado. O setor energético brasileiro era relativamente simples, apesar da instabilidade econômica pela qual o Estado passava. Após a crise energética de 2001, muitas mudanças ocorreram neste setor, e a procura e especialização de fontes alternativas de energia cresceram no país (PIRES et al., 2006).

Diante das novas exigências do setor, o Brasil se tornou um dos países com a matriz energética mais limpa do mundo. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015, em 2014, aproximadamente 39,4% da matriz energética do Brasil foi constituída por fontes renováveis. Tal fato destaca o país no cenário mundial, cujo percentual é de 13,2%. Já no setor elétrico, em 2014, a biomassa ocupou a terceira posição em nível nacional como fonte energética mais utilizada, com 7,4% da matriz elétrica do país, como mostrado na Figura 1.1.



**Figura 1.1** - Matriz elétrica brasileira do ano de 2014.

Fonte: EPE, 2015

A imensa superfície do território brasileiro, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Ademais, o Brasil recebe intensa radiação solar ao longo de todo o ano, a fonte de energia fundamental da produção de biomassa (ANEEL, 2007), assim, vários tipos podem ser facilmente exploradas no território nacional de acordo com cada região.

A casca de cacau é uma biomassa proveniente do beneficiamento primário do cacau que, de acordo com a Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira - CEPLAC, resume-se a colheita, onde os frutos maduros são extraídos; a quebra, na qual as sementes são separadas das cascas; a fermentação, que é considerada a etapa mais importante na qual ocorre a morte do embrião da semente, e se dá o início da formação do sabor e aroma de chocolate; e por fim, a secagem.

Cerca de 80% dos frutos do cacau são compostos por cascas (Freire et al., 1990). O acúmulo deste resíduo nas lavouras acarreta o crescimento de fungos que geram doenças ao cacaueiro, e, portanto, é indesejado.

Muitas são as tecnologias de conversão da biomassa em combustível e energia elétrica. O aproveitamento desta fonte renovável pode ser através de combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte/quebra etc.), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou de processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação) (ELOY, 2013).

A pirólise é uma das técnicas mais promissoras para a conversão da biomassa em produtos energéticos, pois é possível favorecer a formação de determinados produtos alterando condições de operação. Consiste na degradação térmica do combustível sólido na ausência completa do agente oxidante ou em uma quantidade mínima para que a gaseificação não ocorra extensivamente (MESA-PÉREZ, 2004). Neste processo, gera-se carvão, gases e bio-óleo, sendo este último, atualmente, o mais desejado devido às suas propriedades e possibilidades de aplicação como substituto do óleo combustível.

Para favorecer os processos de troca de calor durante a pirólise de biomassa, a areia é inserida nos reatores como inerte. Dessa forma, reatores que possibilitam um eficiente contato entre a areia e a biomassa são os mais indicados para estes procedimentos.

O leito de jorro é um equipamento que promove uma intensa mistura das partículas em seu interior acarretando em elevados coeficientes de transferência de calor e massa, sendo assim

um reator em potencial para a pirólise. Dessa maneira, características importantes do leito de jorro e das partículas pirolisadas, como a fluidodinâmica e a segregação, devem ser estudadas a fundo para um aproveitamento eficiente do equipamento e uma eficaz geração dos produtos. Uma das técnicas amplamente aplicadas na atualidade para auxiliar processos que envolvem fluidodinâmica é a fluidodinâmica computacional (CFD). Por meio desta ferramenta é possível avaliar os fenômenos que acontecem no interior do leito. Verificar o comportamento de muitas partículas é uma tarefa complicada, além disso, utilizar equipamentos de medição do perfil fluidodinâmico no leito pode afetar o escoamento (DUARTE et. al, 2009). Assim, o emprego do CFD torna-se uma boa alternativa, desde que os resultados obtidos sejam validados com os dados experimentais.

### **1.1. Objetivo**

Diante do que foi exposto, este trabalho tem como objetivo geral estudar a fluidodinâmica da casca de cacau em leito de jorro através de experimentos e por simulação via CFD.

Como objetivos específicos, pretende-se:

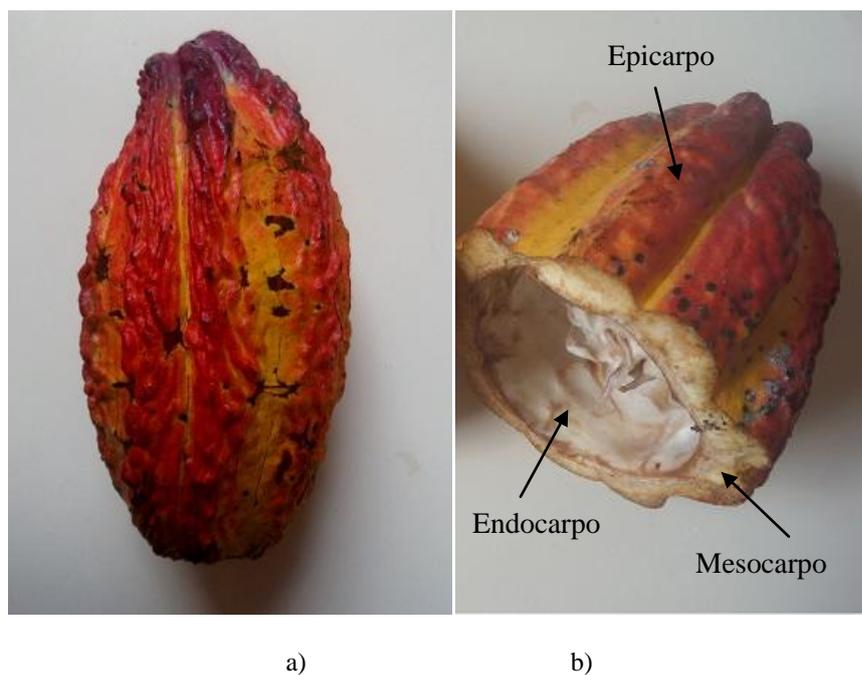
- Caracterizar as amostras de casca de cacau;
- Verificar as condições de mínimo jorro (velocidade e queda de pressão) para todas as alturas e frações utilizadas;
- Avaliar como as variáveis, altura de leito estático e fração mássica de biomassa, afetam a velocidade de mínimo jorro e queda de pressão de jorro estável;
- Investigar a influência da velocidade do ar, altura de leito estático e fração mássica de casca na segregação das partículas.
- Simular as condições operacionais empregadas no leito de jorro cônico por meio da técnica de fluidodinâmica computacional e comparar com os resultados experimentais;

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Cacau

#### 2.1.1. Características gerais

O cacauéiro é uma planta da família Sterculiaceae, gênero *Theobroma*. É uma planta que possui suas origens na América, provavelmente, as margens dos rios Amazonas e Orinoco. Seu fruto, o cacau, representado na Figura 2.1, apresenta um formato oval, de 20 a 30 cm de comprimento, possuindo uma casca rígida de cor vermelha ou amarela quando maduro. É composto de um pericarpo carnoso subdividido em três partes: o epicarpo que é carnoso e espesso, cujo extrato epidérmico exterior pode estar pigmentado, o mesocarpo, que é delgado e duro, mais ou menos lignificado, e o endocarpo, que é carnoso, mais ou menos espesso (SILVA NETO et al., 2001).



**Figura 2.1** - Fruto do cacauéiro a) fruto recém-colhido b) estrutura do pericarpo

O cacauéiro adapta-se bem em regiões com temperaturas médias superiores a 21°C. Sua colheita inicia-se a partir do 2º ano, sendo que do 2º ao 4º ano, os frutos podem ser colhidos praticamente durante o ano todo (CEPLAC, 2015). A colheita do cacau é feita entre os meses de novembro e fevereiro, safra principal, e de abril a agosto, conhecida como safra temporã. O

cacaueiro é uma planta que possui um longo período de vida útil, podendo alcançar 100 anos, entretanto, seu ciclo ideal não ultrapassa 40 anos (CONAB, 2013).

Por se tratar de uma planta que necessita ser cultivada com um sombreamento permanente de árvores de maior porte, o cacaueiro agrega a sua importância econômica uma importância ambiental. Graças a essa característica, a árvore protege o solo dos efeitos da erosão e da lixiviação. Além disso, restitui à terra grande parte daquilo que dela retira, mantém o equilíbrio ecológico e se constitui num cultivo perene, renovável e permanente (CEPLAC, 2003).

Segundo a Organização Internacional de Cacau, na safra de 2012/2013, o Brasil ocupou a sétima posição na produção mundial de cacau em amêndoas, sendo responsável por 4,7% da produção, ficando atrás de países como Costa do Marfim, Gana, Indonésia, Nigéria, Camarões e Equador, como apresentado na Tabela 2.1. A participação do Brasil na produção mundial de cacau já foi de 12,07% antes do primeiro foco da “vassoura-de-bruxa” (praga que destruiu plantações inteiras).

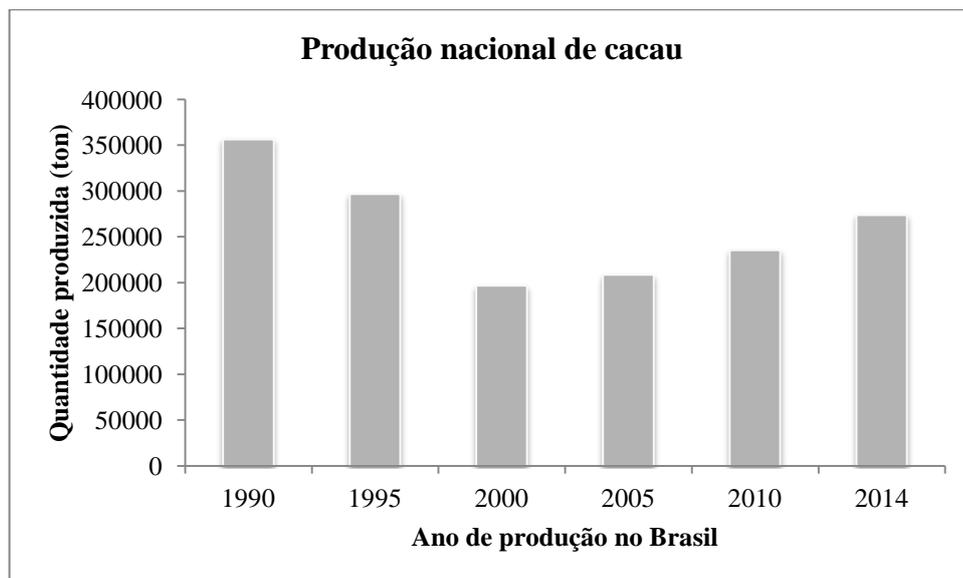
**Tabela 2.1-** Produção de cacau em amêndoas (mil toneladas)

	2012/13	Estimativa 2013/14	Previsão 2014/15
<b>África</b>	<b>2836</b>	<b>3197</b>	<b>2984</b>
Camarões	225	211	220
Costa do Marfim	1449	1746	1740
Gana	835	897	696
Nigéria	238	248	235
Outros	89	95	93
<b>América</b>	<b>622</b>	<b>708</b>	<b>729</b>
Brasil	185	228	215
Equador	192	220	250
Outros	246	260	264
<b>Ásia e Oceania</b>	<b>487</b>	<b>454</b>	<b>455</b>
Indonésia	410	375	370
Papua Nova Guiné	41	40	42
Outros	36	38	43
<b>Total do Mundo</b>	<b>3945</b>	<b>4359</b>	<b>4168</b>

Fonte: ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, 2015.

Da década de 70 até a década de 90, houve um aumento na produção nacional de cacau. Isso se deve ao plano PROCACAU - Plano de Diretrizes para a Expansão da Cacaucultura Nacional, que previa a implantação de 300 mil hectares de novos cacauzeiros e a renovação de outros 150 mil hectares em plantações decadentes e de baixa produtividade da Bahia e Espírito Santo (GONZALEZ et al., 2013). Na Figura 2.2 é possível verificar que a partir da década de 90, ocorreu um declínio na produção, sendo este muito associado à disseminação da vassoura-de-bruxa, principalmente na região Sul da Bahia, e ao aumento da produção internacional, o que causou a redução dos ganhos com a lavoura cacauzeira. A produção brasileira nos últimos anos vem apresentando uma recuperação, devido à utilização de novos clones produtivos, resistentes a “vassoura de bruxa”, distribuídos pela CEPLAC (PEREIRA, 2013).

No Brasil, o estado da Bahia é o maior produtor de cacau, com aproximadamente 65% da produção nacional. O Espírito Santo ocupa a 4ª posição, com uma participação de aproximadamente 2%.



**Figura 2.2** - Produção nacional de cacau a partir de 1990

Fonte: IBGE.

### 2.1.2. Resíduos do cacau

Do processo de beneficiamento do cacau, muitos resíduos são gerados, sendo apenas 8% do peso do fruto utilizado nas indústrias moageiras e encaminhados para fabricação de massa de

cacau e derivados, manteiga de cacau, entre outros. Estima-se que um hectare gera, anualmente em média, cerca de 6 toneladas de casca fresca (SILVA NETO et al., 2001). A Tabela 2.2 apresenta a fração mássica correspondente de cada parte do fruto. Como pode ser constatado, a casca compõe 80 % do cacau.

**Tabela 2.2-** Valores aproximados de algumas características físicas do fruto do cacau maduro e seus componentes

<b>Fruto e componentes</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>% em relação ao peso do fruto</b>
Fruto	0,5000	100,0
Casca	0,4000	80,0
Semente	0,1000	20,0

Fonte: Freire et al., 1990.

A casca, portanto, é o principal resíduo da cacauicultura, e acaba se tornando por muitas vezes um problema para a produção. O acúmulo deste resíduo na plantação facilita a proliferação de fungos, resultando no desenvolvimento de doenças no cacau, como a podridão-parda e a vassoura de bruxa. Segundo a CEPLAC, a podridão-parda é responsável por perdas em cerca de 30% da produção, enquanto a vassoura de bruxa, de acordo com o Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural - INCAPER, pode causar redução na produção de até 90%. Além disso, a liberação de um excesso de potássio da casca para o solo desequilibra a nutrição da planta.

Em sua maioria, as cascas do fruto são utilizadas na produção de ração para animais e como adubo para a própria lavoura. Muitos estudos estão sendo realizados a respeito das possibilidades de aproveitamento da casca do cacau. Dentre eles podem-se destacar o estudo da casca de cacau como combustível (PEREIRA, 2013); na alimentação animal (POUOMOGNE, 1997; SMITH, 2011); como fertilizantes (CHEPOTE, 2003; SODRÉ, 2012;) e na extração de pectina (ADOMAKO, 1972; MOLLEA et al., 2008; VRIESMANN, 2011).

Na literatura, valores entre 2500 a 4280 kcal/kg foram encontrados para o poder calorífico da casca de cacau (VOIGT, 2014; DUKU, 2014).

## 2.2. Biomassa

Biomassa pode ser definida como toda matéria orgânica, seja de origem animal, vegetal ou microrganismos, passível de ser transformada em energia. Cada biomassa possui o seu próprio potencial energético, sendo que seus derivados dependem deste potencial e da tecnologia adotada para a conversão em energia.

A biomassa lignocelulósica é uma mistura complexa de polímeros naturais de carboidratos conhecidos como celulose, hemicelulose e lignina, localizados na parede celular das plantas (MESA-PEREZ, 2004). Os produtos formados pela pirólise estão diretamente ligados às proporções destes componentes na biomassa.

Como mencionado por Gómez (2002), fatores como tipo de planta, idade e seus tecidos, interferem na quantidade de celulose, hemicelulose e lignina nos diferentes tipos de materiais lignocelulósicos, deparando-se com valores variáveis na literatura. De forma geral, as seguintes proporções podem ser encontradas: 40 a 60% de celulose, 15 a 50% de hemicelulose e 10 a 30% de lignina. Na Tabela 2.3, estão exemplificadas algumas biomassas com suas respectivas composições.

**Tabela 2.3** - Composição de biomassas lignocelulósicas

<b>Biomassa</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>lignocelulósica</b>	<b>Celulose</b>	<b>Hemicelulose</b>	<b>Lignina</b>
Palha de cana	40-44	30-32	22-25
Bagaço de cana	32-48	19-24	23-32
Espiga de milho	45	35	15
Palha de trigo	30	50	15
Palha de arroz	43,3	26,4	16,3
Fibra de Bananeira	60-65	6-8	5-10
Palha de cevada	31-45	27-38	14-19

Fonte: Santos, 2012.

Além da lignina, hemicelulose e celulose fazem parte da parede celular substâncias com baixo peso molecular que diferem em termos de composição química e, portanto, torna-se difícil

classifica-las (MARABEZI, 2009). Desta maneira, dois grupos foram determinados, o material orgânico (extrativos) e o material inorgânico (cinzas).

Os extrativos são componentes da biomassa que não participam da parte estrutural da parede celular, podendo ser extraídos através de tratamentos sucessivos com solventes orgânicos (BASU, 2010; SANTOS, K., 2011). Correspondem aos extrativos compostos aromáticos fenólicos, terpenos, ácidos graxos saturados e insaturados, proteínas e flavonóides (MARABEZI, 2009).

As cinzas são compostos inorgânicos presentes na biomassa que restam após a sua queima. São constituídas por moléculas de sílica, alumínio, ferro, e cálcio, além de pequenas quantidades de magnésio, titânio, sódio e potássio (BASU, 2010).

Algumas biomassas podem ainda conter pectinas, que são polissacarídeos estruturais que constituem a parede celulósica. Podem ser encontradas na lamela média e na parede primária da célula vegetal. Estes polissacarídeos ramificados contribuem para adesão entre as células e para a resistência mecânica da parede (BRANDÃO e ANDRADE, 1999; WASCHECK, 2008).

### **2.3. Pirólise**

Segundo Gómez (2002), a pirólise caracteriza-se pela degradação térmica do combustível sólido, podendo ocorrer em ausência completa do agente oxidante ou em uma quantidade tal que a gaseificação não aconteça extensivamente. Inicialmente, formam-se os gases condensáveis e a porção sólida. Posteriormente, o gás condensável decompõe-se em gases não condensáveis e um porção líquida composta pelo bio-óleo e o extrato-ácido (BASU, 2010; SANTOS, K., 2011).

O bio-óleo possui um grande potencial para substituir o óleo combustível. Sua queima em motores e caldeiras ocorre de forma eficiente com taxas semelhantes à de combustíveis comerciais. Entretanto, devido ao elevado teor de água presente em sua composição, problemas com a ignição são observados. Além disso, os ácidos orgânicos nos óleos são corrosivos para os materiais de construção comuns, e obstruções nos injetores e corrosão da lâmina podem ocorrer caso haja traços de sólidos nesse óleo (OASMAA, 1999). O extrato

ácido é a parte aquosa dos produtos líquidos possuindo um amplo uso como inseticida natural, fungicida e adubo orgânico ou como insumo para a produção de biodiesel leve (INEE, 2015).

Nos produtos sólidos da pirólise, encontram-se o carvão e as cinzas. O carvão pode ser utilizado na preparação de carvão ativado caso sua estrutura de poro e área superficial sejam adequadas (YAMAN, 2004).

A pirólise pode ser classificada de acordo com a temperatura empregada, a taxa de aquecimento e o tempo de residência. Bridgwater (2006) estudou os rendimentos dos produtos obtidos por diferentes modos de pirólise da biomassa. Na Tabela 2.4, estão apresentadas as classificações do processo de acordo com alguns parâmetros de operação.

**Tabela 2.4**– Rendimentos e condições operacionais de processos de pirólise

<b>Processo de pirólise</b>	<b>Tempo de residência</b>	<b>Taxa de aquecimento</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Líquido</b>	<b>Carvão</b>	<b>Gás</b>
Rápida	< 2s	Muito alta	~ 500°C	75%	12%	13%
Convencional	5-30 min	Baixa	600 °C	-	-	-
Lenta	dias	Muito baixa	400 °C	30%	35%	35%
Gaseificação	< 1s	Alta	600 - 900°C	5%	10%	85%

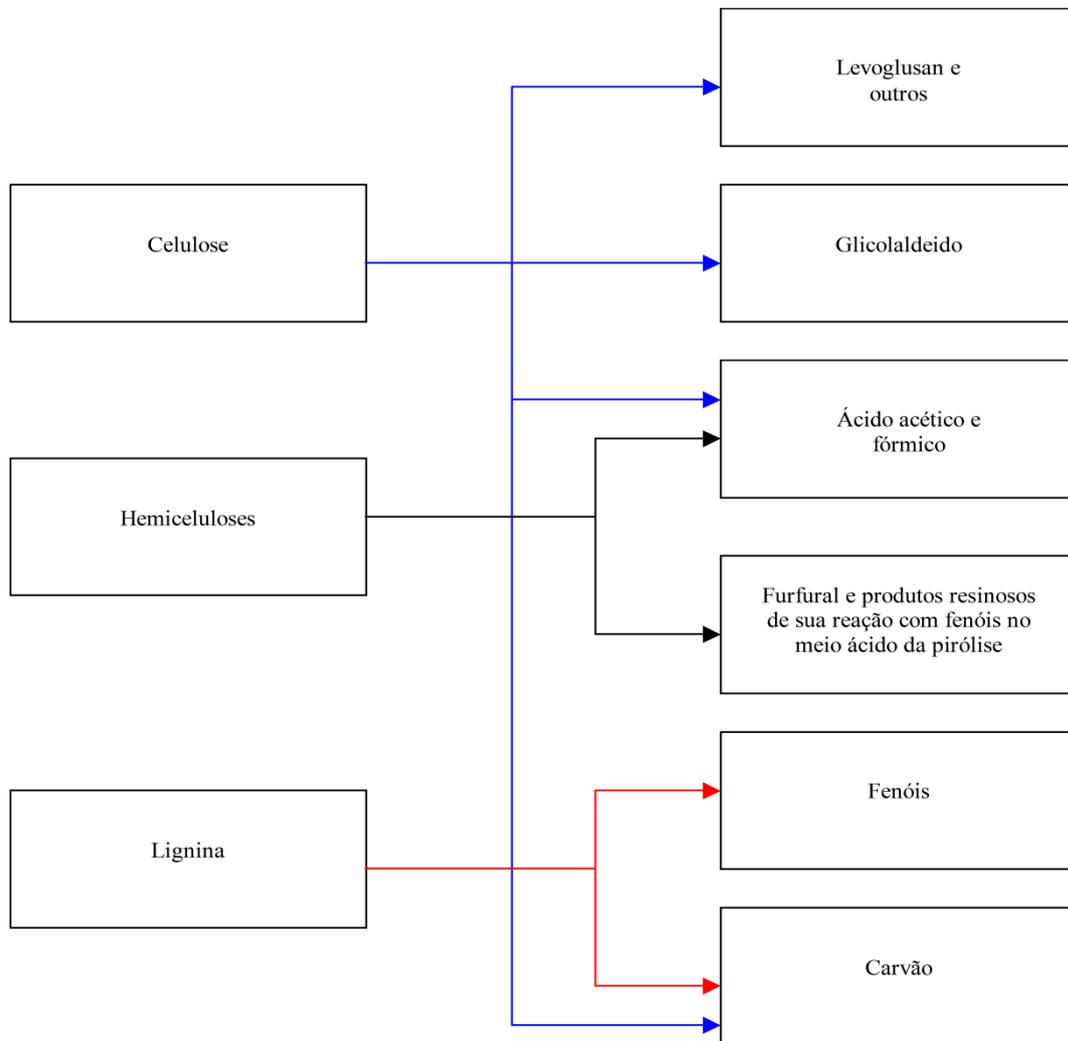
Fonte: Bridgwater, 2006.

