

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENAÇÃO DE PESQUISA

Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC

ESTUDO DA FLUIDODINÂMICA E DA SECAGEM DE RESÍDUOS
DO PROCESSAMENTO DO CACAU EM LEITO FLUIDIZADO

Área do conhecimento: Engenharia Química

Subárea do conhecimento: Operações Industriais e Equipamentos para
Engenharia Química

Especialidade do conhecimento: Operações de separação e mistura

Bolsista: Albert Santos Macedo
Orientador: Manoel Marcelo do Prado
Departamento de Engenharia Química

Relatório Final

Período
2016/2017

Este projeto é desenvolvido com bolsa de iniciação científica

PIBIC/CNPq

RESUMO

O aproveitamento energético de resíduos do cacau gerados em seu processamento tem despertado os interesses científico e econômico mundiais nos últimos anos. Sabendo-se que 80% do cacau é correspondente à casca, principal resíduo, e que este não é utilizado na produção dos chocolates e demais produtos de confeitoraria, têm sido buscadas alternativas que possibilitem a utilização deste resíduo para a geração de biomassa. Por se tratarem de produtos de alto consumo em todo o mundo, os chocolates e afins vêm tendo seus processos de beneficiamento estudados a fim de que sejam desenvolvidas formas de melhoramento dos níveis de compostos fenólicos e sabor no produto final. Dentre esses processos, as etapas de fermentação, secagem e torrefação são as que mais contribuem com a perda desses compostos. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar a viabilidade da utilização dos resíduos gerados no beneficiamento para geração de biomassa através da secagem em leito fluidizado, e ainda, analisar o comportamento fluidodinâmico dos “nibs” de cacau em leito fluidizado para a uma possível aplicação na etapa de torrefação. Devido à estiagem no sul da Bahia, houve ausência de material-resíduo para os experimentos referentes à biomassa. Sendo assim, fez-se a caracterização física dos “nibs” de cacau, avaliando o diâmetro médio, esfericidade e ângulo de repouso, foi feito o estudo fluidodinâmico em leito fluidizado usando três cargas (300, 450 e 600 g) de particulado, bem como a umidificação e secagem dos “nibs” em leito fluidizado utilizando a velocidade de mínima fluidização e o dobro do seu valor. Com isso, avaliou-se o modelo granulométrico RRB como o mais adequado e classificaram-se os “nibs” como partículas do tipo D no grupo de Geldart. Os números de Froude foram de 159, 160 e 153 para as cargas de 300, 450 e 600, respectivamente. Enquanto a velocidade de mínima fluidização se manteve igual a $1,53 \pm 0,02$ m/s com as diferentes cargas estudadas. Na secagem dos “nibs” foi perceptível a influência da velocidade do ar apenas nos primeiros instantes da secagem, pois, em seguida, o processo passa a ser governado pelo mecanismo difusivo.

PALAVRAS CHAVE: Biomassa, parâmetros de fluidização, cinética de secagem, avaliação energética.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. REVISÃO DA LITERATURA	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
5. CONCLUSÕES	26
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

1. INTRODUÇÃO

O cacau é uma palavra originalmente maia derivada do termo Kakaw, a qual pode ser traduzida como “suco amargo”. O cacau é o fruto do cacaueiro (*Theobromacacao L.*), e ganhou importância econômica conforme a expansão do consumo de chocolate. Com isso, foram feitas tentativas de implementação da lavoura cacaueira em outras regiões de clima e solo semelhantes às de origem. E assim, suas sementes foram se disseminando gradualmente pelo mundo (Mercado do Cacau, 2017).

Em meados do século XVIII, o cacau tinha atingido o Sul da Bahia e, na Segunda metade do século XIX, foi levado para a África. O cacau adaptou-se bem ao clima e solo do Sul da Bahia, região que produz hoje 95% do cacau brasileiro, ficando o Espírito Santo com 3,5% e a Amazônia em 1,5%. O Brasil é o 5º produtor de cacau do mundo, ao lado da Costa do Marfim, Gana, Nigéria e Camarões. Em 1979/80, a produção brasileira de cacau ultrapassou as 310 mil toneladas. Cerca de 90% de todo o cacau brasileiro é exportado, gerando renda para o país. No período 1975/1980, o cacau gerou 3 bilhões 618 milhões de dólares (CEPLAC, 2017).

O beneficiamento do cacau resume-se em cinco etapas de formas bem definidas e diferenciadas. Após a colheita, o cacau é quebrado e suas amêndoas são direcionadas para a fermentação. Em seguida, passa-se para o processo de secagem (geralmente é feita naturalmente à luz solar), onde a umidade das amêndoas deve ser reduzida de 60% para a faixa de 7 a 8%. Após isso, as amêndoas são armazenadas até serem utilizadas na torrefação.

Na etapa de torrefação o aroma é desenvolvido a partir dos percussores formados durante a fermentação. Tem-se também a eliminação da maior parte dos ácidos voláteis, redução da umidade para cerca de 3%, desenvolvimento da cor característica e destruição das enzimas que poderiam degradar a manteiga e cacau.

Na indústria alimentícia os leitos fluidizados participam dos sistemas de torrefação de café, congelamento, no recobrimento de doces e pastilhas e sistemas de microencapsulação. Estes processos podem ser incorporados com secagem em leito fluidizado para realizar dois ou mais processos na mesma unidade.

A fluidização pode ser fundamentalmente compreendida como a circulação de partículas sólidas (meio poroso) junto a um fluido, o qual pode estar na forma líquida ou gasosa e que impedirá a existência de um gradiente de temperatura de pontos muito ativos ou de regiões estagnadas no leito. Este fato tende a proporcionar uma maior interação entre as superfícies envolvidas e, consequentemente, altas taxas de transferência de massa e de calor.

Dentre as vantagens comumente reconhecidas da secagem em leito fluidizado, destacam-se a alta taxa de remoção de umidade, alta temperatura, fácil transporte de material dentro do secador, facilidade de controle e baixo custo de manutenção. Em contrapartida, as limitações incluem alta queda de pressão, alto consumo de energia elétrica, pobre qualidade de fluidização de alguns produtos particulados, qualidade de produto não uniforme para certos tipos de leitos fluidizados, erosão de tubos e vasos, arrastamento de partículas finas, atrito ou pulverização de partículas e aglomeração de partículas finas (MUJUMDAR, 2015).

Como os resíduos de cacau têm alta umidade, buscam-se tecnologias eficientes de secagem para favorecer a utilização dessa biomassa como fonte energética. Além disso, busca-se também a otimização do processo de torrefação dos “nibs” durante o beneficiamento do cacau, a fim de melhorar a qualidade final dos produtos. Em ambos os casos, percebe-se um potencial para a utilização da tecnologia de leito fluidizado.

Desta forma, os objetivos do trabalho são: (a) caracterizar fisicamente os “nibs” de suas amêndoas e as partículas provenientes das cascas do fruto do cacau; (b) analisar a fluidodinâmica do leito empacotado com “nibs” de cacau; (c) determinar a cinética de secagem do material em leito fluidizado.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. CACAU

O cacau é o fruto do cacaueiro (*Theobromacacao L.*). A espécie é nativa de florestas tropicais úmidas na parte inferior leste da região equatorial dos Andes na América do Sul. Domesticada por nativos na América Central, foi considerada de origem divina. O nome *Theobroma* significa “Alimento dos Deuses”. Foi consumida pela primeira vez por Astecas e Maias. Os primeiros europeus a consumirem o fruto foram os espanhóis que invadiram e conquistaram o império Asteca no México, no século 16. Eles aprenderam dos astecas como fazer o xocoatl (mais provável origem do nome chocolate), uma bebida feita das amêndoas de cacau depois da torrefação e da moagem (NAIR, 2010).

A produção de cacau acontece em seis estados brasileiros, alcançando 66 mil propriedades rurais, 33 mil delas no Sul da Bahia, maior estado produtor, seguido do Pará. A elevada rentabilidade obtida com o cultivo, em meados do século passado, e as condições de solo e clima favoráveis impulsionaram a rápida expansão da cacaicultura e a consolidação da agroindústria do cacau no Brasil. Entretanto, no final da década de 80, a atividade foi afetada por uma grave crise estrutural e conjuntural com o aparecimento e a propagação da doença vassoura-de-bruxa. Os problemas motivaram a reestruturação da cadeia produtiva do cacau e, nos últimos 12 anos, a produção voltou a crescer (ESALQ, 2016).

Os componentes mais valiosos do cacau são a manteiga de cacau, aroma e sabor. Eles são específicos de suas amêndoas. Embora a qualidade da manteiga não seja alterada durante o processamento, o sabor do cacau depende principalmente das reações químicas ocorridas durante o seu beneficiamento (BIEHL; ZIEGLEDER, 2003). Sem as etapas de fermentação, secagem e torrefação, as amêndoas de cacau não apresentam o sabor característico conhecido do chocolate. Desta forma, tem-se buscado a otimização desses processos a fim de aumentar a qualidade dos produtos finais.

Além do chocolate e demais produtos de confeitoraria, o beneficiamento do cacau gera muitos resíduos. Uma vez que cerca 80% do fruto transforma-se em resíduo, torna-se viável destiná-los a um uso fabril. Dentre as possibilidades de aproveitamento, pode-se citar a conversão energética. Como existem diversas formas de realizar essa conversão, faz-se necessário o estudo das tecnologias para selecionar a melhor para esta biomassa.