Como o bio-óleo possui uma alta densidade energética e é um possível substituto dos combustíveis líquidos derivados do petróleo, a pirólise rápida, a qual favorece a formação deste produto, se destaca cada vez mais no cenário da conversão termoquímica de biomassa.

Biomassas com umidade inferior a 10% e partículas pequenas são recomendadas para a pirólise rápida, a fim de diminuir a quantidade de água nos produtos líquidos e facilitar a difusão de calor na reação (BRIDGWATER, 2012).

A composição da biomassa, em especial a razão hidrogênio-carbono, influenciam diretamente no rendimento da pirólise. Cada constituinte de uma biomassa lignocelulósica possui a sua faixa de temperatura onde ocorre sua degradação, sendo a hemicelulose entre 150 e 350°C, a celulose entre 275 e 350°C e a lignina entre 250 e 500°C (BASU, 2010).

Mesa-Perez (2004) apresenta os principais produtos formados pela pirólise dos componentes da biomassa, expostos na Figura 2.3. Como pode ser verificado, muitos produtos são gerados.



**Figura 2.3** - Produtos da pirólise dos principais componentes da biomassa.

Fonte: Mesa-Perez, 2004.

### 2.3.1. Variáveis que influenciam no processo de pirólise de biomassa

A pirólise trata-se de um processo que envolve muitas reações complexas. Os produtos formados e seus rendimentos são influenciados pelas condições operacionais adotadas e pelas características da biomassa.

### *Condições operacionais*

À medida que se aumenta a taxa de aquecimento no reator, nota-se um incremento na formação de materiais voláteis. Quando altas temperaturas são atingidas, observa-se o craqueamento dos produtos líquidos, elevando a quantidade de gás. Para favorecer a formação de carvão, necessita-se de baixas temperaturas e taxas de aquecimento, ainda que se tenha um alto tempo de residência (GOMÉZ, 2002).

Para garantir uma elevada taxa de aquecimento, reatores que permitem um contato direto entre as partículas que serão pirolisadas e o meio de aquecimento são preferíveis àqueles em que prevalece o contato indireto (GOMÉZ, 2002). O tamanho da partícula deve ser pequeno o suficiente para que a resistência à condução térmica seja mínima. Partículas maiores retêm mais os gases condensáveis em seu interior, facilitando o craqueamento secundário, e consequentemente, resultando em maior formação de carvão (BASU, 2010).

A pressão no reator é outra variável operacional que interfere no rendimento dos produtos da pirólise. A formação de produtos líquidos é favorecida a temperaturas moderadas e baixas pressões. Decréscimos na pressão resultam em menores tempos de residência dos produtos voláteis. E, quando realizada a vácuo, obtêm-se um maior rendimento dos líquidos, uma vez que os produtos voláteis de decomposição e a água são removidos rapidamente (GOMÉZ, 2002).

### *Características da biomassa*

A escolha do processo de conversão termoquímica e as possíveis complicações que podem surgir durante a sua execução são definidas por algumas características da biomassa. Deste modo, informações a respeito do teor de umidade, poder calorífico, proporção de carbonos fixos e voláteis, teor de cinzas e teor de metal alcalino da biomassa são de grande interesse (MCKENDRY, 2002).

McKendry (2002) apresentou em seu trabalho como essas propriedades influenciam em processos de conversão. As conclusões do autor estão descritas abaixo.

Na conversão térmica um baixo teor de umidade é preferível, geralmente menor que 50%. No entanto, torna-se possível a utilização de materiais com um alto teor de umidade, porém, o balanço energético global é comprometido de maneira negativa. Como mencionado, o poder

calorífico da biomassa também é um importante fator para os processos de conversão e é definido como a quantidade de energia liberada quando a biomassa é queimada.

O teor de carbono fixo refere-se à massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade. O teor de voláteis é a porção de massa liberada em forma de gás devido ao aquecimento. Tais propriedades indicam uma medida da facilidade com que a biomassa pode ser queimada.

As cinzas afetam negativamente os processos termoquímicos, pois podem reagir formando um líquido a altas temperaturas denominado "escória", o qual diminui o rendimento da planta, acarretando em aumentos de custos operacionais. A reação de metais alcalinos com a sílica presente nas cinzas produz um líquido pegajoso capaz de obstruir as saídas de gases dos fornos e caldeiras da planta.

A composição elementar de um material refere-se à quantidade de percentuais mássicos dos elementos carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) contidos na sua amostra. A energia presente em um combustível sofre uma redução quando uma maior proporção de hidrogênio e oxigênio em comparação com carbono é observada, em razão de haver uma menor energia nas ligações carbono-oxigênio e carbono-hidrogênio do que nas ligações carbono-carbono. De acordo com Basu (2010), o teor de enxofre presente na biomassa é consideravelmente baixo, sendo esta uma vantagem quando considerada a emissão de SO<sub>2</sub> durante o processo de conversão.

### **2.3.2. Reatores para pirólise rápida**

De acordo com o que foi exposto, para priorizar a produção de líquidos na pirólise, um reator que proporcione um maior contato entre a biomassa e o meio de aquecimento é indicado. Dessa forma, os reatores de leito fluidizado (borbulhante e circulante), leito de jorro, cone rotativo, ciclones, entre outros, são sugeridos.

Figueiredo (2011) estudou uma metodologia de degradação termoquímica da fibra de coco seco utilizando um reator de cilindro rotativo para a produção de bio-óleo, avaliando as temperaturas da reação, vazão do gás de arraste e velocidade de centrifugação para condensação do produto. O autor constatou que o parâmetro que mais influencia no rendimento do bio-óleo foi à temperatura, seguido pela vazão do gás de arraste. Os reatores de

leito rotativo fornecem uma atmosfera controlada e possibilita uma boa mistura das partículas (PINILLA et al., 2009).

Camargo (2006) em seu trabalho estudou a pirólise rápida do bagaço de cana de açúcar em um reator de leito fluidizado em escala de bancada com alimentação contínua. Os experimentos foram realizados usando catalisadores de craqueamento de petróleo (FCC) e injeção de água no fluxo para verificar a influência destes fatores no processo. A temperatura e altura estática do leito foram avaliadas. Constatou-se que o aumento da temperatura contribui para a produção das frações líquidas e gasosas, enquanto o aumento da altura do leito favoreceu a produção das frações sólidas e líquidas.

Santos, K. (2011) analisou a pirólise do bagaço de cana em leito de jorro. Para tal, investigou a cinética da pirólise do bagaço de cana de açúcar através da termogravimetria, estimando parâmetros de alguns dos principais modelos cinéticos disponíveis na literatura. Com este estudo, o autor concluiu que as reações paralelas e independentes de seus subcomponentes foram as que melhor ilustraram a perda de massa da biomassa. Também foi observada a fluidodinâmica do processo, para melhor entender o comportamento das partículas dentro do reator.

Marques (2013), estudou o leito de jorro como reator para pirólise de embalagens cartonadas analisando a fluidodinâmica das partículas no processo por meio de experimentos e simulações via CFD. O autor examinou diversas composições de mistura de areia e discos cartonados e mistura de polietileno e discos cartonados, determinando em quais faixas foi possível atingir o regime de jorro.

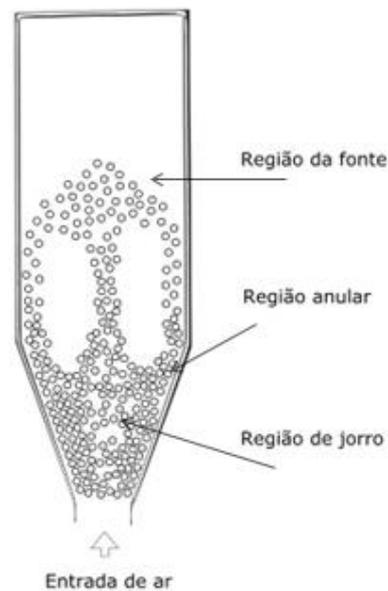
Outros trabalhos que investigaram reatores para pirólise podem ser encontrados na literatura (GOMÉZ, 2002; MESA et al, 2003; MESA-PEREZ, 2004; LÉDÉ et al., 2007; KAUSHAL e ABEDI, 2010; AMUTIO, et al., 2012).

#### **2.4. Leito de jorro**

O leito de jorro é um equipamento que possibilita um contato efetivo entre o fluido e os sólidos devido à intensa mistura que ocorre, proporcionando assim, um alto coeficiente convectivo de calor e de transferência de massa entre as fases (DUARTE, 2006). A base

cônica é utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito (SANTANA, 2011).

O regime de jorro é obtido através da injeção de um fluido, geralmente o ar, em um leito de partículas sólidas. Este fluido entra na parte inferior do equipamento que possui um orifício com diâmetro menor do que o diâmetro do leito. Dessa forma, ocorre a formação de três regiões distintas: região de jorro, região de fonte e região anular, apresentadas na Figura 2.4.



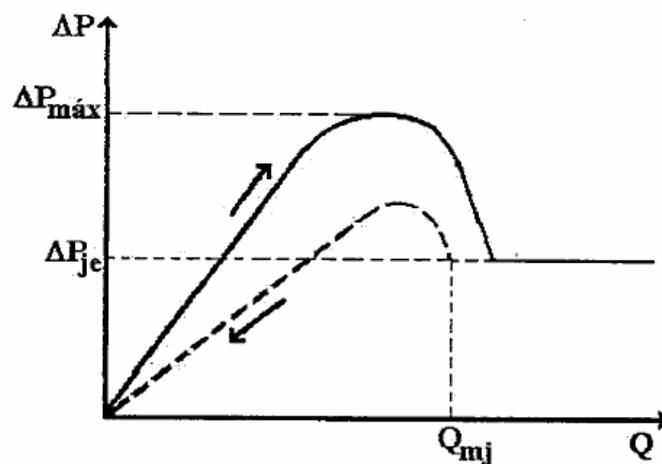
**Figura 2.4** - Leito de jorro com suas regiões características.

Inicialmente, tem-se a região de jorro ou central, onde ocorre o transporte pneumático das partículas devido à grande velocidade do fluido. Esta região possui uma alta porosidade ( $\epsilon > 0,7$ ). Após essa região, encontra-se a região denominada fonte onde as partículas provenientes da região de jorro perdem sua energia cinética e após atingirem uma determinada altura, caem na região anular. Na região anular, as partículas deslizam para baixo em contracorrente com o fluido, até alcançarem novamente o jorro. A região anular é caracterizada por sua baixa porosidade ( $\epsilon < 0,6$ ) próxima à porosidade do leito estático (FREIRE, 1992; SANTOS, K., 2011).

Para a ocorrência do jorro é necessário que haja um valor definido de velocidade do fluido de entrada para uma dada combinação do fluido, sólidos e configuração do equipamento (LESCANO, 2009).

O leito de jorro possui um valor máximo da altura do leito que não pode ser ultrapassada para garantir o regime de jorro estável. Esta altura é função dos parâmetros geométricos da coluna e de propriedades do sistema fluido-partícula que está sendo utilizado. O tamanho do diâmetro da coluna cilíndrica deve ser menor ou igual a 1m para se ter certeza dos movimentos cíclicos das partículas sem que surja regiões mortas no leito. Uma outra limitação deste equipamento é o fato da vazão do fluido ser governada pela fluidodinâmica e não pelas condições requeridas pelo processo em que o jorro foi empregado (FREIRE, 1992).

A fluidodinâmica do leito pode ser observada através da construção da curva característica que consiste em um gráfico que relaciona a queda de pressão no leito em função da vazão/velocidade do fluido, descrevendo assim, a transição do leito estático para o leito de jorro, como pode ser exemplificado pela Figura 2.5.



**Figura 2.5** - Curva característica do leito de jorro.

Fonte: Lima, 2004.

Com os pontos referentes à de velocidade de jorro mínimo ( $Q_{mj}$ ), queda de pressão máxima ( $\Delta P_{máx}$ ) e queda de pressão de jorro estável ( $\Delta P_{je}$ ) determina-se a menor vazão de gás que permite o regime de jorro, a potência máxima a ser fornecida pelo soprador e a potência consumida durante a operação.

O comportamento da curva, relatado abaixo, foi descrito por MATHUR e EPSTEIN (1974) e caracteriza a transição do leito estático a um leito de jorro.

Com uma baixa velocidade do gás, este simplesmente passa através das partículas sem as perturbar, aumentando a queda de pressão no leito na medida em que se aumenta a taxa de escoamento, semelhante ao comportamento de qualquer leito fixo de partículas. Quando o gás atinge certa velocidade, o gás passa a arrastar as partículas da vizinhança imediata da entrada de fluido, formando uma cavidade relativamente vazia na região central logo acima da entrada. As partículas que rodeiam a cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compactado, que proporciona uma resistência maior para fluir. Por isso, apesar da existência de uma cavidade, a queda de pressão total através do leito continua a aumentar.

Com um acréscimo na velocidade do gás, a cavidade alonga para um jorro interno. O arco de sólidos compactados acima do jorro interno aumenta de maneira que a queda de pressão através do leito se eleva até alcançar o valor máximo. Se a velocidade do gás é aumentada, a altura do jorro interno relativamente oco torna-se grande em comparação com a camada sólida compactada acima do jorro e assim a pressão cai.

Muitos sólidos são deslocados da região central causando uma expansão significativa do leito. Esta expansão do leito causa um decréscimo na queda de pressão. Com um pequeno aumento na velocidade do gás, atinge-se o chamado ponto de jorro incipiente; o jorro interno quebra-se e a concentração de sólidos na região exatamente acima do jorro interno decresce abruptamente, causando uma considerável diminuição na queda de pressão. Assim todo o leito torna-se móvel e em estado de jorro.

Caso continue aumentando a velocidade do gás, o fluxo adicional simplesmente passa através da região de jorro, o qual agora se encontra estável e a resistência é para atravessar o caminho, causando uma elevação da fonte sem efeito significativo na queda de pressão.

Define-se a velocidade de mínimo jorro a menor velocidade superficial do fluido no qual ainda é possível a existência de um jorro estável. Este parâmetro depende das características físicas do fluido e das partículas utilizadas, bem como, das características geométricas do sistema.

Uma das formas mais empregadas para identificar os regimes de escoamento é analisar visualmente o comportamento das partículas através de colunas transparentes. No entanto, tal método se mostra inviável para equipamentos em escala industrial. Com o intuito de

solucionar este problema, técnicas foram desenvolvidas através da análise de flutuação de pressão para identificar os regimes (BACELOS, 2006).

A análise estática no domínio do tempo é uma das técnicas utilizadas para reconhecimento dos regimes no leito. O método do domínio do tempo estuda a amplitude de sinais, expressa na forma de um desvio padrão. De acordo com BaceLOS (2006), devido à complexidade da dinâmica do escoamento, o desvio-padrão aumenta com o acréscimo da velocidade do ar e torna-se constante no regime de jorro estável.

#### **2.4.1. Tipos de leito de jorro**

Segundo CUNHA (2008), podem ser encontradas na literatura algumas alterações em relação ao leito de jorro convencional.

- Leito de jorro cônico: constituído somente por uma base cônica, sua principal vantagem é o fato de, utilizando uma mesma altura de leito, pode ser inserida uma carga inicial maior do que aquela comparada com um leito convencional, no qual o ângulo da base tronco-cônica é igual ao ângulo do leito cônico (LOURENÇO, 2006).
- Leito de jorro aerado: a porção cônica do leito recebe uma vazão de ar auxiliar, promovendo um aumento da porosidade nesta região, melhorando com isso as taxas de transferência de calor e massa (CONCEIÇÃO FILHO, 1997, apud CUNHA, 2008).
- Leito de seção retangular: leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco pirâmide, utilizado para o estudo da influência do ângulo da base uma das variáveis de processo de recobrimento (CONCEIÇÃO FILHO, 1997, apud CUNHA, 2008).
- Leito vibro-jorrado: a movimentação das partículas é aumentada pela agitação oriunda de um sistema de vibração localizado na base do leito (CONCEIÇÃO FILHO, 1997, apud CUNHA, 2008).
- Leito de jorro com tubo interno (LOURENÇO, 2006): a interação em leito de jorro foi provada ser um método eficaz de contato gás-sólido. Contudo, ela possui uma desvantagem se as partículas puderem passar da região anular para a região de jorro em qualquer nível do leito, resultando assim em um comportamento randômico dessas partículas. A inserção axial de um tubo draft não-poroso, no leito de jorro convencional apresenta vantagens relacionadas à estabilidade e flexibilidade na operação, mas possui limitações em operações onde o gás é o

agente principal da operação, tal como na secagem e meios reacionais. O motivo desta limitação é o fato de o tubo não-poroso impedir a percolação do gás do jorro para a região anular. Isso poderia reduzir a taxa de contato gás-sólido e o coeficiente de transferência de calor tanto no jorro quanto na região anular. Um tubo draft poroso pode ser usado para reduzir esse problema, promovendo um meio de controle do movimento das partículas e um bom contato gás-sólido na operação (ISHIKURA et al, 2002, apud LOURENÇO, 2006).

## **2.5. Segregação**

Muitos processos que envolvem o leito de jorro necessitam da adição de inertes para facilitar a transferência de calor, ou até mesmo a fluidodinâmica estável de um determinado material. Na pirólise rápida, o inerte empregado é geralmente a areia. Como aponta Ishikura et al. (2003), devido às diferenças de tamanho, velocidade terminal e características da superfície do material, as partículas envolvidas no processo podem apresentar comportamentos diferentes, ocasionando dessa maneira o fenômeno da segregação.

De acordo com Epstein e Grace (2011), no leito de jorro cônico, as partículas com maior diâmetro ficam localizadas em maior proporção na parte superior do leito. Isto ocorre porque as partículas maiores, quando regressam da região de fonte para a região anular tendem a seguir posições radiais perto da interface anular-jorro, e assim percorrer trajetórias mais curtas do que as partículas menores. Logo, a segregação na região da fonte se torna importante, na qual partículas maiores e mais pesadas descrevem percursos menores do que as mais leves e com diâmetro inferior, pois ao serem arrastadas pelo ar na região de jorro, alcançam uma altura menor, caindo distantes das paredes, em uma região mais interna da região anular (SANTOS, K., 2011).

A segregação diminui com o aumento da velocidade do ar. Leitos que apresentam fonte bastante diluída com uma pequena altura de leito estático, geralmente apresentam menor colisão entre partículas. Quanto à proporção de sólidos da mistura, a segregação se torna maior para misturas com a mesma fração em peso de cada componente, e é mais pronunciada quando a razão entre os diâmetros das partículas se distanciam de 1 (SANTOS, K., 2011; EPSTEIN e GRACE, 2011).

Segundo Grace et al. (1983), outros fatores que interferem na trajetória das partículas na região de fonte é a colisão e aglomeração das partículas. A posição radial de entrada das

partículas na fonte do jorro, a altura máxima atingida, assim como, a posição radial onde elas caem na região anular, estão fortemente correlacionadas. As colisões na região da fonte são apontadas com um dos principais fatores que favorecem a segregação. Ocorrem principalmente nas partículas menores e mais leves, ocasionando um espalhamento dessas partículas na região de fonte. Já o processo de mistura é favorecido pela rotação das partículas ao longo da superfície livre e devido aos processos de mistura na região de jorro.

Bacelos (2006) avaliou a estabilidade do regime de jorro em um leito cônico por meio de flutuações de pressão e dos níveis de segregação, empregando partículas de mesmo diâmetro e de partículas de diâmetros diferentes. Dessa maneira, foi verificado uma menor segregação com o aumento do diâmetro das partículas menores e do aumento da altura do leito.

Santos, K. (2011) estudou em seu trabalho a fluidodinâmica do processo de pirólise de biomassa em leito de jorro. Para tal, a análise da segregação no processo foi verificada. Assim, testes com misturas de esferas de vidro de diâmetros diferentes foram feitos, e, concluiu-se que as partículas maiores se concentraram na região superior da região anular. Partículas de mesmo diâmetro e densidades diferentes também foram analisadas mostrando que as partículas menos densas se concentravam na parte superior do leito. E por fim, analisou-se a segregação de partículas com diâmetros e densidades diferentes utilizando bagaço de cana e areia. Constatou-se que a segregação ocorre em todas as misturas estudadas, sendo a concentração de 10% de bagaço, em volume, a que produziu uma melhor distribuição da biomassa ao longo do leito.

Em seus estudos Bortolotti (2012), verificou a fluidodinâmica de um leito de jorro operando com mistura de resíduo de acerola e soja, a diferentes frações mássicas de resíduo de acerola, e em diferentes alturas de leito estático. A segregação da mistura também foi analisada, e concluiu-se que ao decorrer da secagem, a segregação se intensificava devido à mudança de densidade do resíduo, com os materiais menos densos caindo mais próximos à região de fonte. Uma concentração de resíduo de acerola no topo do leito ocorreu para todas as alturas de leito estático e frações mássicas estudadas.

## **2.6. Fluidodinâmica computacional**

A fluidodinâmica computacional (CFD) surgiu da necessidade da resolução de problemas físico e físico-químicos que envolvem fluidos em movimento. Tais situações podem ser solucionadas através de equações diferenciais parciais não lineares, como por exemplo, as equações de Navier-Stokes. Entretanto, tratamentos analíticos para estas equações ainda são bastante limitados. Com o surgimento de hardwares mais sofisticados, cada vez mais a técnica de CFD vem sendo empregada para solução de problemas que envolvem escoamento (BÉTTEGA, 2009).

Estudos experimentais para a determinação da fluidodinâmica em leitos de jorro são de extrema importância. No entanto, a observação do movimento de um grande número de partículas é uma árdua tarefa e/ou a utilização de sondas nos equipamentos para realizar medições e verificar o perfil fluidodinâmico pode interferir no escoamento fluido-partícula. A aplicação do método CFD no estudo de perfis de escoamento gás-partícula permite avaliar os fenômenos que acontecem no interior do leito e prever o comportamento das partículas. Sendo assim, a aplicação da fluidodinâmica computacional é uma ótima alternativa para auxiliar nestes estudos, desde que os dados simulados estejam de acordo com os obtidos experimentalmente (DUARTE et al., 2009).

Como vantagens do uso de CFD, Béttega (2009) aponta o baixo custo, a velocidade com a qual pode ser realizada uma alteração em comparação com o tempo que seria gasto em uma unidade experimental para realizar a mesma alteração e adequar todo o aparato experimental, o detalhamento de informação, a capacidade de simular condições generalizadas abrangendo extremos, e a capacidade de simular condições ideais podendo avaliar variáveis específicas sem a preocupação da interferência de distúrbios provocados por variáveis não controladas.

Apesar dos diversos benefícios mencionados, a técnica de CFD deve ser vista como uma ferramenta para auxiliar estudos, e não como substituto de experimentos.

### **2.6.1. Fluidodinâmica computacional aplicada a leito de jorro**

Duarte (2006) empregou o modelo Euleriano granular multifásico para determinar o perfil fluidodinâmico característico do leito de jorro utilizando a técnica da fluidodinâmica computacional. Em seu trabalho, concluiu que o uso de malhas não estruturadas na parte cônica do leito e estruturadas na parte cilíndrica era mais adequado, adotando células com

ordem de 5 a 10% acima do diâmetro da partícula. As curvas que relacionam a queda de pressão no leito com a velocidade do ar foram simuladas numericamente, estando em concordância com os dados experimentais. O autor avaliou a fluidodinâmica das partículas e do fluido para diversas configurações do equipamento, obtendo bons resultados de velocidade da partícula, velocidade do gás e velocidade de mínimo jorro, os quais se assemelhavam aos resultados obtidos experimentalmente. O leito de jorro com tubo draft foi investigado através de simulações para determinar uma condição adequada para o revestimento de sementes de sojas.

Lourenço (2006) averiguou os regimes fluidodinâmicos em um leito de jorro, comparando os resultados simulados por CFD com os obtidos experimentalmente. Os perfis de porosidade do leito e a curva característica do leito de jorro foram calculados usando o modelo Euleriano multifásico, apontando uma boa concordância entre os dados reais e os simulados.

Shuyan et al (2009) estudou o comportamento de partículas de diferentes diâmetros e mesma densidade em leito fluidizado borbulhante empregando uma combinação do método de partícula discreta e da fluidodinâmica computacional. O autor analisou o tempo de colisão entre as partículas e como o diâmetro interfere na aceleração. A fluidodinâmica das partículas foi verificada experimentalmente e numericamente, sendo realizadas simulações com o CFD para predição dos perfis de localização das partículas no leito e suas respectivas frações mássicas. Os dados experimentais e os simulados condizem um com outro. O autor também avaliou as distribuições da temperatura granular e as tensões de cisalhamento das diferentes partículas.

Santos, K. (2011) simulou a segregação de partículas em um leito de jorro empregando esferas de vidro de diferentes diâmetros e partículas de areia com diferentes diâmetros. Os resultados obtidos por CFD foram equivalentes aos experimentais, indicando uma segregação das partículas maiores no topo do leito e uma menor concentração dessas partículas na base do leito, tanto para as esferas de vidro quanto para os experimentos com a areia. A influência da velocidade do ar também foi analisada e concluiu-se que o aumento da vazão provoca uma redução na segregação das partículas. Condições como velocidade de mínimo jorro e queda de pressão no leito também foram determinadas através da fluidodinâmica computacional e comparadas com valores experimentais, sendo os dados obtidos coerentes. Através deste trabalho o autor concluiu que a utilização da equação de arraste entre fases granulares,

desenvolvida por Syamlal (1987) expressa adequadamente a relação de troca de momento sólido-sólido.

Hosseini et. al (2013) estudou a fluidodinâmica de um leito de jorro cilíndrico usando uma abordagem Euleriana combinado a teoria cinética granular. Diversas simulações foram realizadas a fim de compreender o comportamento das partículas na região da fonte e no jorro diluído, além de averiguar a distribuição das partículas nessas regiões. O autor verificou a influência de parâmetros do modelo de arraste, viscosidade dos sólidos, esquema de discretização e equação de transporte para a temperatura granular. O estudo mostrou que o esquema de discretização afeta as previsões do modelo computacional, sendo necessária uma otimização da modelagem. Os resultados obtidos via CFD apontaram que diferentes modelos de arraste e de viscosidade cisalhante acarretam em diferenças significativas na predição do modelo para a altura da fonte e velocidade axial das partículas.

Melo (2014) empregou o modelo Euleriano para descrever o escoamento de ar-sólido em um leito de jorro cônico. Para tal, partículas do compósito PEBD/AL foram utilizadas juntamente com areia, possuindo o mesmo diâmetro. O comportamento fluidodinâmico foi estudado. Uma malha estruturada bidimensional foi adotada e constatou-se que o modelo k- $\epsilon$  disperso foi o mais adequado para a mistura e que o modelo de arraste Gidaspow mostrou-se adequado para representar a fluidodinâmica do leito com as partículas utilizadas. Experimentos para determinação da queda de pressão e velocidade de mínimo jorro foram realizados e seus resultados comparados com as respostas das simulações.

Diversos trabalhos que exploram a fluidodinâmica computacional para leito de jorro podem ser encontrados na literatura (DU et. al, 2006; WANG et al., 2006; VIEIRA NETO, 2007; BÉTTEGA et. al, 2009; MARQUES, 2013)

### **2.6.2. Malhas computacionais**

A geração da malha computacional é uma das etapas considerada mais importante na solução de problemas utilizando CFD. A qualidade da malha interfere diretamente nos resultados obtidos, no tempo de simulação e no esforço computacional. As malhas podem ser classificadas como malhas estruturadas, malhas não estruturadas e malhas híbridas, dependendo da forma geométrica das células e da distribuição destas células na geometria estudada (SANTOS, D. , 2011).

### *Malha estruturada*

Na malha estruturada a malha é disposta em um padrão regular repetido, denominados blocos. Os elementos utilizados para construção da malha podem ser quadriláteros, quando se tem uma malha 2D, ou hexahédricos para malhas 3D. Esta configuração de malha tem como vantagem permitir ao usuário um alto grau de controle. Também é possível condensar pontos nas regiões de altos gradientes de fluxo da grandeza de interesse e gerar regiões menos densas quando necessário (DUARTE, 2006).

### *Malha não estruturada*

A malha não estruturada não segue um padrão para o arranjo dos elementos na geometria, distribuindo-os de forma aleatória. Utilizam geralmente elementos triangulares para geometrias 2D e elementos tetraédricos para geometrias 3D. Uma das vantagens da malha não estruturada é o fato de serem muito automatizadas, diminuindo o esforço e tempo do usuário para sua construção (DUARTE, 2006).

### *Malha híbrida*

A malha híbrida é uma junção da malha estruturada com a malha não estruturada. Portanto é possível utilizar uma malha estruturada em locais que exigem um maior detalhamento, e, malhas não estruturadas em regiões em que não há grande interesse. No entanto, para utilização deste tipo de malha é preciso que o usuário tenha muita prática e experiência (DUARTE, 2006).

### 3. MODELAGEM

Utilizada na solução de problemas de escoamento multifásico, como o leito de jorro, por exemplo, a técnica de CFD consiste na resolução de equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia através de métodos numéricos. Na literatura são encontradas duas abordagens para realização dos cálculos, a abordagem Euler-Lagrange e a abordagem Euler-Euler.

Na abordagem Euler-Lagrange a fase fluida é tratada como uma fase contínua, e, primeiramente são solucionadas as equações médias de Navier-Stokes para esta fase separadamente da fase dispersa. Na fase dispersa, as trajetórias para cada partícula são calculadas individualmente, aumentando, dessa forma, o esforço computacional. Portanto, esta abordagem não é adequada para solução de problemas em que a fase particulada se encontra em uma concentração equivalente a fração volumétrica da fase fluida, sendo limitada a casos onde a fase particulada pode ser considerada diluída, geralmente menor do que 10-12% (MARQUES, 2013).

Na abordagem Euler-Euler as diferentes fases, independente de suas composições e características físicas, são tratadas como contínuas e interpenetrantes, ou seja, o volume de uma fase não ocupa o volume da outra fase, incorporando o conceito de fração volumétrica. A soma das frações volumétricas deve ser igual a um. As equações de conservação são aplicadas a cada fase, gerando um conjunto de equações com estruturas similares a serem resolvidas. Nos casos que apresentam fases granulares, a teoria cinética granular é aplicada (SANTOS, D., 2011).

No software ANSYS FLUENT<sup>®</sup> 15.0, são apresentados três modelos multifásicos Euler-Euler: o Modelo de Volumes Fluidos (VOF), o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano. Para leitos de jorro, o modelo Euleriano é o mais indicado, como apontado pelo Guia Teórico do ANSYS FLUENT<sup>®</sup> 15.0 e pode ser constatado em diversos estudos (DU et al., 2006; WANG et al., 2006; DUARTE et al., 2009; MARQUES, 2013) , sendo este modelo aplicado neste trabalho.

As equações constitutivas e a teoria cinética granular descritas abaixo podem ser encontradas no Guia Teórico do ANSYS FLUENT<sup>®</sup> 15.0, 2013.

### 3.1. Equações constitutivas

#### *Força de ascensão*

A força de ascensão, também conhecida como força de elevação, atua na partícula devido aos gradientes de velocidade da fase fluida. É definida conforme a Equação 1.

$$\vec{F}_{lift} = -0,5\rho_g\alpha_s(\vec{v}_g - \vec{v}_s) \times (\nabla \times \vec{v}_g) \quad (1)$$

A força de ascensão, na maioria dos casos, é insignificante em comparação com a força de arraste, logo, esta é desconsiderada na equação da continuidade.

#### *Força mássica virtual*

A força mássica virtual ocorre quando a fase granular acelera em relação a fase fluida. Dessa forma, a inércia da fase fluida exerce uma força de massa virtual sobre as partículas. A força mássica virtual é definida de acordo com a Equação 2 abaixo.

$$\vec{F}_{vm} = 0,5\alpha_s\rho_g \left( \frac{d_g\vec{v}_g}{dt} - \frac{d_s\vec{v}_s}{dt} \right) \quad (2)$$

Esta força só é significativa quando a densidade da fase granular é muito menor do que a densidade da fase fluida.

#### *Força de arraste*

A força de arraste é uma das mais importantes forças no escoamento. O modelo de arraste de GIDASPOW et al. (1992) é uma combinação dos modelos de Wen e Yu e a Equação de Ergun, sendo o coeficiente de arraste,  $K_{sg}$ , descrito pelas Equações 3 e 5.

- Para  $\alpha_g > 0,8$ , o modelo de Wen e Yu (1966) é empregado:

$$K_{sg} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_g \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \alpha_g^{-2,65} \quad (3)$$

$$C_D = \frac{24}{\alpha_g Re_s} \left[ 1 + 0,15(\alpha_g Re_s)^{0,687} \right] \quad (4)$$

- Para  $\alpha_g \leq 0,8$ , o modelo de Ergun (1952) é empregado:

$$K_{sg} = 150 \frac{\alpha_s(1-\alpha_g)\mu_g}{\alpha_g d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_g |\vec{v}_s - \vec{v}_g|}{d_s} \quad (5)$$

### 3.2. Teoria Cinética Granular

Desenvolvida por LUN et. al, a Teoria Cinética Granular baseia-se na Teoria Cinética dos Gases. Nesta teoria é inserido o conceito de temperatura granular e pressão de sólidos. Ao aplicar o balanço diferencial de quantidade de movimento para a fase sólida, remete-se a necessidade de definir a pressão, viscosidade *bulk* e viscosidade cisalhante da fase sólida presentes no tensor tensão de sólidos.

#### *Temperatura granular*

A temperatura granular é definida como uma medida da flutuação da velocidade das partículas, sendo esta proporcional à energia cinética do movimento aleatório das partículas. A equação do transporte derivado da teoria cinética, Equação 6, apresenta a seguinte forma.

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla v_s + (k_{\theta_s} \nabla \theta) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{gs} \quad (6)$$

em que

$(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla v_s$  = geração de energia pelo tensor tensão de sólidos;

$k_{\theta_s} \nabla \theta$  = difusão de energia ( $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão);

$\gamma_{\theta_s}$  = energia de dissipação devido a colisão;

$\phi_{gs}$  = troca de energia entre a fase fluida e a fase sólida.

$$\bar{\tau}_s = \alpha_s \mu_s (\nabla \vec{v}_s + \nabla \vec{v}_s^T) + \left( \alpha_s \lambda_s - \frac{2}{3} \alpha_s \mu_s \right) \nabla \cdot v_s \bar{I} \quad (7)$$

sendo

$\mu_s$  = viscosidade cisalhante dos sólidos

$\lambda_s$  = viscosidade bulk dos sólidos

$\bar{I}$  = tensor unitário

GIDASPOW et al (1992) desenvolveram o seguinte modelo para o coeficiente de difusão, descrito na Equação 8.

$$k_{\theta_s} = \frac{150d_s\rho_s\alpha_s\sqrt{\theta_s\pi}}{3844(1+e_{ss})g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{6}{5}\alpha_s g_{0,ss}(1+e_{ss}) \right]^2 + 2\rho_s\alpha_s^2 d_s(1+e_{ss})g_{0,ss}\sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (8)$$

O modelo de dissipação de energia devido as colisões entre as partículas, Equação 9, foi definido por LUN et al. (1984).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s\sqrt{\pi}} \rho_s\alpha_s^2\theta_s^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

em que

$e_{ss}$  = coeficiente de restituição das partículas

$\alpha_s$  = fração volumétrica de sólidos

$g_{0,ss}$  = função de distribuição radial que será definida mais adiante

GIDASPOW et al. (1984) definiram a transferência de energia cinética devido as flutuações aleatórias na velocidade da partícula da fase sólida para a fase fluida como descrito na Equação 10.

$$\phi_{gs} = -3K_{gs}\theta_s \quad (10)$$

### *Pressão de sólidos*

A pressão de sólidos, Equação 11, é calculada para fluxos granulares em regime compressível, sendo composta por um termo cinético e um termo para colisões entre partículas.

$$p_s = \alpha_s\rho_s\theta_s + 2\rho_s(1+e_{ss})\alpha_s^2g_{0,ss}\theta_s \quad (11)$$

em que

$e_{ss}$  = coeficiente de restituição para as colisões entre as partículas

$\theta_s$  = temperatura granular

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

### *Função de distribuição radial*

A função de distribuição radial trata-se de um fator de correção que modifica a probabilidade de colisão entre as partículas quando a fase granular se torna densa. O modelo de OGAWA (1980) descreve esta função da forma apresentada na Equação 12.

$$g_{0,ss} = \left[ 1 - \left( \frac{a_s}{a_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (12)$$

### *Viscosidade bulk da fase sólida*

A viscosidade *bulk* da fase sólida determina a resistência das partículas a compressão e expansão. LUN et al. (1984) definiram esta viscosidade conforme a Equação 13 apresentada abaixo.

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

### *Viscosidade cisalhante*

A viscosidade cisalhante é obtida através da soma da viscosidade devido às colisões entre as partículas, viscosidade cinética e viscosidade friccional, sendo esta ultima opcional. GIDASPOW et al. definiram a viscosidade cisalhante como mostrado na Equação 14 abaixo.

$$\mu_a = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha_s + \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \alpha_s \quad (14)$$

### 3.3. Coeficiente de troca sólido-sólido

De acordo com o modelo de Syamlal et al. (1987), o coeficiente de troca sólido-sólido de uma fase sólida a e uma fase sólida s, é descrito de acordo com a Equação 15.

$$K_{sa} = \frac{3(1-e_{sa})\left(\frac{\pi}{2} + C_{fr,sa}\frac{\pi^2}{8}\right)\rho_s\alpha_s\alpha_a\rho_a(d_a+d_s)g_{0,as}}{2\pi(\rho_a d_a^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_s - \vec{v}_a| \quad (15)$$

sendo

$e_{sa}$  = coeficiente de restituição

$C_{fr,sa}$  = coeficiente de fricção entre as partículas das fases sólidas

$g_{0,as}$  = coeficiente de distribuição radial

$d_a$  = diâmetro das partículas de fase sólida a

### 3.4. Modelo de turbulência

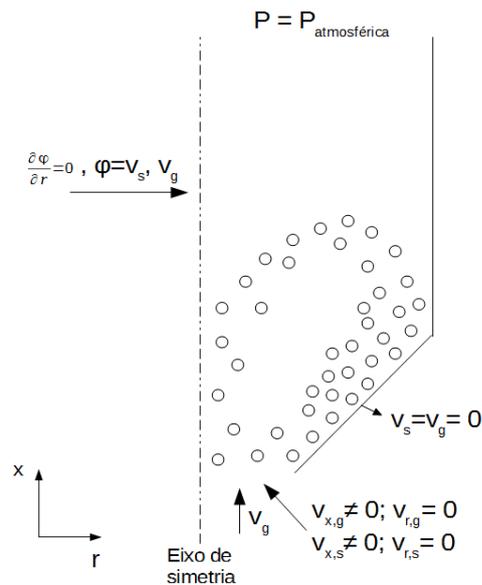
Os modelos de turbulência utilizados na literatura para descrever este fenômeno em sistemas multifásicos são extensões do modelo k-ε aplicados para modelos monofásicos (SANTOS, K., 2011). No modelo de turbulência k-ε, “k” (energia cinética turbulenta) é definida como a variação das flutuações em velocidade e “ε” é a dissipação do vórtice de turbulência, ou seja, a taxa de dissipação das flutuações de velocidade (MELO, 2014).

No software FLUENT<sup>®</sup>, são encontradas três variações do modelo de turbulência k-ε, as quais são: Modelo de Turbulência k-ε de Mistura, Modelo de Turbulência k-ε Disperso e Modelo de Turbulência k-ε para cada fase.

O modelo de turbulência k-ε disperso é mais adequado para sistemas em que a fase granular é diluída. No leito de jorro, a turbulência manifesta-se na região mais porosa (região de jorro), portando tal modelo pode ser aplicado.

### 3.5. Modelo Euleriano aplicado ao escoamento gás-sólido no leito de jorro

Na Figura 3.1 é apresentado um esquema do escoamento analisado neste trabalho, juntamente com as condições de contorno e iniciais.



**Figura 3.1** - Esquema do escoamento e condições de contorno

As seguintes considerações podem ser admitidas neste escoamento gás-sólido:

- Regime transiente;
- Não ocorre reação química
- Não ocorre a transferência de massa entre as fases gás-sólido;
- Geometria esférica das partículas;
- Escoamento multifásico composto por 3 fases contínuas e interpenetrantes;
- Escoamento bidimensional gás-sólido em  $x$  e  $r$ ;
- A força mássica virtual é desprezada já que a densidade da fase granular é maior do que a densidade da fase fluida;
- A força de ascensão é desprezada pois o leito apresenta um baixo empacotamento;

- A viscosidade friccional de sólidos é desprezada, pois, de acordo com os estudos realizados por Du et al. (2006), a inserção deste termo não afeta a fluidodinâmica do leito.

Dessa forma, as equações governantes e as equações constitutivas para o escoamento são apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** - Equações governantes do escoamento gás-sólido

Equações governantes		
Equações da continuidade		
Fase fluida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = 0$	(16)
Fase sólida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0$	(17)
	$\alpha_g + \alpha_s = 1$	(18)
Equações da quantidade de movimento		
Fase fluida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) + \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\alpha_g \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_g + \alpha_g \rho_g \vec{g} + K_{ag}(\vec{v}_a - \vec{v}_g)$	(19)
Fase sólida	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{gs}(\vec{v}_g - \vec{v}_s)$	(20)

As equações constitutivas utilizadas neste trabalho foram descritas anteriormente sendo elas:

- Modelo de arraste de Gidaspow et al. (1992) (Equação 5);
- Temperatura granular (Equação 6);
- Pressão de sólidos (Equação 11);
- Função de distribuição radial (Equação 12);
- Viscosidade *bulk* (Equação 13);
- Viscosidade cisalhante (Equação 14);
- Coeficiente de troca sólido-sólido (Equação 15).