No aproveitamento da casca do fruto como potencialidades, destacam-se o uso na alimentação animal (ABIOLA, 1991; DONKOH et al., 1991; AREGHEORE, 2002), na extração de pectinas (BERBERT, 1972; VRIESMANN et al., 2011), nas gomas (FIGUEIRA et al., 1993), na produção de fertilizantes orgânicos por compostagem (CHEPOTE et al., 1990; SODRÉ et al., 2012) e como fonte de energia renovável (AGYEMAN; OLDHAM, 1986; CEPLAC, 2010; SYAMSIRO et al., 2011).

2.2. LEITO FLUIDIZADO

O leito fluidizado convencional (FB do inglês *fluidized bed*) é formado por passagem de um gás a partir do fundo de uma coluna de sólidos em partículas. Em baixas velocidades de gás, o leito é estático (fixo). O leito de partículas se acomoda numa placa distribuidora de gás de fluidização, o gás passa pelo distribuidor e é distribuído uniformemente em todo o leito. A queda de pressão no leito aumenta conforme a velocidade do gás de fluidização é aumentada. A uma determinada velocidade do gás, o leito é fluidizado quando a corrente de gás suporta totalmente o peso de todo o leito. Este estado é conhecido como condição mínima de fluidização e a velocidade do gás correspondente é chamada de velocidade mínima de fluidização. A queda de pressão no leito permanece quase a que a mesma que a queda de pressão da velocidade mínima de fluidização, mesmo que a velocidade do gás seja aumentada mais distante desse ponto (MUJUMDAR, 2015).

As partículas com elevado teor de umidade inicial possuem velocidade mínima de fluidização mais altas do que um leito composto por partículas secas. Devido às forças coesivas dominantes exercidas nas superfícies molhadas, apenas a camada superior do leito de sólidos é o leito fluidizado. As camadas inferiores podem permanecer estacionárias na fase inicial da secagem quando os sólidos estão bastante úmidos.

Para o caso de partículas secas, ou parcialmente secas, se a vazão de gás de fluidização for continuamente aumentada, o leito passa por diferentes tipos de regime de fluidização de acordo com o tipo de partícula com relação à classificação de Geldart. Entretanto, os FBs são normalmente operados em regimes de borbulhamento.

A tecnologia de leito fluidizado vem sendo amplamente aplicada no processamento de uma diversa gama de materiais particulados, tais como: produtos químicos, carboidratos, alimentos, biomateriais, bebidas, cerâmica, fármacos em pó ou aglomerados, pesticidas, agroquímicos, corantes e pigmentos, detergentes e agentes tensoativos, fertilizantes, polímeros e resinas. Importantes vantagens da operação e leito fluidizado incluem boa mistura de sólidos, altas taxas de transferência de calor e massa, e facilidade no transporte de material.

A viabilidade técnica da utilização da casca de cacau como combustível no aquecimento de ar para secagem de amêndoas de cacau foi estudada por Pereira (2013). Observou-se que há potencial desta biomassa em sistemas de geração direta de calor criado por sistemas gaseificador/combustor, atendendo os níveis de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) requerido pela legislação europeia e substituindo as fornalhas, comumente empregadas em secadores de cacau.

Santos (2016) estudou o aproveitamento tecnológico dos resíduos da cadeia do cacau para geração de energia e obteve fluxogramas possíveis para as rotas de pirólise, gaseificação, combustão e biodigestão, possibilitando a construção de fluxograma-base em cada caso. Sendo que para a produção de energia elétrica via Combustão Direta foram obtidas 8.400 configurações plausíveis.

Em estudo experimental e simulação via CFD da fluidodinâmica da casca de cacau em leito de jorro, Almeida (2016) constatou 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. Foi observada a segregação das partículas nas regiões do topo e do fundo do leito. Tais comportamentos foram bem representados pelo modelo utilizado.

Devido à alta umidade dos resíduos de cacau (cerca de 80%), buscam-se tecnologias eficientes de secagem para favorecer a utilização dessa biomassa como fonte energética. Além disso, busca-se também a otimização do processo de torrefação dos “nibs” durante o beneficiamento do cacau, a fim de melhorar a qualidade final dos produtos. Em ambos os casos, percebe-se um potencial para a utilização da tecnologia de leito fluidizado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para a realização do trabalho, o material utilizado foram amêndoas de cacau, obtidas no município de Ilhéus-BA, através da comercialização via pequenos produtores.

3.2. EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado foi uma unidade experimental construída em parceria com o Centro de Secagem de Pastas, Suspensões e Sementes da UFSCar e instalada no Laboratório de Fenômenos de Transporte (LFT/DEQ/UFS).