O modelo de turbulência escolhido foi o modelo de turbulência k-ε disperso.

### **3.5.1. Condições de contorno e inicial**

A seguir são apresentadas as condições de contorno associadas ao modelo, e as condições iniciais adotadas.

#### *1) Entrada do leito*

- o ar é injetado somente na direção axial e apresenta um perfil plano de velocidade;
- os sólidos possuem velocidade nula.

#### *2) Saída do leito*

- a pressão na saída é a pressão atmosférica;
- os gradientes axiais de velocidade são nulos tanto para as fases granulares quanto para a fase fluida.

#### *3) Parede*

- condição de não deslizamento nas paredes para todas as fases

#### *4) Simetria*

- no eixo de simetria axial (eixo x), os gradientes radiais de temperatura granular e de velocidade para as fases são nulos.

## **4. METODOLOGIA**

### **4.1. Metodologia Experimental**

#### **4.1.1. Preparação das amostras de casca de cacau**

As amostras de casca do cacau foram coletadas no município de Sooretama-ES. Estas foram lavadas a fim de retirar impurezas e areias presentes. Como se tratava de um material recém-colhido, sua umidade era elevada e, portanto, antes da moagem para obtenção das partículas para os experimentos, fez-se necessário a secagem das cascas em estufa, a 105°C por 24 horas. Ao final da secagem, as amostras foram moídas em um moinho de facas para posterior determinação do tamanho das partículas.

#### **4.1.2. Análise imediata**

##### **4.1.2.1. Teor de umidade**

O teor de umidade foi obtido por meio do método ASTM E871-82. As amostras de casca de cacau, pesando aproximadamente 2g, foram inseridas em uma estufa a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 horas, e, em seguida, resfriadas em dessecador até a temperatura ambiente. Logo após, as amostras foram pesadas para posterior cálculo do teor de umidade.

##### **4.1.2.2. Teor de cinzas**

O teor de cinzas foi determinado baseado nos métodos ASTM E1534-93 em que a amostra ficou 1 hora em mufla aquecida a 700°C. Ao serem retiradas, as cascas de cacau foram introduzidas em um dessecador a fim de atingirem a temperatura ambiente, para posterior determinação da massa.

##### **4.1.2.3. Teor de voláteis**

Para a determinação do teor de voláteis foi empregado o método ASTM E872-82, adaptando-o para mufla. As amostras de casca, livres de umidade, foram inseridas na mufla à

temperatura de 950°C por 7 min em cadinho com tampa, sendo, logo após, levadas ao dessecador e pesadas.

#### **4.1.2.4. Carbono fixo**

A análise de carbono fixo é uma medida indireta e foi determinada por diferença utilizando as análises de teor de cinzas e teor de voláteis de acordo com o método ASTM Standard D3172.

### **4.1.3. Caracterização química da casca de cacau**

#### **4.1.3.1. Pectina**

A pectina foi determinada por meio de uma metodologia adaptada de Liu et al. (2006). Realizou-se um processo de extração com um extrator do tipo Soxhlet, onde em um balão de fundo chato foram adicionados 300 mL de uma solução de HCl 2 molar. No sifão, um sache contendo 3 g de casca de cacau sem umidade foi inserido. A extração ocorreu durante 6 horas. A pectina presente na solução dentro do balão foi separada por centrifugação. Posteriormente, o material foi seco em estufa a 45°C até atingir peso constante.

#### **4.1.3.2. Extrativos totais**

Os extrativos totais da amostra foram determinados de acordo com o padrão TAPPI T204 cm-97. Para tal, pesou-se 3 gramas de casca de cacau livre de umidade e inseriu-os em um sache confeccionado com papel de filtro. Neste experimento o extrator utilizado foi do tipo Soxhlet. Posteriormente, colocou-se o sache contendo a amostra dentro do sifão do tubo de extração, de forma que não atingisse a extremidade superior do mesmo. Uma solução de etanol-tolueno 1:1 v/v foi empregada, adicionando assim 750 mL ao balão de fundo chato localizado na extremidade inferior do tubo de extração. O processo de extração ocorreu durante 5 horas. Ao atingir o trocador de calor localizado acima do sifão, o vapor condensa e cai sobre o sache, carregando consigo os extrativos da amostra ao retornar para o balão. Ao término desta primeira etapa de extração, a solução etanol-tolueno é substituída por uma solução de 750 mL de etanol para uma segunda etapa da extração com duração de 4 horas. Em seguida, o sachê foi retirado do sifão e aberto. Seu conteúdo foi introduzido em um béquer, com o auxílio de uma piseta, contendo 150 mL de água destilada, sendo levado a banho Maria, à temperatura

de 98°C, por uma hora. Após o processo de extração, o conteúdo de cada béquer foi filtrado com um funil de placa porosa nº 4, utilizando um sistema de filtração por bomba a vácuo. 500 mL de água quente lavaram a amostra durante a filtração. Em seguida, o funil foi levado à estufa a 105°C por 24 horas. Este procedimento foi realizado em duplicata.

#### **4.1.3.3. Lignina**

A determinação da lignina de Klason foi realizada segundo a norma TAPPI T 222 om-02. Aproximadamente 1 grama de biomassa sem umidade e extrativos foi colocado em um béquer com 15,0 mL de solução de ácido sulfúrico 72% (m/m). A amostra foi mantida durante 2 horas em temperatura ambiente e sob agitação. Em seguida, o conteúdo do béquer e 560 mL de água destilada foram transferidos para um balão e o sistema colocado sob refluxo a uma temperatura de 100 °C. Após 4 horas, a lignina insolúvel foi filtrada com funil de vidro sinterizado nº4 e seca em estufa a 105 °C até atingir massa constante. Coletou-se o filtrado para análise posterior da lignina Klason solúvel.

Na determinação da lignina solúvel, utilizou-se o método de Goldschimid (1971), no qual se realiza uma varredura da absorvância de 280 nm a 215 nm.

#### **4.1.3.4. Holocelulose**

A metodologia utilizada na determinação da holocelulose está de acordo com a empregada pela Embrapa (2010) para análise lignocelulósica. Inicialmente, lavou-se o funil de placa porosa com abertura de poro de 40 µm a 100 µm. Em seguida, o funil foi seco por pelo menos 2 horas a 105°C, e, logo após, retirado da estufa e encaminhado para um dessecador por tempo suficiente até que atingisse a temperatura ambiente para posterior pesagem. Em um erlenmeyer de 500 mL, adicionam-se cerca de 3,0000 g do material, sem umidade nem extrativos. A seguir, adicionaram-se 120 mL de água destilada. Em uma capela de exaustão, preparou-se um banho-maria a temperatura constante de 70°C. Em seguida, acrescentaram-se cerca de 2,5 g de clorito de sódio (NaClO<sub>2</sub>), com pureza aproximada de 80%, e 1 mL de ácido acético glacial, com pureza ≥ 99,85%. Para manter a agitação constante dentro do erlenmeyer uma barra magnética foi acrescentada. Posteriormente, o erlenmeyer foi tampado com um erlenmeyer menor e inserido no banho, permanecendo por 1 hora. Após esse tempo, realizou-se uma nova adição de 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético. Depois de uma hora,

adicionou-se, mais uma vez, 2,5 g de clorito de sódio e 1 mL de ácido acético, e prosseguiu-se com o aquecimento em banho por mais três horas. Após as 5 horas de reação, o erlenmeyer contendo a amostra foi colocado em um banho de gelo por 30 minutos. Ao fim deste tempo, foi realizada a filtração a vácuo com água destilada até o pH do filtrado ficar próximo ao da água. Realizou-se em seguida uma lavagem com aproximadamente 20 mL de acetona. O funil, então, foi levado à estufa a 105°C e secado até adquirir um peso constante. Após a secagem, o conjunto funil-holocelulose foi inserido em um dessecador com agente dessecante, por pelo menos 30 minutos, até atingir a temperatura ambiente. O conjunto foi pesado em uma balança analítica.

#### **4.1.3.5. Alfacelulose**

A metodologia utilizada na determinação da alfacelulose segue a adotada pela Embrapa (2010) para análise lignocelulósica. Um funil de placa porosa com uma abertura de poro de 40 µm a 100 µm foi lavado e inserido em uma estufa a 105°C por 2 horas. Em seguida, o mesmo foi levado a um dessecador por 30 minutos a fim de alcançar a temperatura ambiente, e, posteriormente, pesado.

Em um almofariz colocou-se aproximadamente 1 g da holocelulose seca obtida e depois se adicionou 15 mL de uma solução de NaOH a 17,5%. Aguardaram-se, então, dois minutos de contato entre a solução e a celulose, e deu-se início a trituração do material por oito minutos para homogeneizar a solução. Ao final deste tempo, 40 mL de água destilada foram adicionadas ao almofariz, e todo o seu conteúdo foi transferido para o funil para a realização de uma filtração a vácuo. A lavagem foi feita com água destilada até que fosse atingido o pH da água. Após a filtração, o funil foi levado a uma estufa a 105°C até atingir peso constante. Depois, o conjunto funil-alfacelulose foi colocado em um dessecador por cerca de 30 minutos, pesando-o ao final deste período.

#### **4.1.3.6. Hemicelulose**

A hemicelulose foi determinada pela diferença entre a holocelulose e a alfacelulose.

#### **4.1.4. Caracterização física das partículas**

##### **4.1.4.1. Diâmetro médio**

Após a moagem, as partículas de casca de cacau de diversos tamanhos foram peneiradas utilizando as peneiras equivalentes a mesh 5, 6, 7, 8 e 9.

O diâmetro da areia foi determinado através da técnica de peneiramento. Para tal utilizou-se das peneiras de mesh 9, 10, 12 e 14.

##### **4.1.4.2. Massa específica aparente**

A massa específica aparente da casca do cacau foi obtida por picnometria, segundo a metodologia empregada por JONES (1981) apud RASUL et al. (1999). A amostra da casca foi inicialmente imersa em um béquer contendo água. O recipiente foi então aquecido até o ponto de ebulição da água e mantido nesta condição durante 15 min. Devido às partículas da amostra absorver água, estas decantaram para o fundo do béquer. Em seguida, retirou-se o excesso de água. A casca úmida foi então seca em camada fina em estufa a 105 °C. Quando a superfície das partículas aparentou estar seca, a amostra foi retirada da estufa, o que ocorreu em cerca de 45 min a 1 h. Neste período, a maioria dos poros ainda encontram-se preenchidos com água. Na sequência, realizou-se a picnometria convencional empregando a amostra saturada com água e tolueno como fluido de picnometria. Parte da casca úmida foi mantida em estufa a fim de determinar a massa de água contida em seus poros. Ressalta-se que o experimento foi realizado em triplicata.

Para a massa específica aparente da areia, adotou-se a picnometria convencional, empregado água para a realização deste procedimento.

##### **4.1.4.3. Massa específica real**

A massa específica real foi determinada por meio do método de picnometria a gás.

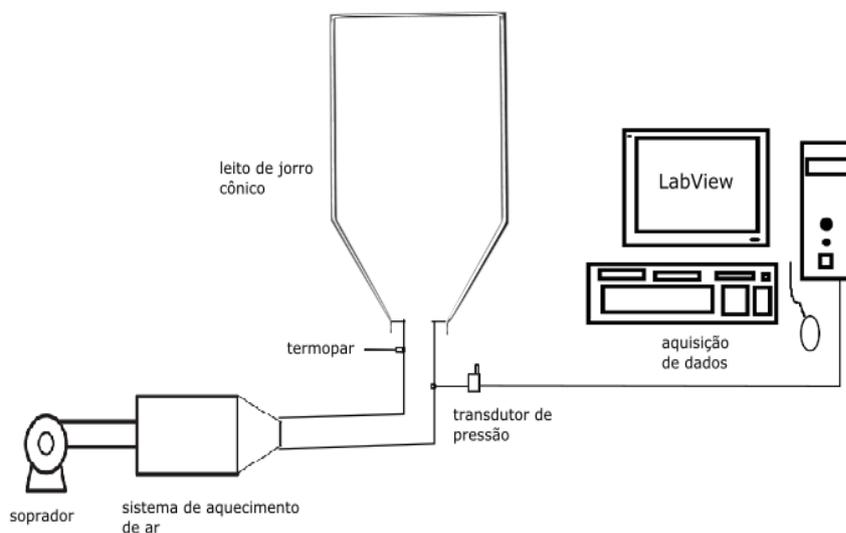
#### 4.1.4.4. Esfericidade

As partículas foram dispostas em uma bancada devidamente marcada a fim de facilitar a determinação das medidas das amostras, e em seguida, foram fotografadas. A esfericidade das partículas da casca e da areia foram determinadas com o auxílio do software ImageJ.

#### 4.1.5. Experimentos de fluidodinâmica

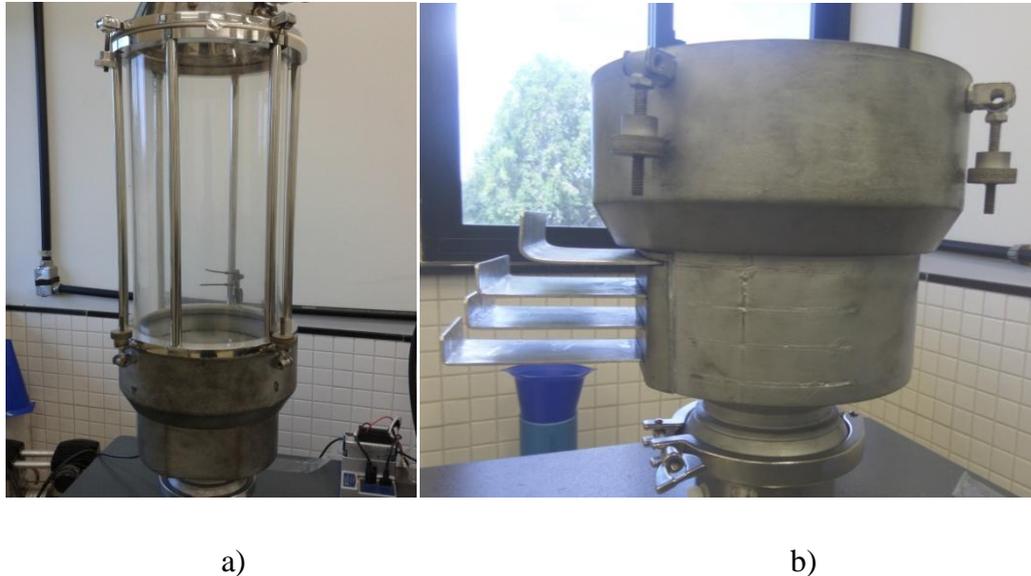
##### 4.1.5.1. Unidade experimental

O leito de jorro utilizado nos experimentos foi do tipo cônico. Este leito é constituído de uma coluna cônica e uma coluna de vidro que permite a observação do que está ocorrendo no leito, um transdutor de pressão de marca Dwyer modelo 616C-4 operando em uma faixa de 0-20 IN WC localizado na entrada de ar da tubulação para medir a queda de pressão durante o experimento, sistema de aquecimento de ar com controle de temperatura PID e um ventilador centrífugo 2,0 Hp da marca IBRAM com uma taxa de fluxo de ar de  $4,5 \text{ m}^3/\text{min}$ . A coluna cônica possui um ângulo de  $45^\circ$ , a abertura para entrada de ar possui 4,15 cm e a coluna tem 20 cm de altura. A coluna de vidro cilíndrica possui uma altura de 39,5 cm e um diâmetro de 20 cm. A parte cônica do equipamento possui alguns cortes transversais para acomodar as 4 guilhotinas usadas no procedimento de segregação. Estas entradas permanecem obstruídas durante os experimentos de fluidodinâmica para evitar perdas de material e não influenciarem nos resultados. Um esquema do sistema utilizado nos experimentos com as dimensões do leito de jorro é mostrado na Figura 4.1.



**Figura 4.1** - Esquema do sistema utilizado nos experimentos de fluidodinâmica e segregação

O leito de jorro cônico utilizado nos experimentos é exibido na Figura 4.2-a. Para a segregação adotou-se um equipamento adaptado para a inserção das guilhotinas nas alturas de 2, 4, 6 e 8 cm acima da base do leito, como exposto na Figura 4.2-b.



**Figura 4.2** - a) Leito de jorro cônico b) Base cônica do leito de jorro com guilhotinas.

#### 4.1.5.2. Condições experimentais

Para avaliar como a velocidade de mínimo jorro ( $V_{mj}$ ) e a queda de pressão de jorro estável ( $\Delta P_{je}$ ) podem ser afetados pela fração mássica de biomassa ( $X$ ) e altura do leito estático ( $H$ ), adotou-se um planejamento de experimentos  $3^2$  com 2 pontos centrais, totalizando 11 experimentos, de acordo com a Tabela 4.1.

Para a escolha dos níveis referentes a fração mássica de casca de cacau, realizou-se um experimento prévio onde foi verificado qual o valor máximo de fração mássica de casca poderia ser adotado em que ainda fosse possível manter as partículas jorrando. Tal experimento resultou em um regime de jorro com uma fração mássica de casca de cacau de até 100%. Dessa maneira, optou-se pelos seguintes níveis: 25, 50 e 75% de casca de cacau. Com relação às alturas de leito estático a serem avaliadas, a escolha deu-se pelas condições do equipamento a ser utilizado, tentando-se abranger os maiores valores de altura dentro do limite da altura das guilhotinas. Assim, definiram-se as seguintes alturas de leito estático para a realização dos experimentos: 6, 8 e 10 cm.

**Tabela 4.1** - Planejamento de experimentos: velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão de jorro estável

Corrida	X (%)	H (cm)	$x_1$	$x_2$
1	25	6	-1	-1
2	25	8	-1	0
3	25	10	-1	+1
4	50	6	0	-1
5	50	8	0	0
6	50	10	0	+1
7	75	6	+1	-1
8	75	8	+1	0
9	75	10	+1	+1
10	50	8	0	0
11	50	8	0	0

As equações de codificação das variáveis fração mássica de casca de cacau (X) e altura de leito estático (H) estão definidas nas Equações 21 e 22, respectivamente.

$$x_1 = \frac{X-0,5}{0,25} \quad (21)$$

$$x_2 = \frac{H-8}{2} \quad (22)$$

#### 4.1.5.3. Procedimento experimental

Para cada condição experimental do planejamento, as massas correspondentes às frações mássicas de biomassa e areia foram combinadas e em seguida a mistura binária formada introduzida no leito cônico. Na sequência, a velocidade do ar foi aumentada até a ocorrência do jorro, e, em seguida, diminuiu-se esta velocidade até o valor em que se iniciou o experimento, registrando os dados de queda de pressão correspondente as velocidades do ar. Com estas informações, gerou-se a curva característica e determinou-se a velocidade de mínimo jorro, queda de pressão máxima no leito e queda de pressão de jorro estável. Para a coleta dos dados, o software LabView<sup>®</sup> foi utilizado, sendo que para cada velocidade 1024 pontos de pressão foram coletados com frequência de 1000 Hz.

Após a obtenção da velocidade de mínimo jorro de todas as frações mássicas em todas as alturas, deu-se início aos experimentos de segregação. Avaliou-se a segregação nas alturas de leito estático e frações mássicas de casca de cacau definidos nos experimentos fluidodinâmicos. A velocidade de entrada do ar também foi alterada, sendo esta 10, 20 e 30% acima da velocidade de mínimo jorro. As partículas foram mantidas no regime de jorro na velocidade, altura e fração mássica escolhidas. Após permanecerem jorrando por aproximadamente 5 minutos, o soprador foi desligado abruptamente e as guilhotinas inseridas.

As partículas de areia e casca de cacau que estavam sobrepostas em cada guilhotina foram retiradas e separadas por peneiramento. Posteriormente, as massas foram quantificadas, e, assim, determinada a fração mássica em cada posição axial.

Para caracterizar a segregação em leito de jorro, utiliza-se o conceito de índice de mistura análogo ao utilizado para reatores de leito fluidizado, definido na Equação 23.

$$I_M = \frac{(\bar{X})_u}{(\bar{X})} \quad (23)$$

em que  $(\bar{X})_u$  é a fração mássica das partículas de maior diâmetro, na metade superior do volume do leito e  $\bar{X}$  é a fração mássica das mesmas partículas em todo o leito.

#### 4.1.6. Porosidade

As massas correspondentes às frações mássicas de biomassa e areia foram inseridas, após serem misturadas, em uma proveta de 250 mL para determinação da porosidade da mistura.

A porosidade é expressa de acordo com a Equação 24.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_M}{V_L} \quad (24)$$

Em que  $V_M$  é o volume da amostra e  $V_L$  o volume do leito.