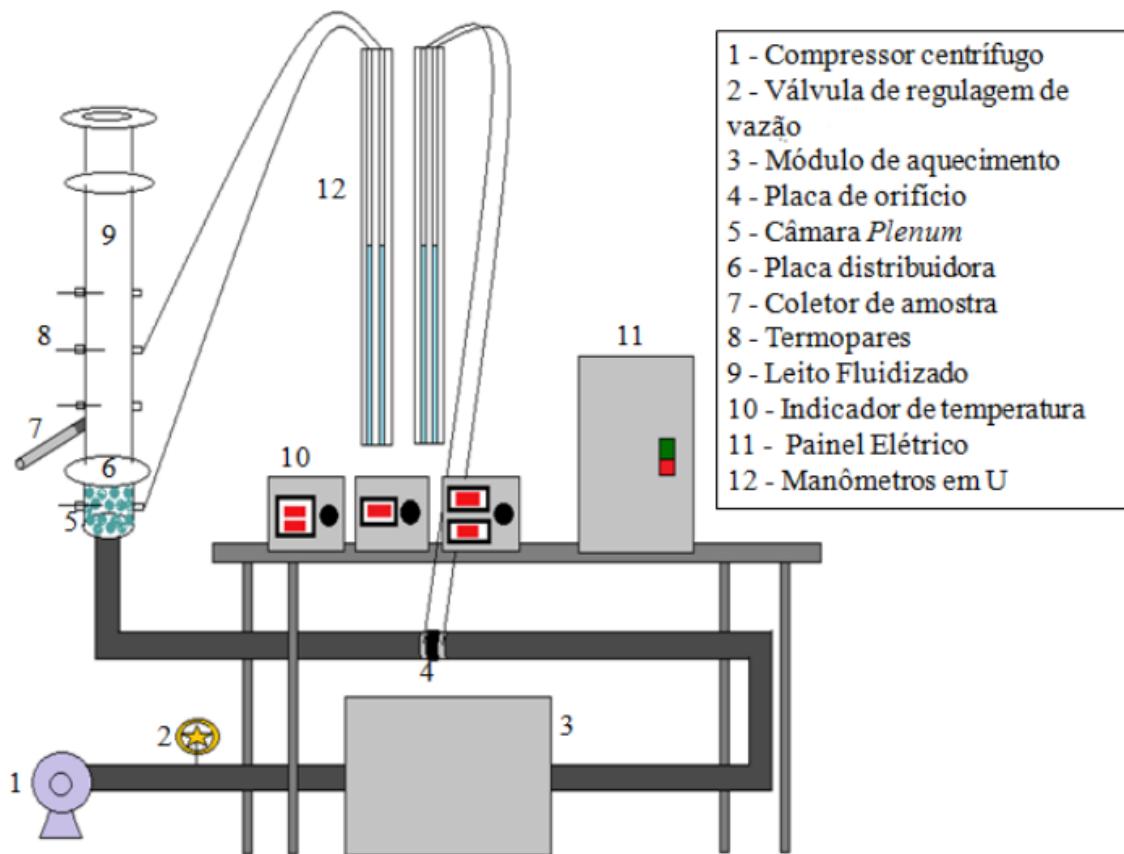


Figura 3.1: Esquema da unidade experimental de Leito Fluidizado (BOREL, 2014).

Na unidade ilustrada na Figura 3.1, o fluxo de ar é fornecido através de uma tubulação de 2 in por um compressor centrífugo (1) de 4 cv (marca Eberle, modelo B 100, 3470 rpm) e regulado por meio de uma válvula gaveta (2). A medida da vazão do ar é realizada através da leitura da diferença de pressão em um manômetro em U (12) com água como fluido manométrico, acoplado

a um medidor de vazão do tipo placa de orifício (4) previamente calibrado. O ar nos experimentos de secagem é aquecido, por meio de um aquecedor elétrico de 4500 W (3), passando por uma câmara *plenum* (5) e uma placa distribuidora (6), com percolação através do leito de partículas (9) e exaustão para a atmosfera. Cabe destacar que o módulo de aquecimento do ar foi mantido desligado durante os ensaios fluidodinâmicos.

A configuração do leito fluidizado estudada é a do tipo convencional, constituída de uma coluna cilíndrica de acrílico transparente para visualização do regime de fluidização, com diâmetro interno de 0,1085 m e altura de 0,5 m. A câmara *plenum* com 0,15 m de altura, recheada com partículas inertes de mesmo tamanho, é acoplada ao leito por meio de flanges. No flange que separa o *plenum* do leito foi instalado um distribuidor do tipo placa perfurada, com arranjo triangular, para assegurar um escoamento uniforme do ar.

A queda de pressão total do sistema foi medida utilizando-se um manômetro diferencial, com tomadas de pressão localizadas 0,03 m abaixo e 0,48 m acima do distribuidor de ar.

Para medidas de temperatura foram utilizados quatro termopares do tipo PT-100, sendo um deles inserido na região da câmara *plenum* a 0,025 m da placa distribuidora para medir a temperatura do ar de entrada, e os outros três dispostos ao longo do leito.

3.3. METODOLOGIA

3.3.1. PREPARAÇÃO DO MATERIAL

A amostra de amêndoas de cacau secas a uma umidade de $5,09 \pm 0,17$ %b.u. e em seguida foi triturada utilizando almofariz e pistilo, formando então os “nibs”, mostrados na figura abaixo:



Figura 3.2: “Nibs” secos de cacau.

3.3.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

(i) DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A distribuição do tamanho de partículas foi determinada pela técnica de peneiramento utilizando as peneiras Tyler de mesh 9, 10, 12, 14 e 16, e uma massa de material igual a 0,712 kg. Após 20 minutos de agitação, foram pesadas as massas de partículas retidas em cada peneira do conjunto, a fim de calcular a fração mássica retida e obter a distribuição de frequência do tamanho de partículas.

(ii) DETERMINAÇÃO DE UMIDADE TOTAL

Para determinar o teor e umidade, foi usada a relação entre massa de água evaporada da biomassa e sua correspondente massa de sólido seco, as quais foram determinadas pelo método direto da estufa, com temperatura de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante um período de 24h.

(iii) PICNOMETRIA A GÁS

A análise da massa específica real das partículas foi realizada no *Gas Displacement Pycnometry System*, modelo AccPyc™ II 1340. Além disso, o equipamento fornece o volume total ocupado pela amostra, assim, sabendo-se o número de partículas na amostra é possível determinar o volume de partícula e por consequência, o diâmetro médio dos “nibs” adotando-os como esferas.

(iv) DETERMINAÇÃO DO ÂNGULO DE RESPONSO

O ângulo máximo do talude formado pelas partículas com o plano horizontal, o ângulo de repouso, foi determinado pelo modo estático, sem base fixa (Figura 3.3). No qual uma determinada quantidade de partículas é descarregada através de um funil a uma altura de 0,20 m, formando um amontoado suficiente para determinar experimentalmente o ângulo de repouso em relação ao plano horizontal, por meio de relações trigonométricas. As análises foram realizadas em triplicata. Tal medida pode auxiliar no entendimento na diferença de comportamento fluidodinâmico das partículas.

3.3.3. ANÁLISE FLUIDODINÂMICA DO LEITO

Os ensaios fluidodinâmicos foram conduzidos com cargas de leito de 300, 450 e 600 g de partículas de “nibs” de cacau com diâmetro médio de Sauter igual a 1,53 mm. A fluidização das partículas foi obtida utilizando ar a uma temperatura média de 30°C.

A fim de minimizar os efeitos de empacotamento das partículas sobre as curvas características dos leitos formados, procedeu-se uma movimentação inicial das mesmas através do aumento da velocidade do ar, até a condição de fluidização incipiente, quando a vazão de ar foi bruscamente interrompida, desencadeando num empacotamento frouxo das partículas.

Após o empacotamento das partículas, a altura inicial do leito estático foi medida numa escala graduada fixada na coluna. Em seguida, o soprador foi ligado e a válvula de regulagem de vazão aberta lenta e gradualmente, registrando-se por meio dos manômetros em U os dados de queda de pressão na placa de orifício e no sistema leito-distribuidor até que se observasse uma fluidização plena. Também foi medida em cada vazão do ar a altura do leito. As mesmas medidas foram realizadas em vazões decrescentes do ar, no processo de defluidização.

A partir do levantamento das curvas características de queda de pressão do leito em função da vazão do ar foram determinados graficamente os parâmetros de queda de pressão máxima e velocidade de mínima fluidização (v_{mf}). A qualidade da fluidização foi também avaliada com base nos cálculos do índice de efetividade de fluidização (IF) e número de Froude (Fr), expressos pelas Equações (1) e (2), respectivamente.

$$IF = \frac{-\Delta P}{m_b g / A} \quad (1)$$

$$Fr = \frac{v_{mf}^2}{d_p \cdot g} \quad (2)$$

sendo g a aceleração da gravidade; A a área da seção transversal do leito; $-\Delta P$ a queda de pressão registrada no leito, m_b a massa de material particulado no leito, v_{mf} a velocidade de mínima fluidização e d_p o diâmetro médio das partículas. Assim, o índice de efetividade da fluidização (IF) permite mensurar o percentual do material particulado efetivamente fluidizado e o número de Froude (Fr) possibilita classificar a fluidização como particulada ou agregativa.

3.3.4. UMIDIFICAÇÃO

O processo de umidificação foi realizado dispondo os “nibs” de cacau num suporte com tela perfurada em atmosfera de vapor saturado à temperatura de $85,0 \pm 0,3^\circ\text{C}$, de tal modo que o vapor d’água penetrasse nos poros do material, hidratando-o até o equilíbrio.