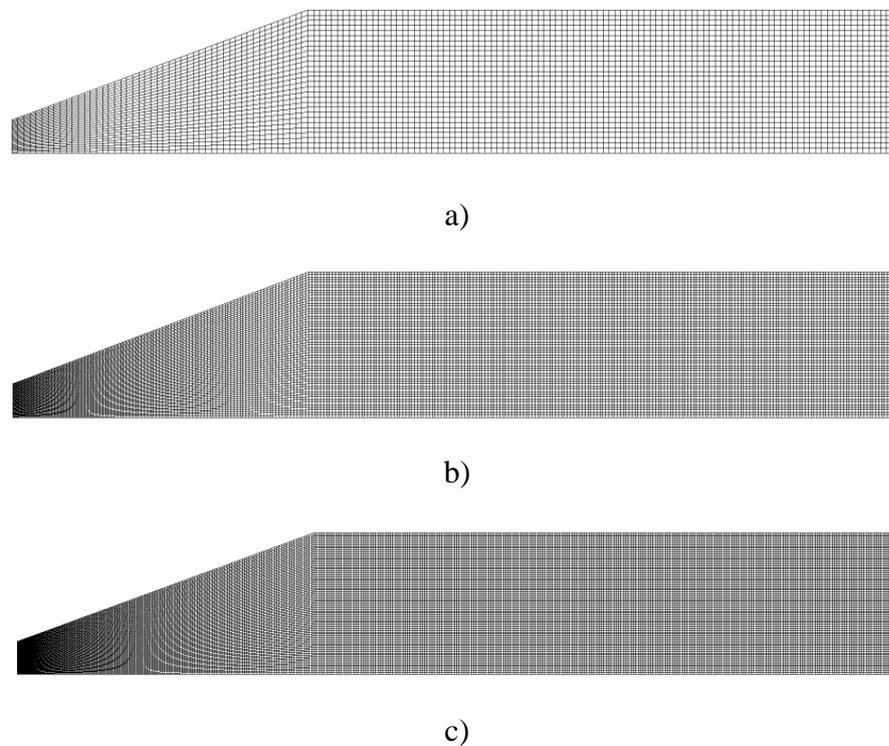
## 4.2. Metodologia computacional

### 4.2.1. Estudo da malha

Uma malha estruturada bidimensional foi criada, com eixo de simetria na direção axial, utilizando o software ANSYS ICEM CFD<sup>®</sup>. Inicialmente, uma malha contendo 8642 elementos foi criada. Posteriormente, esta malha foi dividida gerando outras malhas compostas por 16668 e 26492 elementos.

Os testes de malha foram realizados com uma velocidade 10% acima da velocidade de mínimo jorro, para as misturas com 25% em massa de casca de cacau na altura de 10 cm.

As malhas utilizadas estão dispostas na Figura 4.3.



**Figura 4.3** - Malhas computacionais a) Malha 1 com 8642 células b) Malha 2 com 16668 células c) Malha 3 com 26492 células

As simulações foram realizadas em 5 s em tempo real com passos de tempo de  $10^{-4}$ , sendo o critério de convergência  $10^{-3}$ .

#### 4.2.2. Modelos empregados nas simulações

As simulações foram realizadas com o software ANSYS FLUENT<sup>®</sup> 15.0. Para o acoplamento pressão-velocidade empregou-se o algoritmo SIMPLE. Em todas as equações do modelo o método de discretização Up-wind de 1<sup>a</sup> ordem foi utilizado. O critério de convergência adotado foi de  $10^{-3}$ . As simulações foram feitas em regime transiente, com passos de tempo de  $10^{-4}$ , totalizando ao final, 5 segundos de simulação em tempo real.

Na Tabela 4.2 é apresentado os modelos adotados no teste de malha e nas simulações.

**Tabela 4.2** - Modelos utilizados nos testes de malha e para as simulações

Abordagem Euler-Euler	Modelo Euleriano Granular Multifásico
Modelo de turbulência	k-ε disperso
Modelo de arraste	GIDASPOW et al. (1992)
Viscosidade granular	GIDASPOW
Viscosidade granular bulk	LUN et al. (1984)
Pressão de sólidos	LUN et al. (1984)
Distribuição radial	LUN et al. (1984)

As características dos materiais utilizados nas simulações estão dispostas na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3-** Características físicas do ar, areia e casca utilizados nas simulações

Densidade do ar	1,205 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade do ar	$1,82 \cdot 10^{-5}$ kg/m.s
Diâmetro da casca	2,58 mm
Diâmetro da areia	1,55 mm
Massa específica da casca	880 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica da areia	2645 kg/m <sup>3</sup>

O coeficiente de restituição adotado foi de 0,9. As simulações foram realizadas para misturas com frações mássicas de casca de cacau de 25, 50 e 75% nas alturas de leito estático de 6, 8 e 10 cm.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Resultados Experimentais

#### 5.1.1. Análise imediata e caracterização química da casca de cacau

As amostras de casca de cacau recém-retiradas das lavouras possuíam umidade de  $84,89\% \pm 0,09\%$ .

Na Tabela 5.1 estão apresentados os resultados experimentais para a análise imediata, contendo o teor de umidade, o teor de cinzas, o teor de voláteis e carbono fixo, e, o resultado da caracterização química, com o teor de extrativos, lignina, hemicelulose, celulose e pectina obtidos na caracterização da casca de cacau, assim como alguns valores encontrados na literatura.

**Tabela 5.1** - Resultados da análise imediata e da caracterização química da casca de cacau.

<b>Análise imediata da casca de cacau</b>			
Propriedade	Experimental	Literatura	Referência
Teor de umidade (%)	$6,3 \pm 0,2$	$8,5 \pm 0,6$	Vriesmann et al. (2011)
Teor de cinzas (%)	$8,3 \pm 0,4$	$6,70 \pm 0,02$	Vriesmann et al. (2011)
		$12,67 \pm 0,19$	Adeyi (2010)
Teor de voláteis (%)	$74,1 \pm 0,4$	68,5	Duku (2014)
Carbono fixo (%)	$17,6 \pm 0,8$	10,43	Duku (2014)
<b>Caracterização química da casca de cacau</b>			
Teor de extrativos (%)	$5,78 \pm 0,36$	-	-
Lignina (%)	$36,85 \pm 1,07$	$21,4 \pm 0,6$	Vriesmann et al. (2011)
		$14,7 \pm 0,35$	Daud et al. (2013)
Hemicelulose (%)	$19,96 \pm 0,44$	$12,75 \pm 0,96$	Marcel et al. (2011)
		$35,26 \pm 0,05$	Adeyi (2010)
Celulose (%)	$27,46 \pm 1,47$	$26,15 \pm 0,30$	Marcel et al. (2011)
		$41,92 \pm 0,09$	Adeyi (2010)
Pectina (%)	4,26	8 - 11	Adomako (1972)
		2 - 9	Vriesmann et al. (2011)

Como pode ser observado, os valores de composição diferem uns dos outros. Isso se deve ao fato das características da biomassa dependerem em grande parte de fatores como localização geográfica, idade da planta, clima e condições do solo.

No entanto, os valores obtidos neste trabalho para a composição da casca do cacau estão dentro ou muito próximos da faixa de valores observados por outros autores, exceto pela lignina. Para a determinação do carbono fixo, Duku (2014) realiza cálculos diferentes dos adotados neste trabalho, diminuindo no valor do carbono fixo o teor de umidade (10,29%) por ele encontrado. No caso do teor de extrativos não foi encontrado valores de referência na literatura.

### 5.1.2. Caracterização física das partículas

Na Tabela 5.2, encontram-se os resultados referentes ao diâmetro médio, esfericidade e massa específica aparente para as partículas de casca de cacau e areia.

**Tabela 5.2** - Resultados do diâmetro médio, esfericidade e massa específica aparente da casca de cacau e da areia.

	<b>Casca de cacau</b>	<b>Areia</b>
Diâmetro médio (mm)	2,58 ± 0,22	1,55 ± 0,15
Esfericidade	0,53 ± 0,09	0,70 ± 0,11
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,88 ± 0,03	2,64 ± 0,01
Massa específica real (g/cm <sup>3</sup> )	1,54 ± 0,01	-

Como pode ser verificado na Tabela 5.2, as partículas de casca de cacau apresentam maiores diâmetros e são menos densas do que as partículas de areia. Tais características afetam diretamente na segregação de partículas, como será abordado mais a seguir neste trabalho.

Partículas que se distanciam da forma esférica se acomodam de maneira mais desorganizada no leito de partículas, conseqüentemente, conferem ao leito maior número de espaços vazios. Dessa maneira, devido à esfericidade da casca de cacau ser menor do que a esfericidade da areia, leitos constituídos por maiores frações mássicas de casca apresentam maior porosidade.

Na Figura 5.1, estão expostas as partículas de casca de cacau com diâmetro médio de 2,58 mm e as partículas de areia com diâmetro médio de 1,55 mm utilizadas neste trabalho.



**Figura 5.1** - Partículas de casca de cacau com diâmetro médio de 2,58 mm e de areia com 1,55mm.

### 5.1.3. Porosidade

A Tabela 5.3 apresenta a porosidade média do leito de partículas composto por frações mássicas de casca de cacau e para um leito preenchido somente com partículas de areia.

**Tabela 5.3-** Porosidade média de leitos de partículas constituídos por diversas frações mássicas de casca de cacau.

<b>X (fração mássica de casca de cacau) na mistura areia-casca de cacau</b>	<b>Porosidade média</b>
0%	0,46 ± 0,01
10%	0,49 ± 0,00
20%	0,51 ± 0,02
25%	0,51 ± 0,00
30%	0,52 ± 0,01
40%	0,55 ± 0,00
50%	0,55 ± 0,00
60%	0,54 ± 0,00
70%	0,55 ± 0,01
75%	0,56 ± 0,01
80%	0,57 ± 0,01
90%	0,58 ± 0,01
100%	0,57 ± 0,01

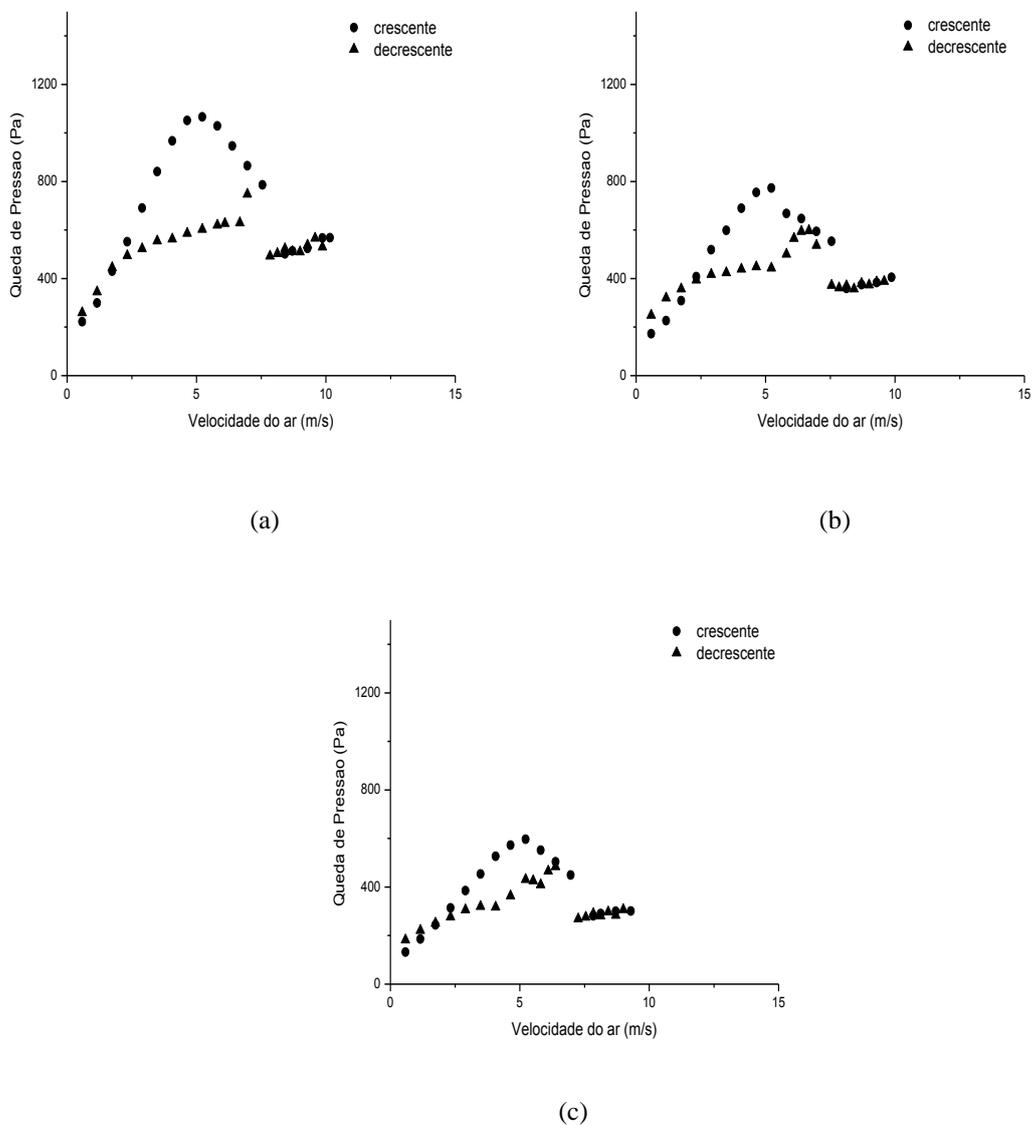
Nota-se que à medida que a fração mássica de areia aumenta, a porosidade sofre um decréscimo, como era esperado. Este comportamento da mistura caracteriza um mecanismo de preenchimento, onde a adição de partícula com uma esfericidade maior (areia) em um leito

formado com partículas de menor esfericidade (casca de cacau) diminui a porosidade do leito, como apontado por ZOU e YU (2003).

#### 5.1.4. Curva característica

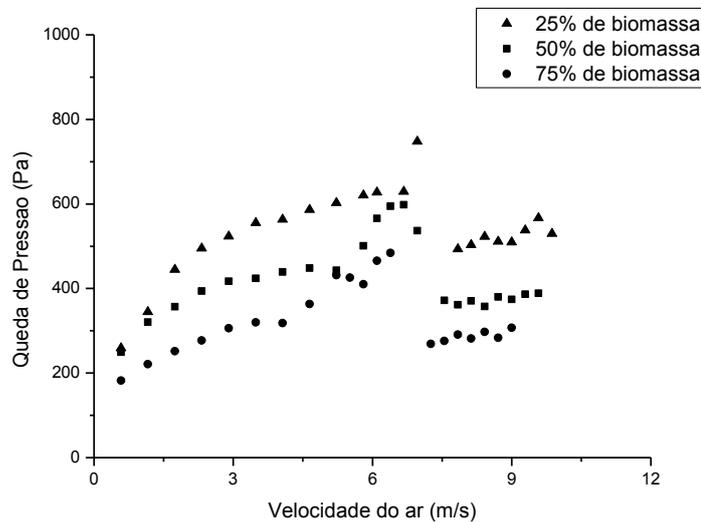
Para contribuir no escoamento das partículas, areia foi adicionada. Além disso, a areia serve como inerte no processo de pirólise, auxiliando nas transferências de calor.

Na Figura 5.2 encontra-se a queda de pressão no leito em função da velocidade do ar para uma altura de leito estático de 8 cm, nas frações mássica de casca de cacau de 25, 50 e 75%.



**Figura 5.2** - Curvas características para a altura de leito estático de 8 cm a) 25% de casca de cacau b) 50% de casca de cacau c) 75% de casca de cacau.

Na Figura 5.3 verifica-se o regime de jorro para a velocidade decrescente, sendo este período considerado o mais importante em uma análise fluidodinâmica, já que revela informações relevantes para um processo, como a velocidade de mínimo jorro.



**Figura 5.3** - Curvas características para altura de leito estático de 8 cm: velocidade decrescente.

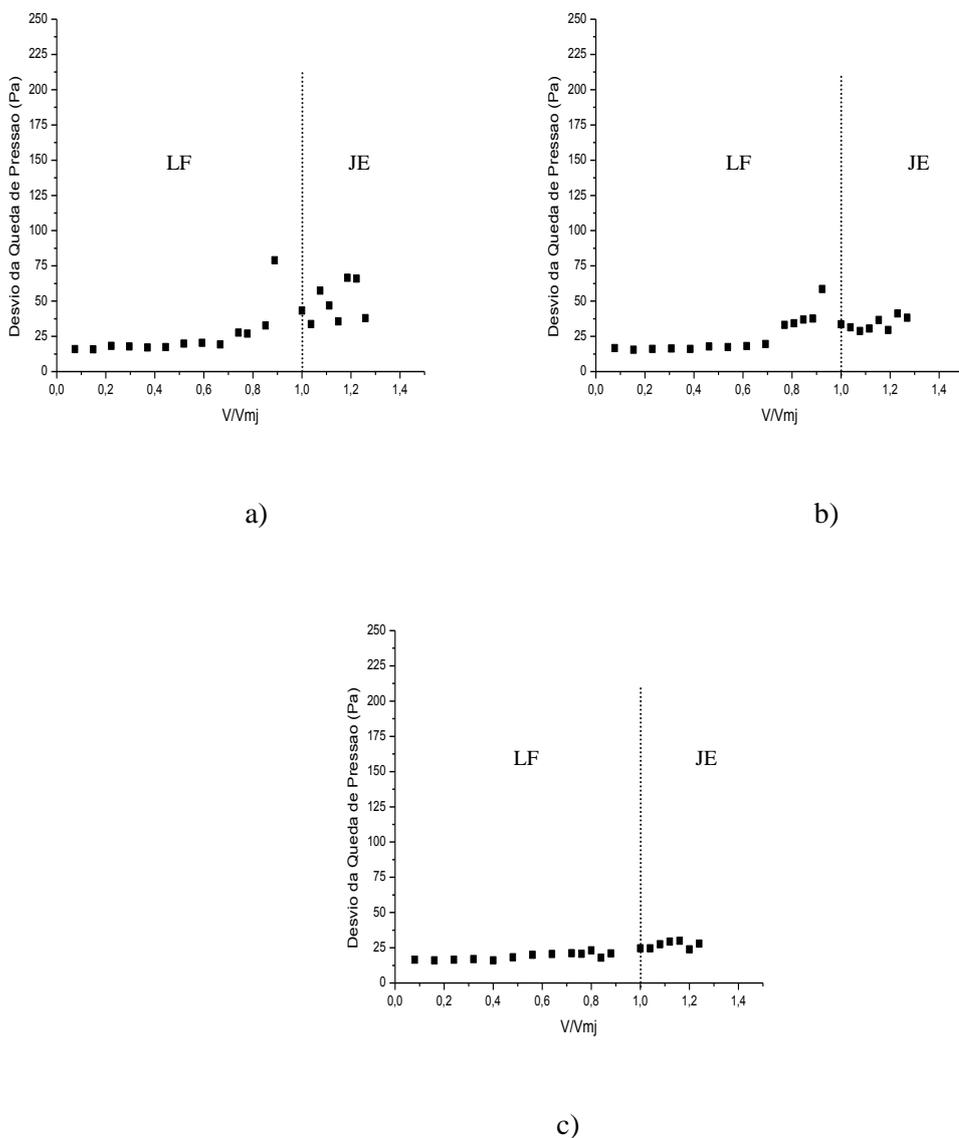
Como descrito por Mathur e Epstein (1974), as partículas apresentam uma queda de pressão praticamente constante durante o regime de jorro, ocorrendo uma elevação abrupta desta queda de pressão assim que este regime não é mais observado, e posteriormente, nota-se um comportamento típico de leito fixo onde a queda de pressão diminui linearmente com o decréscimo da velocidade.

As curvas expressam semelhantes comportamentos característicos deste fenômeno. A queda de pressão foi mais elevada no leito composto por menores frações mássicas de casca de cacau. Como a areia é um material mais denso do que a casca de cacau, o peso do leito no qual esta se encontra em grande quantidade é maior do que naqueles em que a fração mássica de casca predomina, assim, a pressão exercida para manter o regime de jorro deve ser superior.

Quanto à estabilidade do regime de jorro, percebem-se na curva características algumas oscilações na passagem do leito de jorro para o leito fixo. Por se tratar de uma mistura de partículas com diâmetros e densidades diferentes, tais oscilações são esperadas, já que as partículas se comportam de maneira diferente para uma mesma velocidade. Isso pode ser

verificado visualmente durante o procedimento, onde alturas de jorro variavam mesmo com uma velocidade constante.

Na Figura 5.4, encontram-se os desvios da queda de pressão no leito para a altura de leito estático de 8 cm em função de um adimensional de velocidade que permite visualizar melhor as regiões que dividem o regime de jorro estável ( $V/V_{mj} > 1$ ) das regiões de transição e leito fixo ( $V/V_{mj} < 1$ ). Através destas curvas é possível então verificar os regimes pelos quais as partículas são submetidas até alcançar o regime de jorro.



**Figura 5.4** - Desvios de queda de pressão em função de um adimensional de velocidade para altura de leito estático de 8 cm a) 25% de casca de cacau b) 50% de casca de cacau c) 75% de casca de cacau.

Como pode ser visto na Figura 5.4, o desvio da pressão se mantém constante até o momento da transição do leito fixo para o regime de transição. Neste período, ocorre a expansão do leito e a formação de uma cavidade que se transforma posteriormente em um jorro interno, acarretando flutuações maiores. Ao atingir o mínimo jorro, nota-se que o desvio se estabiliza permanecendo relativamente constante durante o regime de jorro. Portanto, mesmo com as flutuações da queda de pressão observadas na Figura 5.3, pode-se afirmar que a estabilidade do jorro foi alcançada já que os desvios de queda pressão durante este período apresentaram um comportamento análogo àqueles obtidos em um regime de jorro estável.

Nas alturas de leito estático de 6 e 10 cm foram observados comportamentos semelhantes ao apresentado para 8 cm. Portanto, a fluidodinâmica nestas condições pode ser explicada da mesma forma. As curvas características e os desvios da queda de pressão para estas alturas de leito estático encontram-se no Apêndice A.

#### 5.1.5. Velocidade de mínimo jorro e Queda de pressão de jorro estável

Para determinar quais fatores mais interferem na fluidodinâmica da casca de cacau foram realizadas análises estatísticas a partir do planejamento de experimentos, tendo como variáveis resposta a velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão do leito estável. As variáveis independentes selecionadas foram a fração mássica da casca de cacau e altura do leito estático. O nível de significância adotado foi de 5%.

As velocidades de mínimo jorro obtidas para cada altura de leito estático e fração mássica de casca de cacau estão expostas na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** - Velocidades de mínimo jorro para as frações mássicas de 25, 50 e 75% nas alturas de leito estático: 6, 8 e 10 cm.