3.3.5. SECAGEM

O processo de secagem foi realizado em leito fluidizado, o mesmo em que foram realizados os estudos fluidodinâmicos, conforme mostrado na Figura 3.1, utilizando “nibs” com umidade inicial de, aproximadamente, 43,66 % b.s. e duas velocidades do ar, a v_{mf} e o seu dobro, com a temperatura média de $29 \pm 3^\circ\text{C}$. Amostras foram coletadas do leito em tempos pré-determinados durante o processo de secagem, para a determinação do teor de umidade e levantamento da cinética de secagem do material.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

Serão apresentados, neste capítulo, os resultados da análise granulométrica, caracterização física e análise fluidodinâmica dos “nibs” de cacau em leito fluidizado.

A Tabela 4.1, a seguir, mostra a distribuição granulométrica do material após o peneiramento em diferentes peneiras Tyler. Onde d_i é o diâmetro médio de partícula, x_i é a fração mássica e X_i é a distribuição cumulativa.

Tabela 4.1: Distribuição Granulométrica dos “nibs” de cacau.

Mesh	Abertura (mm)	Massa retida (g)	$d_i(\text{mm})$	x_i	X_i	Grupo Geldart
-9+10	1,70 -2,00	304	1,85	0,426966	0,573034	D
-10+12	1,40 -1,70	188	1,55	0,264045	0,308989	D
-12+14	1,18 -1,40	148	1,29	0,207865	0,101124	D
-14+16	1,00- 1,18	72	1,09	0,101124	0	D
fundo	-	-	-	-	-	-
	Total	712				

Para calcular o diâmetro de Sauter usou-se a seguinte equação:

$$d_{p,S} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{d_i} \right)} \quad (3)$$

Onde $d_i = d_{p,\text{médio}}$. Desta forma, o valor encontrado foi $d_{p,S} = 1,53 \text{ mm}$.

Obteve-se também a distribuição cumulativa apresentada na Figura 4.1.

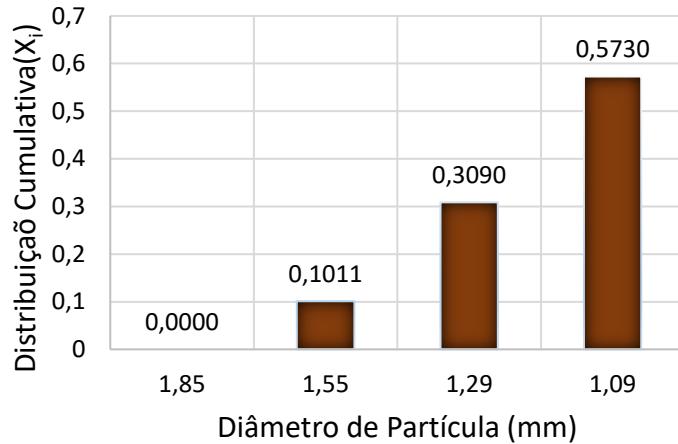


Figura 4.1: Gráficos de distribuição cumulativa dos “nibs” de cacau.

Para descrever a distribuição granulométrica dos “nibs” de cacau, utilizou-se dos modelos clássicos a dois parâmetros:

$$\text{Modelo de Gate, Gaudin e Schumann - GGS: } X_i = \left(\frac{D_i}{k} \right)^m \quad (3)$$

$$\text{Modelo de Rosin, Rammler e Bennet - RRB: } X_i = 1 - \exp \left[- \left(\frac{D_i}{D'} \right)^n \right] \quad (4)$$

Assim, os parâmetros encontrados foram os seguintes mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Parâmetros obtidos para as modelos de distribuição dos “nibs” de cacau.

Modelo	k (mm)	D' (mm)	m	n	R^2
GGS	2,0427	-	4,8191	-	0,9765
RRB	-	1,8818	-	5,7679	0,9895

A partir do valor de R-quadrado é possível inferir que o Modelo RRB apresenta uma melhor representação dos dados experimentais, sendo o mais indicado para cálculo de projeto para os “nibs” de cacau.

A fim de realizar os experimentos com três diferentes cargas de partículas no leito, trabalhou-se com o diâmetro médio de Sauter da amostra ($d_{p,S}$). Fez-se, então, a análise no *Gas Displacement Pycnometry System*, no qual se obtiveram os dados de volume total ocupado pelas partículas (V_T) e a massa específica da amostra. Com isso, calculou-se o diâmetro médio dos “nibs”, conforme apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Resultados obtidos na picnometria a gás para os “nibs” de cacau.

$Massa_{amostra} (g)$	$Volume\ Total\ (cm^3)$	$N^{\circ}\ de\ partículas$	$\rho_p\ (g/cm^3)$	$d_p\ (mm)$	ϕ
3,6465	3,1975±0,0005	2836	1,1404±0,0005	1,29	0,8459

Uma vez conhecida a massa específica do material, classificou-se então cada faixa de diâmetro segundo a classificação proposta por Geldart (1973 e 1986), ver Tabela 4.1. Percebe-se que todas as faixas se classificam como do grupo D, logo se pressupõe que apresentem canais preferenciais durante a fluidização devido aos jatos de ar advindos das bolhas formadas pela fase fluida por entre os “nibs”. O diâmetro médio encontrado via picnometria a gás foi de 1,29 mm, o qual é cerca de 15,7 % menor que o encontrado pelo método de peneiras, isto evidencia o fato que os “nibs” não são esféricos e apresentam formas não padronizadas.

O ângulo de repouso (θ_r) encontrado para a amostra de “nibs” foi de $33,7 \pm 1,2^\circ$. Desta forma, é inferido que a partículas apresentam fluidez durante os estudos fluidodinâmicos, e por ser mais próximos de 25° do que de 50° pode-se dizer que, apesar de apresentarem forma irregular e possuírem um grau de empacotamento considerável, os “nibs” de cacau apresentam boas propriedade de fluxo.

4.2. ESTUDO FLUIDODINÂMICO

Na Figura 4.2 são apresentados os resultados de queda de pressão no leito (ΔP) em função das vazões crescente e decrescentes do ar (Q_{ar}) obtidos para os “nibs” de cacau, com partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, nos ensaios realizados com carga de 300 g. É possível observar um

comportamento semelhante à de partículas inertes em leito fluidizado, havendo uma região de leito fixo, com a queda de pressão aumentando linearmente com a velocidade do ar, e uma região de leito fluidizado, na qual a queda de pressão no leito aumenta ligeiramente em degraus com quedas de pressão constantes conforme o aumenta-se a vazão do ar. Na defluidização, nota-se uma estabilidade da região de leito fluidizado, o que é advindo da minimização dos canais preferenciais. Com isso, a queda de pressão se mantém constante até o ponto de vazão mínima de fluidização das partículas de maior diâmetro da faixa trabalhada, onde essas partículas maiores começam a se acomodar em leito fixo, enquanto as outras de diâmetro menor ainda permanecem fluidas, até o momento em que a velocidade do ar não seja o suficiente para mantê-las suspensas e, então, se acomodam em leito fixo sobre as partículas anteriores, promovendo uma segregação por diâmetro dos “nibs” dentro do leito. Como se utilizou leito frouxo para o estudo nota-se que na defluidização o comportamento de leito fixo apresenta menor queda de pressão do que na fluidização, indicando que a porosidade do leito é ligeiramente maior que a inicial, o que é esperado de um leito expandido com ar percolando.

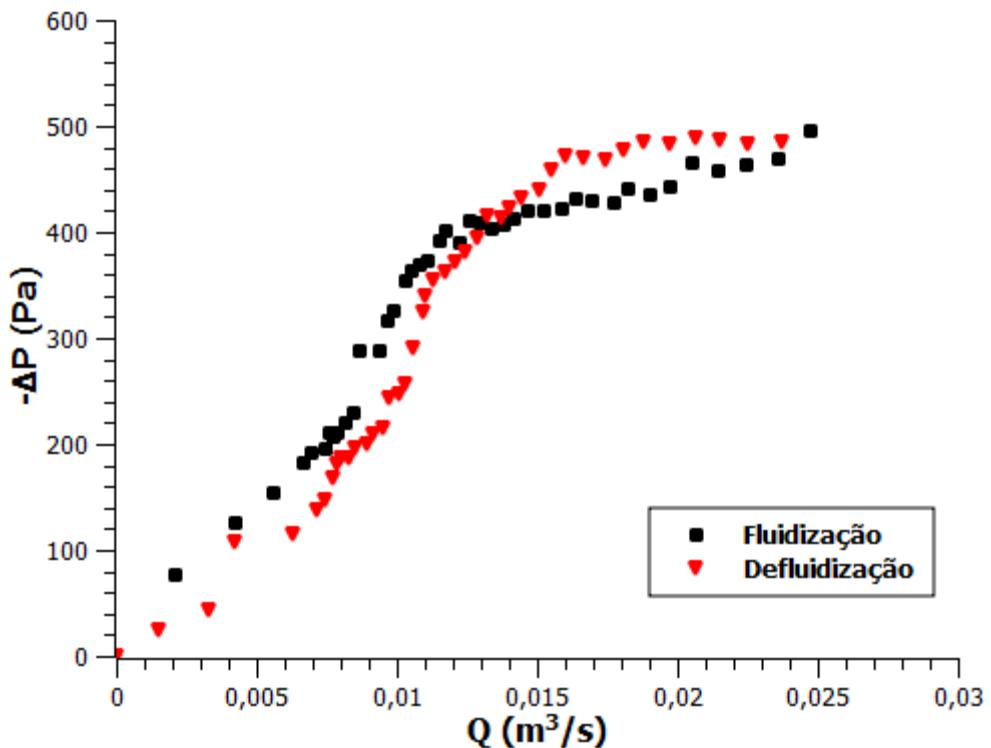


Figura 4.2: Queda de pressão em função da vazão de ar para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, carga de 300g, $X = 5,09 \pm 0,17$ % b.u.