<b>Velocidade de mínimo jorro (m/s)</b>			
<b>Fração mássica de casca de cacau</b>	<b>Altura do leito estático</b>		
	<b>6 cm</b>	<b>8 cm</b>	<b>10 cm</b>
<b>25%</b>	6,68	7,84	9,29
<b>50%</b>	6,39	7,55	9,29
<b>75%</b>	5,23	7,26	8,42

O erro experimental foi de 0,17m/s. Na Tabela 5.5 são apresentados os efeitos dos parâmetros para o modelo de regressão de velocidade de mínimo jorro, o desvio-padrão de cada efeito e o p-valor. Como pode ser observado, somente a média, o termo linear da fração mássica de casca e o termo linear da altura do leito estático foram significativas, com um p-valor inferior a 0,05.

**Tabela 5.5** - Efeitos, desvios-padrão e p-valor dos parâmetros para o modelo de regressão de velocidade de mínimo jorro.

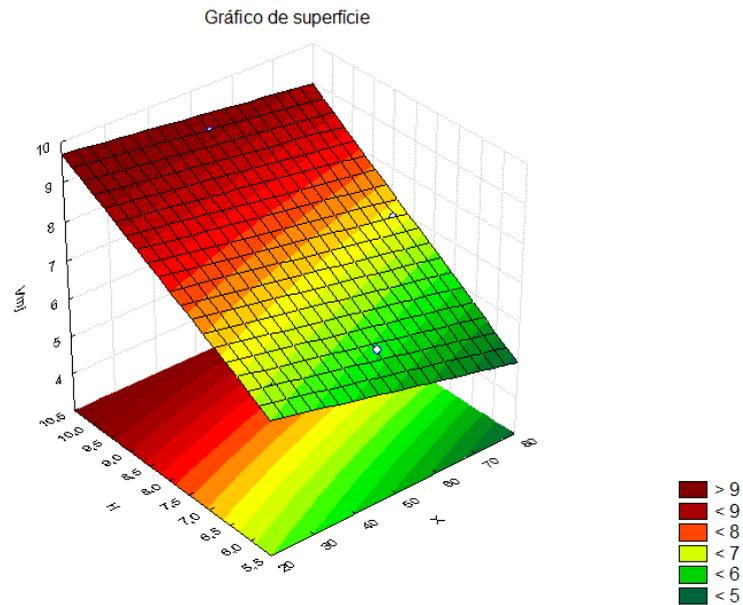
	<b>Efeito</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>p-valor</b>
Média	7,514	0,083	0,000
x <sub>1</sub>	-0,966	0,215	0,006
x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	0,182	0,165	0,320
x <sub>2</sub>	2,902	0,215	0,000
x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-0,106	0,165	0,549
x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	0,289	0,263	0,323

Dessa forma, a equação para estimar a velocidade de mínimo jorro pode ser descrita de acordo com a Equação 25, empregando somente os termos significativos.

$$V_{mj} = 3,839 - 0,048 \times x_1 + 1,451 \times x_2 \quad (25)$$

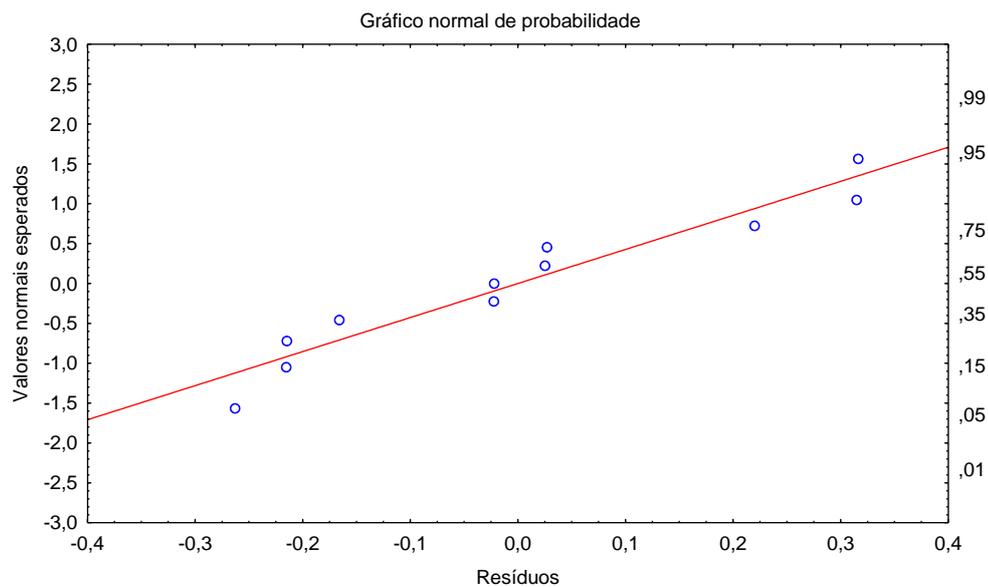
O coeficiente de determinação para esta estimação foi de 0,97, indicando que o modelo se enquadra de forma satisfatória aos dados experimentais.

Uma superfície resposta para a Equação 25 é exposta na Figura 5.5. Percebe-se que quanto maior a altura do leito estático, maior a velocidade de mínimo jorro. Com o acréscimo na quantidade de partículas no leito, necessita-se de maior vazão para o arraste dessas partículas e formação do jorro. Com relação à fração mássica de casca, verifica-se que na medida em que esta decresce maior torna-se a velocidade de mínimo jorro. Tal fato ocorre devido ao aumento da massa de partículas mais densas no leito.

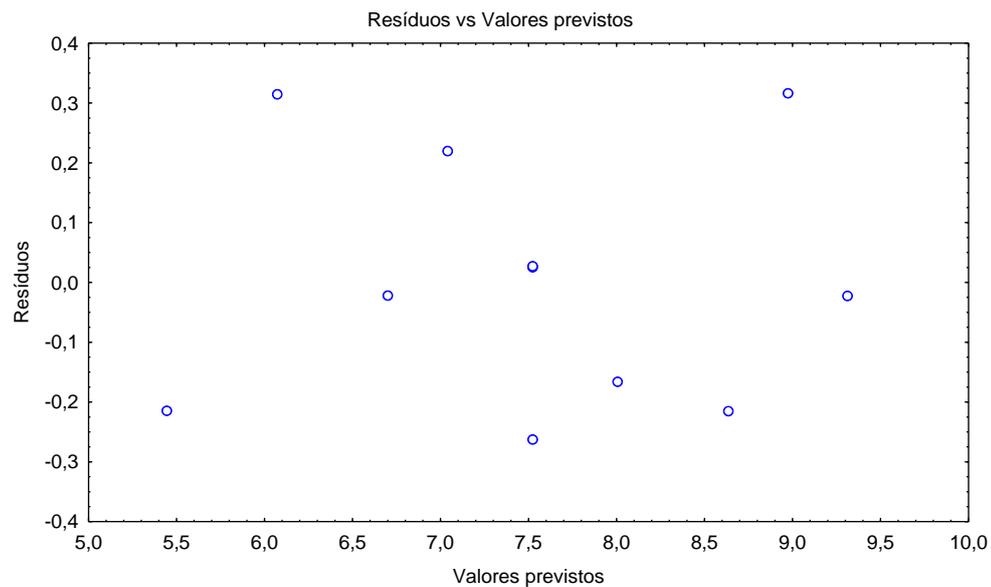


**Figura 5.5** - Superfície resposta para a velocidade de mínimo jorro

As Figuras 5.6 e 5.7 compõe a análise de resíduos para a Equação 25. A Figura 5.6 mostra o gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Como os pontos experimentais localizam-se próximos a linha contínua, a normalidade dos resíduos é observada. Já a Figura 5.7, gráfico de resíduos como função dos valores previstos, prova que os resíduos são independentes e aleatórios.



**Figura .5.6** - Gráfico de normalidade dos resíduos para a equação da velocidade de mínimo jorro.



**Figura 5.7** - Gráfico de resíduos vs valores previstos para a equação da velocidade de mínimo jorro.

As quedas de pressão de jorro estável para cada altura de leito estático e fração mássica de casca de cacau estão expostas na Tabela 5.6.

**Tabela 5.6** - Quedas de pressão de jorro estável para as frações mássicas de 25, 50 e 75% nas alturas de leito estático: 6, 8 e 10 cm.

<b>Queda de pressão de jorro estável (Pa)</b>			
<b>Fração mássica de casca de cacau</b>	<b>Altura do leito estático</b>		
	<b>6 cm</b>	<b>8 cm</b>	<b>10 cm</b>
<b>25%</b>	451,52	493,08	592,26
<b>50%</b>	324,02	372,13	428,67
<b>75%</b>	238,71	269,121	348,97

O erro experimental foi de 3,12 Pa. Os efeitos dos parâmetros significativos, assim como seus respectivos desvios e p-valor podem ser observados na Tabela 5.7. Como apontado na Tabela 5.7, o termo linear e o termo quadrático da fração mássica, e o termo linear da altura são significativos para o modelo, possuindo um p-valor menor do que 0,05.

**Tabela 5.7** - Efeitos, desvios-padrão e p-valor dos parâmetros estimados para o modelo de regressão de queda de pressão de jorro estável.

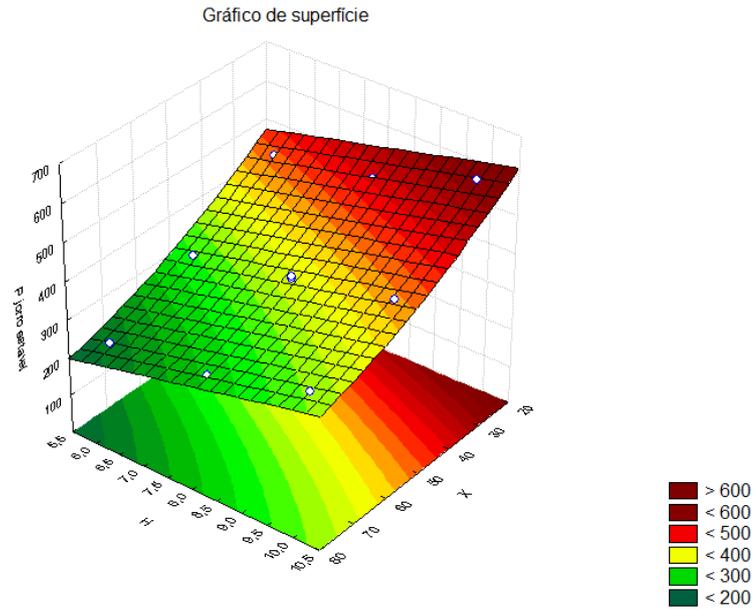
	<b>Efeito</b>	<b>Desvio-padrão</b>	<b>p-valor</b>
Média	392,567	3,46016	0,000000
x <sub>1</sub>	-226,687	8,96034	0,000002
x <sub>1</sub> <sup>2</sup>	-19,134	6,89484	0,039126
x <sub>2</sub>	118,549	8,96034	0,000044
x <sub>2</sub> <sup>2</sup>	-14,379	6,89484	0,091421
x <sub>1</sub> x <sub>2</sub>	-15,239	10,97413	0,223640

Dessa maneira, o modelo de regressão para estimação da queda de pressão no jorro estável da casca de cacau é dado pela Equação 26.

$$\Delta P_{\text{Jorro estável}} = 457,440 - 113,343 \times x_1 - 9,567 \times x_1^2 + 59,274 \times x_2 \quad (26)$$

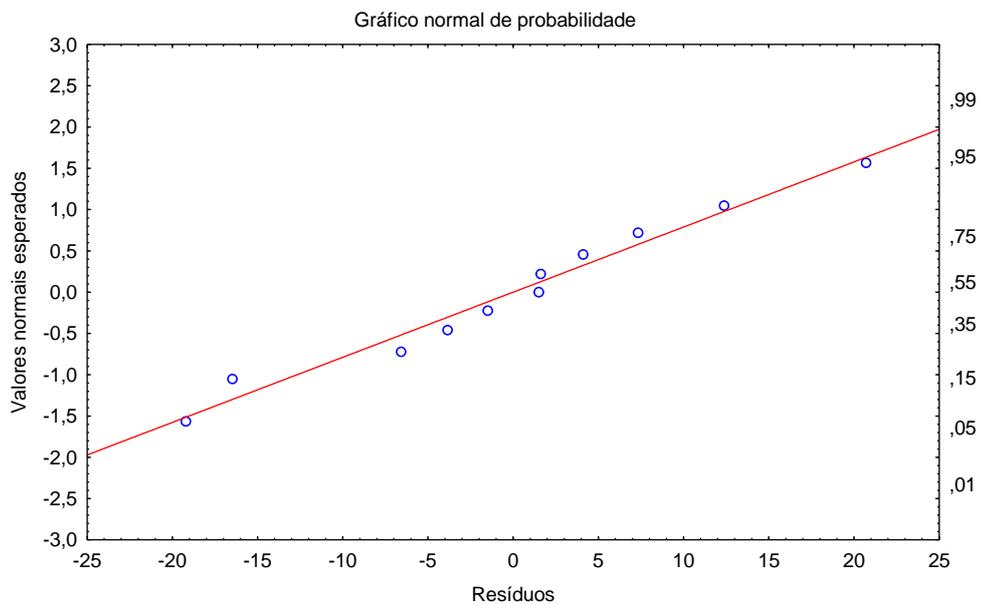
O coeficiente de determinação obtido foi 0,99.

Na Figura 5.8, o gráfico de superfície para a Equação 26 mostra que conforme a altura do leito estático é aumentada e um decréscimo na fração mássica de casca de cacau é realizado, maior torna-se a queda de pressão. Um incremento na altura do leito estático resulta em um acréscimo de partículas que acarretam em quedas de pressão maiores para manter o jorro. Quanto à redução da fração mássica da casca de cacau, esta pode ser explicada pela quantidade de areia presente no leito. Leitões que possuem uma maior porção de areia, demandam uma maior queda de pressão, uma vez que a areia é mais densa do que a casca de cacau colaborando para o aumento da resistência das partículas ao escoamento.

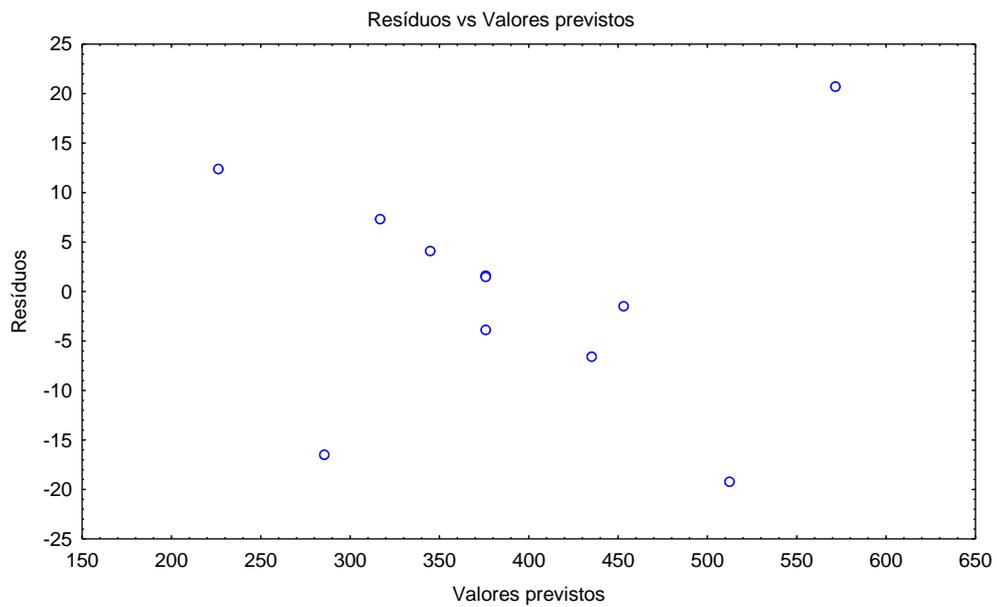


**Figura 5.8** - Gráfico de superfície para a queda de pressão de jorro estável.

Na Figura 5.9 e 5.10, os gráficos de normalidade dos resíduos e de valores previstos vs resíduos podem ser observados. Através destes dois gráficos verifica-se que os erros são aleatórios e distribuídos normal e independentemente.



**Figura 5.9** - Gráfico de normalidade dos resíduos para a equação da queda de pressão de jorro estável.

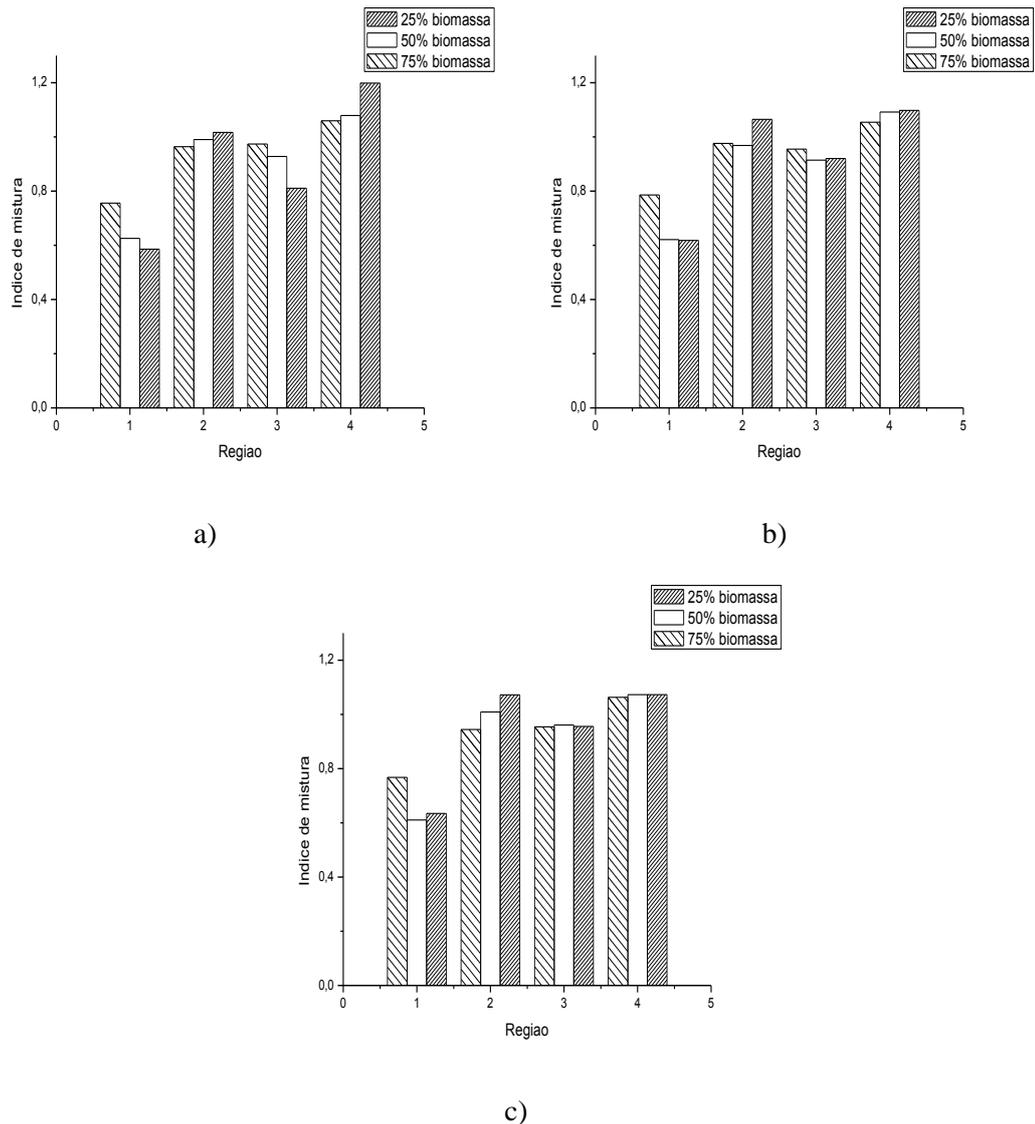


**Figura 5.10** - Gráfico de resíduos vs valores previstos para a equação da queda de pressão de jorro estável

### 5.1.6. Segregação

Na Figura 5.11 é apresentado o índice de mistura para cada região do leito nas diferentes frações mássicas e velocidades do ar, na altura de leito estático de 8 cm.

Observa-se que a segregação das partículas ocorre para todas as frações mássicas e velocidades do ar estudadas, apresentando índices de misturas diferentes de 1. No entanto, nota-se que, com exceção da região localizada na base do leito, a segregação se mostra em baixo nível.



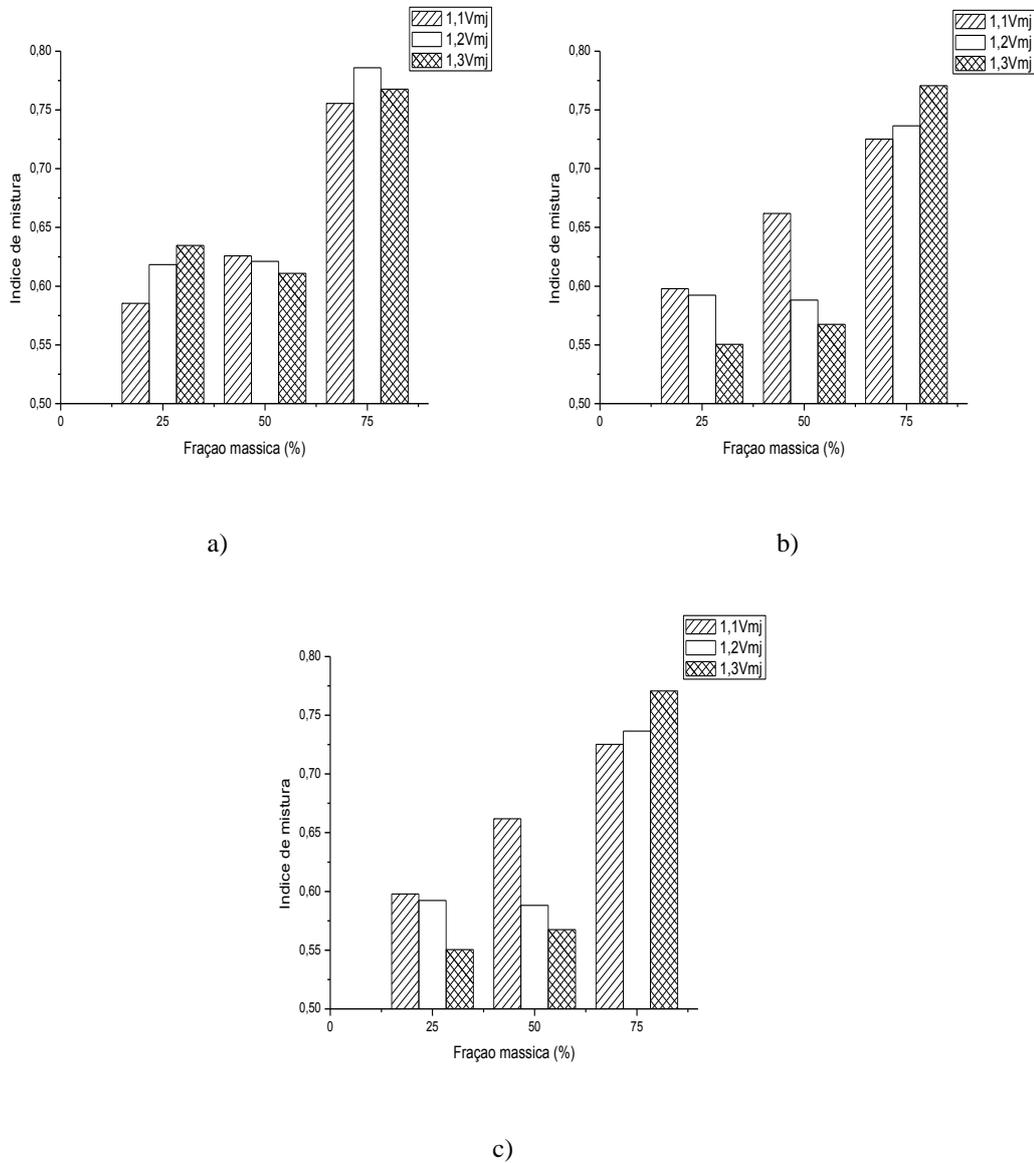
**Figura 5.11** - Índice de mistura para altura de leito estático de 8 cm a) 10% acima da  $V_{mj}$  b) 20% acima da  $V_{mj}$  c) 30% acima da  $V_{mj}$ .

As partículas menores e mais densas se mostram mais presentes no fundo do equipamento, enquanto as partículas maiores e menos densas permanecem na parte superior do leito. Isto significa que, neste caso, o fenômeno de segregação é predominantemente governado pela ação da inércia das partículas.

Verifica-se que maiores variações nos índices de mistura no topo do leito ocorrem para velocidades de entrada de ar mais baixa (10% acima da  $V_{mj}$ ), como já era esperado.

As alturas de 6 e 8 cm apresentaram comportamento semelhante ao exibido pela altura de 8 cm. Os gráficos referentes a estas alturas encontram-se no Apêndice A.

Na Figura 5.12 é exposto o índice de mistura para diferentes frações mássicas, velocidades de ar e alturas na região de fundo, onde a segregação de areia é mais predominante.



**Figura 5.12** - Índice de mistura para região de fundo a) 6cm b) 8cm c) 10cm.

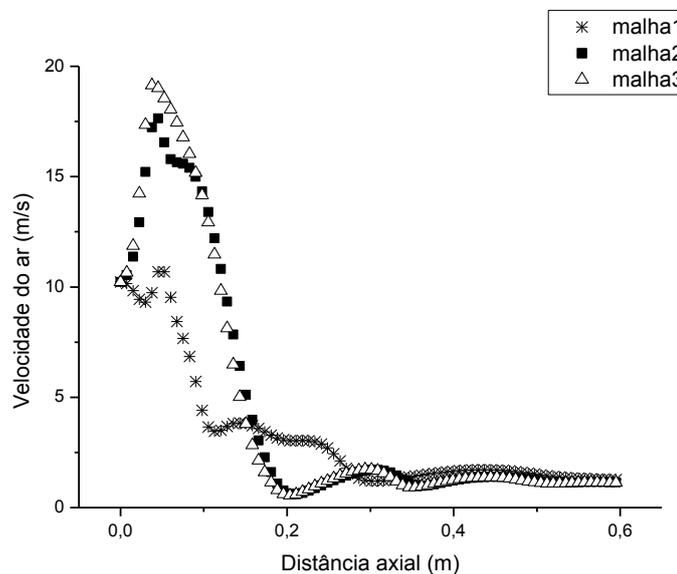
Por meio da Figura 5.12, é possível perceber que a segregação de areia se mostra mais evidente para menores frações mássicas de casca de cacau. Quanto a velocidade do ar, nota-se que não há a ocorrência de um padrão onde possa-se afirmar em qual velocidade a segregação tem maior predominância.

## 5.2. Resultados simulados

### 5.2.1. Teste da malha

A fim de determinar a malha mais propícia para realização das simulações, um teste de malha foi executado.

Na Figura 5.13 é apresentado o perfil de velocidade do ar em função da distancia axial para cada malha analisada. As malhas mostram comportamentos semelhantes, sendo a escolhida para realizar as simulações a malha 2, por ter um menor tempo de simulação quando comparado a malha 3 e apresentar um resultado muito próximo a malha mais refinada, indicando que um refinamento maior não é necessário.



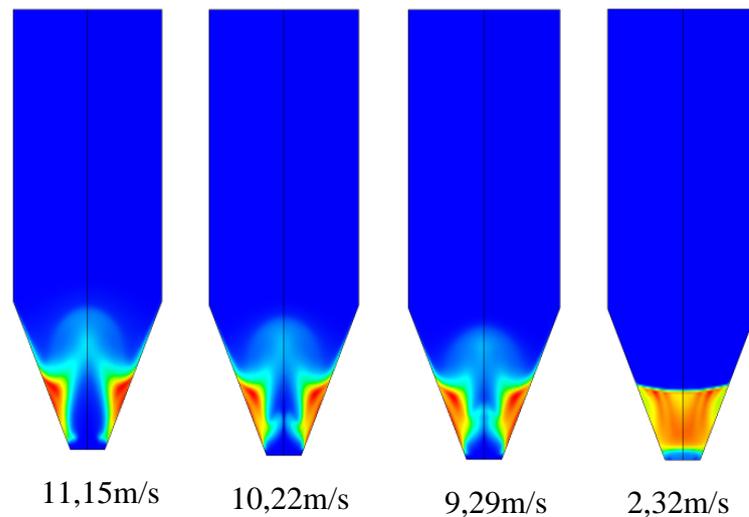
**Figura 5.13** - Perfil de velocidade do ar em função da distancia axial

### 5.2.2. Resultados qualitativos

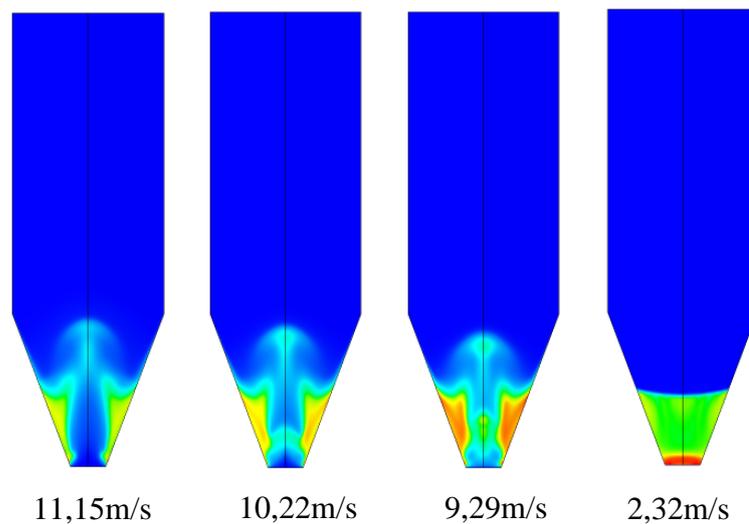
Após a escolha da malha, deu-se início as simulações das misturas binárias com frações mássicas de 25, 50 e 75% de casca de cacau.

Na Figura 5.14 têm-se os contornos de frações volumétricas para a casca de cacau e para a areia em diversas velocidades do ar na entrada do leito, nas seguintes condições: altura de leito estático 10cm e fração mássica de 25%. Esta fração foi escolhida por apresentar, dentre as frações estudadas, a melhor fluidodinâmica. Já a altura de 10cm compõe a mistura com maior quantidade de casca de cacau.

Por meio dos contornos de fração apresentados na Figura 5.14 é possível visualizar a transição do regime de jorro estável para o leito fixo de partículas, a medida que decréscimos na velocidade do ar de entrada são realizados. Na velocidade de 11,15m/s, verifica-se a formação das três regiões características do regime de jorro (região de jorro, região de fonte e região anular).



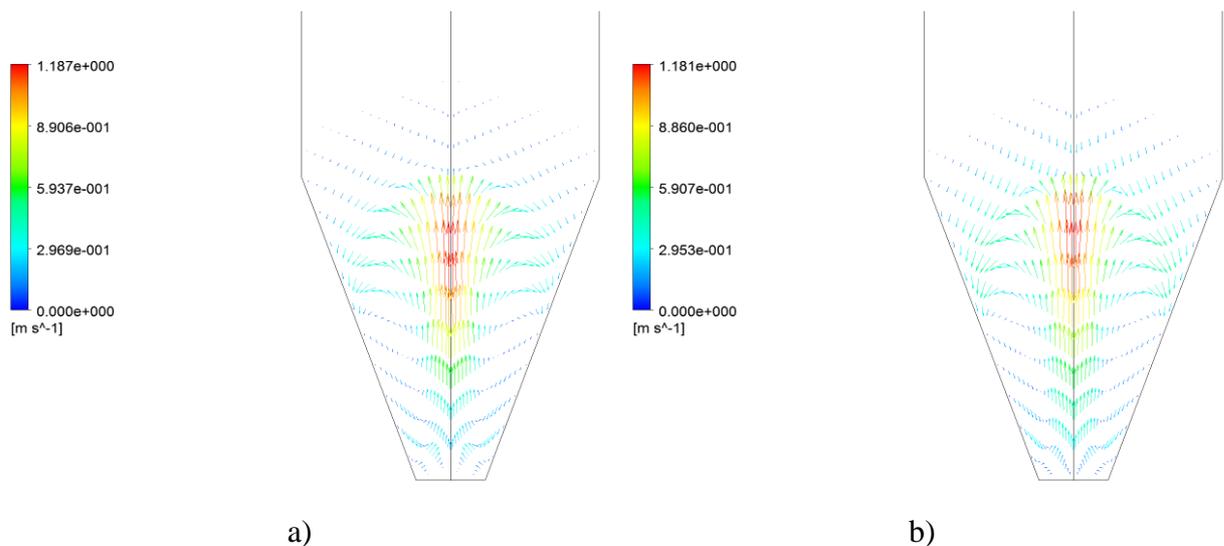
a)



b)

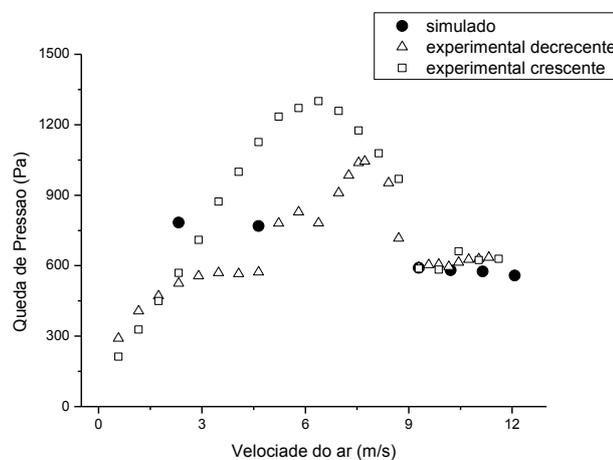
**Figura 5.14** - Contornos de frações volumétricas em diversas velocidades a) casca b) areia

O regime de jorro pode ser observado por meio do mapa de vetores de velocidade apresentado na Figura 5.15 para a casca de cacau e para a areia. Observando a orientação dos vetores e sua intensidade, verifica-se que as partículas seguem uma trajetória cíclica característica do regime de jorro, possuindo maior velocidade na região de jorro, e, ao alcançarem a região de fonte, as partículas de casca e areia desaceleram até atingir velocidade nula, então, mudam de direção e caem na região anular.



**Figura 5.15** - Vetores de velocidade a) casca de cacau b) areia

A Figura 5.16 apresenta a curva característica para composição de 25% de casca de cacau e 10 cm de leito estático, obtida experimentalmente e por simulação.



**Figura 5.16** - Curva característica experimental e simulada para  $X=25\%$  e  $H=10$  cm

Na região de jorro estável, os resultados simulados se assemelham aos obtidos nos experimentos. No entanto, nota-se que para região de leito fixo, a queda de pressão é superestimada, aproximando-se do valor referente à velocidade de ar crescente. Tal fato pode ser explicado devido ao mesmo princípio da queda de pressão na ida ser maior do que a queda de pressão na volta para construção da curva característica experimental. Ao iniciar o experimento, ao longo do aumento da velocidade, a pressão deve ser maior para romper o leito de partículas. A partir do jorro estável, decrescendo a velocidade, a queda de pressão é menor por não haver mais a necessidade da quebra do leito. No software, as partículas se encontram estáticas, e, portanto, necessita-se romper o leito de partículas. Como nas velocidades referentes ao leito fixo não ocorre esse rompimento, a queda de pressão acaba se tornando próxima a queda de pressão para a velocidade crescente experimental.

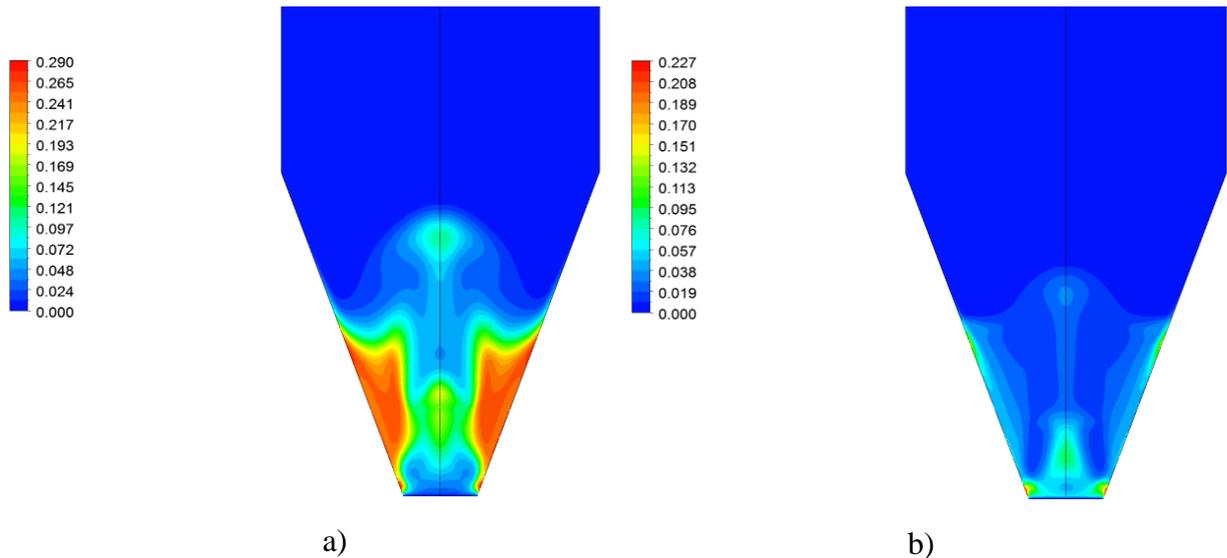
A Tabela 5.8 apresenta uma comparação entre os resultados experimentais e simulados da queda de pressão na velocidade de mínimo jorro experimental para todas as frações mássicas e alturas de leito estudadas neste trabalho.

**Tabela 5.8** – Comparação das quedas de pressão simuladas com a experimental para as velocidades de mínimo jorro

H (cm)	X (%)	Vmj (m/s)	Queda de pressão simulada (Pa)	Queda de pressão experimental (Pa)	Erro relativo (%)
6	25	6.68	368,68	451,52	18,3
8	25	7.84	486,18	493,08	1,4
10	25	9.29	590.60	592,26	0,3
6	50	6.39	246.13	324,02	24,0
8	50	7.55	321,97	372,13	13,5
10	50	9.29	380.47	428,67	11,2
6	75	5.23	202.85	238,71	15,0
8	75	7.26	245.75	269,12	8,7
10	75	8.42	289.63	348,97	17,0

Os valores simulados subestimam as quedas de pressão em todas as condições. Este fato ocorre devido as partículas apresentarem diâmetros muito distintos. Além disso, a massa específica da areia e da casca de cacau também diferem muito uma da outra. Vale ressaltar que o FLUENT<sup>®</sup> considera as partículas esféricas, podendo também ser umas das razões para as diferenças da pressão experimental e simulada.

A Figura 5.17 mostra o contorno das frações volumétrica das partículas de areia (partículas de menor diâmetro) para as frações mássicas de casca de 25% e 75%. Percebe-se que as partículas de areia se localizam em sua maioria na região próxima as paredes e ao fundo. No entanto, para a fração mássica de 25%, a areia se mostra muito mais presente nessas regiões do que na fração de 75%, caracterizando um fenômeno de segregação maior para a menor fração mássica de casca. Tal fato está de acordo com o observado experimentalmente.



**Figura 5.17** - Contorno de fração volumétrica para areia a) fração mássica de 25% de casca de cacau b) fração mássica de 75% de casca de cacau

## 6. CONCLUSÕES

O estudo experimental da fluidodinâmica da mistura de partículas de casca de cacau e areia, juntamente com a avaliação da segregação e a análise estatística realizada permitiu as seguintes conclusões:

- Com relação à caracterização da casca, conclui-se que os valores obtidos experimentalmente neste trabalho estão de acordo com os dados encontrados na literatura.
- Tem-se um escoamento estável das partículas com flutuações na queda de pressão de acordo com o esperado para um regime de jorro estável para frações mássicas de casca de cacau de 25, 50 e 75% e alturas de leito estático de 6, 8 e 10 cm.
- A velocidade de mínimo jorro e a queda de pressão de jorro estável são afetadas tanto pela fração mássica de casca de cacau quanto pela altura do leito estático. Um aumento na altura do leito estático eleva a queda de pressão, enquanto acréscimos na fração mássica de partículas de casca de cacau ocasionam uma diminuição na queda de pressão. Na velocidade de mínimo jorro o mesmo pode ser observado, quando ocorrem acréscimos na fração mássica, diminui-se a velocidade de mínimo jorro. Já a altura se mostra diretamente proporcional.
- A segregação das partículas se mostra mais presente na parte inferior do leito. Partículas mais densas e com menores diâmetros, isto é, a areia, localizam-se em sua maioria na base do equipamento, já as partículas maiores e menos densas encontram-se em maior proporção no topo do leito.
- As simulações CFD reproduziram o comportamento de leito de jorro observado experimentalmente para as condições de fração mássica de casca de cacau e altura de leito de jorro estudadas neste trabalho.
- A curva característica simulada para a menor fração mássica e maior altura avaliada neste trabalho se mostrou condizente com a curva obtida experimentalmente, sendo observado no leito fixo quedas de pressão próximas aos valores alcançados na velocidade crescente.
- Assim como visto nos experimentos, as simulações apontaram maior concentração de partículas de areia na região do fundo do leito, sendo a segregação mais predominante para as menores frações mássicas de casca.

A utilização da casca de cacau para a pirólise mostra-se favorável do ponto de vista do comportamento das partículas dentro do leite. A segregação das misturas é aceitável, pois mostra que apesar de haver a segregação, esta não ocorreu demasiadamente, comprovando o elevado grau de mistura que este equipamento proporciona.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEYI, O. Proximate composition of some agricultural wastes in Nigeria and their potential use in activated carbon production. **J. Appl. Sci. Environ. Manage**, v. 14, 2010.

ADOMAKO, D. Cocoa pod husk pectin. **Phytochemistry**, v. 11, p. 1145-1148, 1972.

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

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas da energia elétrica 2007**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 24 jun. 2014.

ANSYS FLUENT Theory Guide. Multiphase Flows. ANSYS, Inc. 2013.

BACELOS, M.S. **Análise do comportamento da fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de tamanho de partículas**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

BASU, P. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. **Academic Press**, 376 p, 2010.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço energético nacional 2015. Rio de Janeiro, 2015.

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.

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

BRANDÃO, E. M.; ANDRADE, C. T. Influência de fatores estruturais no processo de gelificação de pectinas de alto grau de metoxilação. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. 2009.

BRIDGWATER, A. V. Upgrading biomass fast pyrolysis liquids. **Environ. Prog. Sustainable Energy**, v. 31, p. 261–268, 2012.

BRIDGWATER, T. Biomass for energy. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 86, n. 12, p. 1755-1768, 2006.

CAMARGO, F. L. **Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

CEPLAC – Comissão executiva do plano da lavoura cacauera. Disponível em: <<http://www.ceplac.gov.br/radar/cacau.htm>>. Acesso em 28 ago. 2015.

CEPLAC - Comissão executiva do plano da lavoura cacauera. **Cacau – Informações de mercado. 2013**. Disponível em <<http://www.ceplac.gov.br>>. Acesso em 28 ago. 2015.

CHEPOTE, R. E. Efeito do composto da casca do fruto de cacau no crescimento e produção do cacauero. **Agrotrópica**, v. 15, p. 1-8, 2003.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Proposta de Preços Mínimos Safra 2013/2014 (Produtos da safra de verão)**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_11\\_22\\_15\\_25\\_35\\_pm\\_sociobio\\_13\\_14.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_11_22_15_25_35_pm_sociobio_13_14.pdf)>. Acesso em 28 ago. 2015.

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

DU, W.; BAO, X. XU, J. WEI, W. Computational fluid dynamics (CFD) modeling of spouted bed: Influence of frictional stress, maximum packing limit and coefficient of restitution of particles. **Chemical Engineering Science**, v. 61, p. 4558 – 4570, 2006.

DUARTE, C. R.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. A fluidodinâmica computacional aplicada ao leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Fenômenos de transporte em sistemas particulados: fundamentos e aplicações**. 1ª Ed. São Carlos: Suprema, 2009. p. 201-236.

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, MG, 2006.

DUKU, M. S. **Bio-oil production from lignocellulosic biomass using fast pyrolysis in a fluidized-bed reactor**. Tese (Doutorado em Madeira, Ciência e Tecnologia). Universidade de Ciência e Tecnologia Kwame Nkrumah, Gana, 2014.

ELOY, E. **Quantificação e caracterização da biomassa florestal em plantios da rotação**. Tese (Mestrado em Agronomia), Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2013.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Procedimentos para análise lignocelulósica**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2010.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Rio de Janeiro : EPE, 2014.

EPSTEIN, N.; GRACE, J.R. Particle mixing and segregation. In: **Spouted bed and spouted-fluid beds: Fundamentals and Applications**. New York: Cambridge University Press, 2011. cap. 8, p. 141-157.

FIGUEIREDO, A. L. **Pirólise termoquímica de pós de fibra de coco seco em um reator de cilindro rotativo para produção de bio-óleo**. 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.

FREIRE, E. S.; ROMEU, A.P.; PASSOS, F.V. et al. **Aproveitamento de resíduos e subprodutos da pós-colheita do cacau**. Ilhéus: CEPLAC/CEPEC, 1990. 24p.

FREIRE, J. T. Secagem de pastas em leito de jorro. In: FREIRE, J. T.; SARTORI, D. J. M. **Tópicos especiais em secagem**. 1ª Ed. São Carlos: Gráfica da UFSCar, 1992. p. 41- 85.

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

GONZALES, A. D.; VITAL, A. V.; LIMA, J. M.; RODRIGUES, M. B. Desenvolvimento sustentável para o resgate da cultura do cacau baseado no aproveitamento de resíduos. **Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente**, v. 1, n. 2, p. 41-52, 2013.

GRACE, J.R., KUTLUOGLU, E., MURCHIE, K.W., CAVANAGH, P.H. Particle segregation in spouted beds. **Can. J. Chem. Eng.**, v. 61, p. 308–316, 1983.

HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. São Paulo: UNICAMP, 2005. p. 26.

HOSSEINI, S.H; AHMADI, G.; OLAZAR, M. CFD simulation of cylindrical spouted beds by the kinetic theory of granular flow. **Powder Technology**, v. 246, p. 303-316, 2013.

ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, **Production of cocoa beans**, v. 41, n. 2, 2015.

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Cacau**. Disponível em: < [http://www.incaper.es.gov.br/pedeag/setores05\\_02.htm](http://www.incaper.es.gov.br/pedeag/setores05_02.htm) > Acesso em: 28 ago. 2015.

INEE – INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. **Projeto carvão verde – Fazenda São Domingos**. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/biomassa\\_carvao.asp?Cat=biomassa](http://www.inee.org.br/biomassa_carvao.asp?Cat=biomassa)>. Acesso em: 14 set. 2015.

ISHIKURA, T., NAGASHIMA, H., IDE, M., Hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particules, **Powder Technology**, v. 131, p.56-65, 2003

KAUSHAL, P.; ABEDI, J. A simplified model for biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 16, p. 748–755, 2010.

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

LESCANO, C.A.A. **Análise da secagem de resíduo de leite de soja “okara” em secadores de leite de jorro e de cilindro rotativo assistido a microondas**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2009.

LIMA, P.M. **Análise da fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro com alimentação contínua de sólidos pela base**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2004.

LIU, Y.; SHI, J.; LANGRISH, T. A. G. Water-based extraction of pectin from flavedo and albedo of orange peels. **Chemical Engineering Journal**, v. 120, p. 203-209, 2006.

LOURENÇO, R. O. **Identificação e monitoramento de regimes de escoamento em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2006.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado em Ciências Físico-Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

MARCEL, B. K. G.; ANDRE, K. B.; THEODORE, D.; SERAPHIN, K. Waste and by-products of cocoa in breeding: Research synthesis. **Int. J. Agr. & Agri. R.**, v. 1, p. 9-19, 2011.

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.

MATHUR, K. B., EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. Academic Press Inc. LTD., New York, 304p., 1974.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. **Bioresour. Technol.** 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**. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, 2014.

MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; OLIVARES, E.; BARBOZA, L. A.; BROSSARD, L. E.; BROSSARD JUNIOR, L. E. Pirólise rápida em leito fluidizado: uma opção para transformar biomassa em energia limpa. **Revista Analytica**, n 4, p. 32-36, 2003.

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

MOLLEA, C.; CHIAMPO, F.; CONTI, R. Extraction and characterization of pectins from cocoa husks: A preliminary study. **Food Chemistry**, v. 107, p. 1353–1356, 2008.

OASMAA, A.; CZERNIK, S. Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils - State of the Art for the End Users. **Energy Fuels**, v. 13, p. 914-921, 1999.

PEREIRA, I. O. **Viabilidade da utilização da casca de cacau como combustível no aquecimento de ar para secagem de amêndoas de cacau**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2013.

PINILLA, J. L.; UTRILLA, R.; LÁZARO, M. J.; SUELVES, I.; MOLINER, R.; PALACIOS, J. M. A novel rotary reactor configuration for simultaneous production of hydrogen and carbon nanofibers. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, p. 8016 – 8022, 2009.

PIRES, A.; FERNÁNDEZ Y FERNANDEZ, E.; BUENO, J. **Política Energética para o Brasil: propostas para o crescimento sustentável**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 2006. p.37.

POUOMOGNE A, V.; TAKAM , G., POUEMEGNE, J. A preliminary evaluation of cacao husks diets for juvenile Nile tilapia ( *Oreochromis niloticus*). **Aquaculture**, v. 156, p. 211-219, 1997.

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

SANTANA, E. B. **Análise experimental do comportamento fluidodinâmico da secagem de sementes de linhaça (*Linum usitatissimum* L.) em leito de jorro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SANTOS, D. A. **Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro – Estudos experimentais e de simulação via CFD**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Quim. Nova**, v. 35, p. 1004-1010, 2012.

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

SHUYAN, W., HUILIN, L., XIANG, L., JIANZHI, W., YUNHUA, Z., YUNLONG, D., Discrete particle simulations for flow of binary particle mixture in a bubbling fluidized bed with a transport energy weighted averaging scheme. **Chemical Engineering Science**, v. 64, p. 1707-1718, 2009.

SILVA NETO, P. J.; MATOS, P. G. G.; MARTINS, A. C. S.; SILVA, A. P. **Sistema de produção de cacau para a Amazônia brasileira**. Belém, CEPLAC, 2001. 125 p.

SMITH, O. B. **Solutions to the practical problems of feeding cocoa-pods to ruminants**. FAO corporate document repository, 2011.

SODRÉ, G. A.; VENTURINI, M. T.; RIBEIRO, D. O.; MARROCOS, P. C. L. Extrato da casca do fruto do cacauzeiro como fertilizante potássico no crescimento de mudas de cacauzeiro. **Rev. Bras. Frutic.**, v. 34, n. 3, p. 881-887, 2012.

VIEIRA NETO, J. L. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo *draft*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2007.

VOIGT, M. **Conversion of cocoa shells into valuable products**. Disponível em: <[http://www.probat.com/fileadmin/user\\_upload/Files/Conncting\\_Markets\\_Cocoa/Conversion\\_of\\_Cocoa\\_Shells\\_into\\_Valuable\\_Products.pdf](http://www.probat.com/fileadmin/user_upload/Files/Conncting_Markets_Cocoa/Conversion_of_Cocoa_Shells_into_Valuable_Products.pdf)>. Acesso em 28 ago. 2015

VRIESMANN, L. C.; AMBONI, R. D. M. C.; PETKOWICZ, C. L. O. Cacao pod husks (*Theobroma cacao* L.): Composition and hot-water-soluble pectins. **Industrial Crops and Products**, v. 34, p. 1173– 1181, 2011.

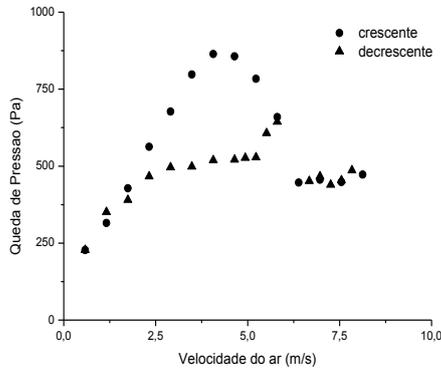
WANG, Z.G; BI, H.T; LIM, C.J. Numerical simulations of hydrodynamic behaviors in conical spouted beds. **China Particuology**, v.4, n. 3–4, p.194-203, 2006.

YAMAN, S. Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. **Energy Conversion and Management**, v. 45, n. 5, p. 651–671, 2004.

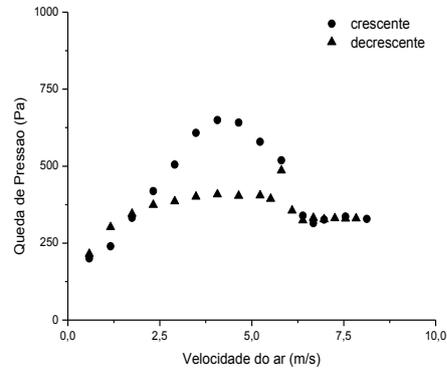
ZOU, R.; YU, A. Porosity calculation of mixtures of fibrous particles. **China particuology**, v.1, p.27-32, 2003.

## APÊNDICE A

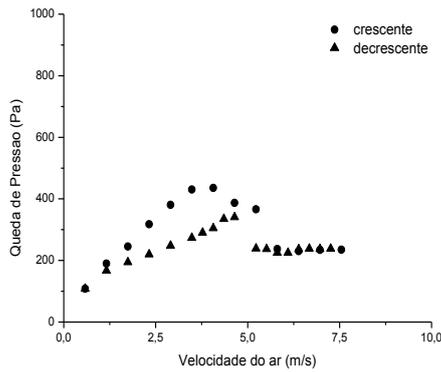
Na Figura A1 são expostas as curvas características para as alturas de leito estático de 6 e 10 cm.



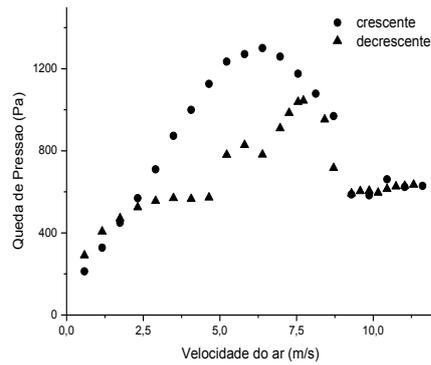
a)



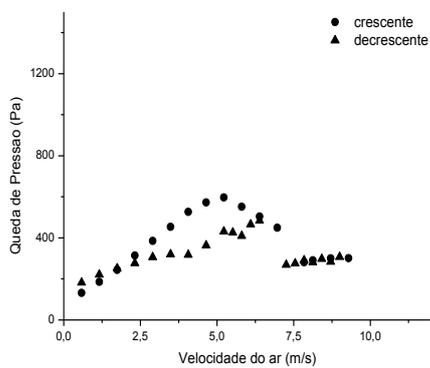
b)



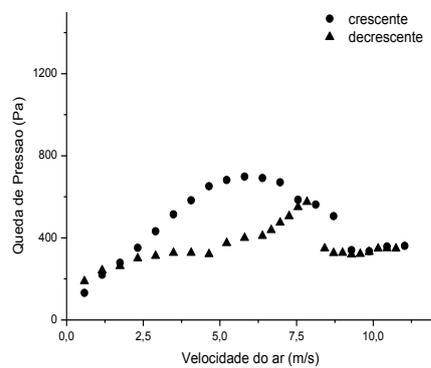
c)



d)



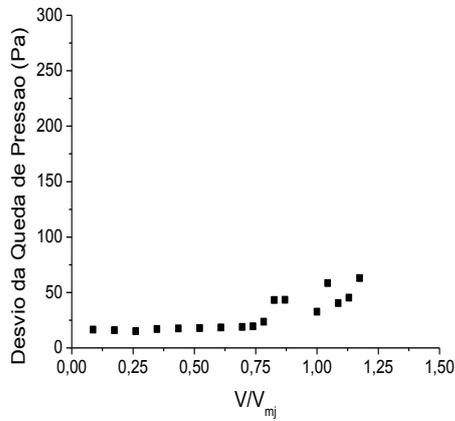
e)



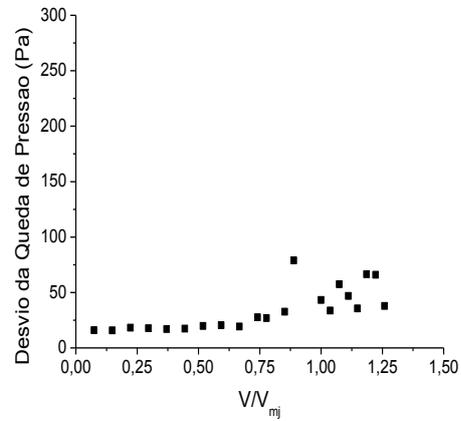
f)

**Figura A 1** - Curvas características a) altura de 6 cm e fração mássica de 25%, b) altura de 6 cm e fração mássica de 50%, c) altura de 6 cm e fração mássica de 75%, d) altura de 10 cm e fração mássica de 25%, e) altura de 10 cm e fração mássica de 50%, f) altura de 10 cm e fração mássica de 75%.

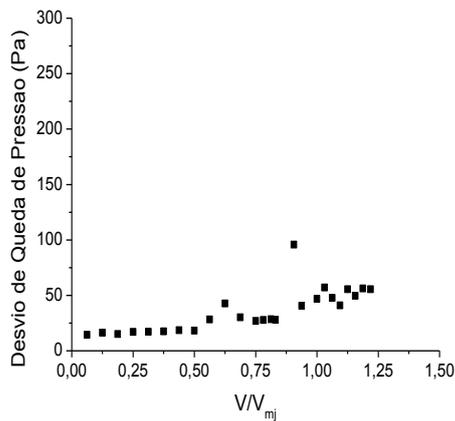
Na Figura A2 estão apresentados os desvios de queda de pressão para as alturas de leito estático 14 e 16 cm.



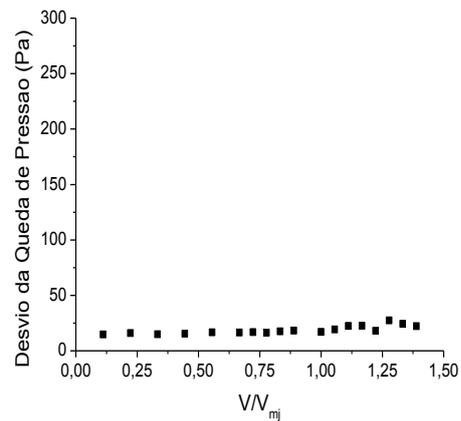
a)



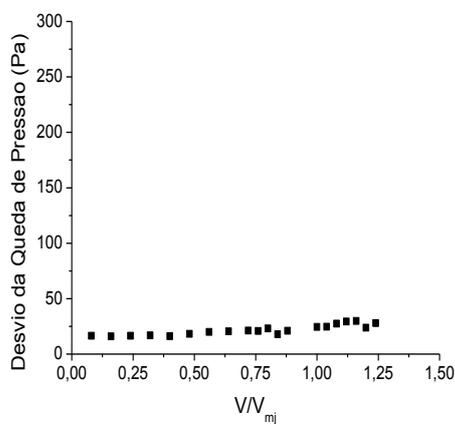
b)



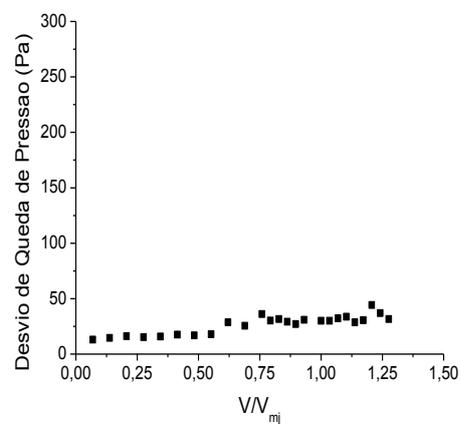
c)



d)



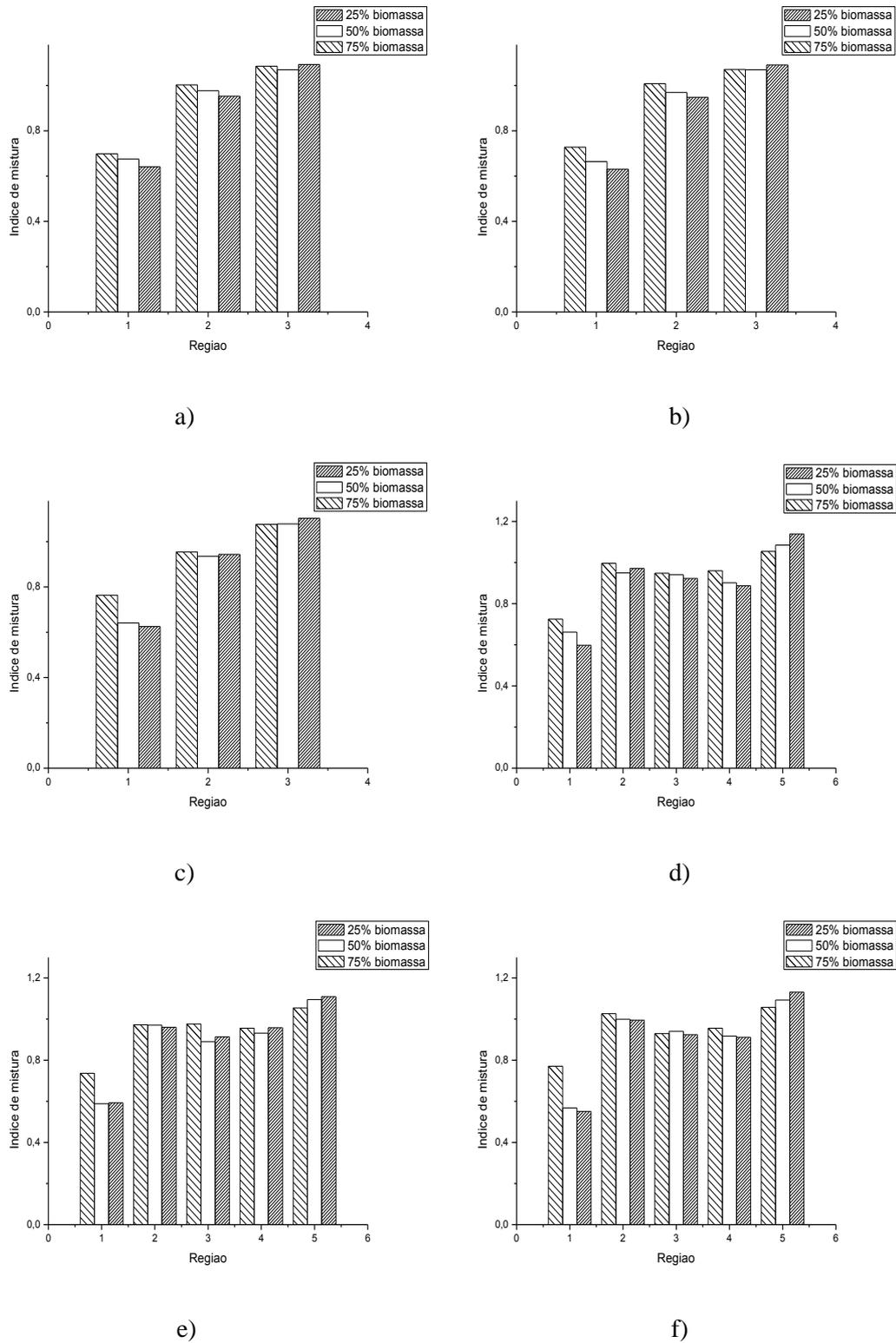
e)



f)

**Figura A 2** - Desvio da queda de pressão em função da velocidade a) altura de 6 cm e fração mássica de 25%, b) altura de 6 cm e fração mássica de 50%, c) altura de 6 cm e fração mássica de 75%, d) altura de 10 cm e fração mássica de 25%, e) altura de 10 cm e fração mássica de 50%, f) altura de 10 cm e fração mássica de 75%

Na Figura A3 estão apresentados os índices de mistura para as alturas de leito estático de 6 e 10 cm.



**Figura A 3** - Índice de mistura a) altura de 6cm e 10% acima da Vmj b) altura de 6cm e 20% acima da Vmj c) altura de 6cm e 30% acima da Vmj d) altura de 10cm e 10% acima da Vmj e) altura de 10cm e 20% acima da Vmj f) altura de 10cm e 30% acima da Vmj.