Nota-se ainda que, em vazões de ar crescentes, houve uma significativa redução da queda de pressão, seguida de um trecho estável no patamar próximo de 430 Pa. Tal comportamento é típico de leitos nos quais há a formação de canais preferenciais, devido à alta coesão das partículas. Com o aumento da velocidade do ar, a formação e o colapso de bolhas tornam-se predominantes, levando a uma alta turbulência no leito. Essa alta turbulência remove os canais dentro do leito, resultando numa melhor mistura de partículas. Como resultado, na defluidização a queda de pressão se estabiliza num valor praticamente constante e correspondente a um valor próximo ao peso aparente do leito por unidade de área. Isto evidencia que praticamente todo o leito de partículas encontra-se suspenso pela corrente de ar.

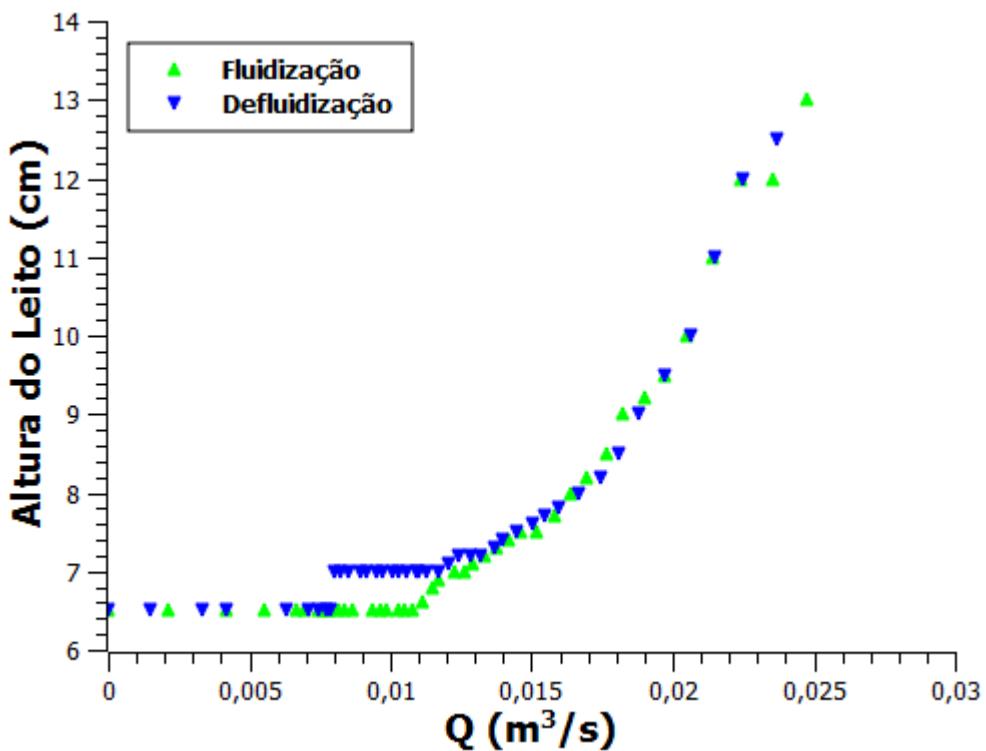


Figura 4.3: Altura do leito em função da vazão de ar para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, carga de 300 g, $X = 5,09 \pm 0,17$ % b.u.

A Figura 4.3 mostra o comportamento da altura do leito (H_L) conforme o acréscimo e decréscimo da vazão para a carga de 300 g. Na fluidização, percebeu-se um comportamento constante da altura do leito enquanto os “nibs” permanecem em leito fixo, bem como uma expansão do mesmo quando próximo da Q_{mf} , quando foram evidenciados os canais preferenciais, seguido de um crescimento da H_L . Na vazão decrescente, conforme as partículas maiores

retornam à configuração de leito fixo, percebe-se uma mudança na linearidade das alturas de leito e em seguida foi identificado um patamar constante acima do apresentado da vazão ascendente formando um “gap” de altura, onde todas as partículas encontram-se em leito fixo, característica do leito fixo expandido, o qual apresenta maior porosidade. Desta forma, conforme foi decrescida a vazão de ar as partículas retomaram a configuração inicial apresentando a mesma H_L .

Nas curvas características dos “nibs” de 1,53 mm e carga de 450 g (Figura 4.4), observou-se um comportamento semelhante à fluidização com carga de 300 g, havendo uma leve diminuição do ΔP antecedendo a região de leito fluidizado, que também é ocorrida por conta dos canais preferenciais. Na defluidização, o ΔP permaneceu constante até que as partículas começaram a se acomodar em leito fixo, o qual apresenta duas regiões que se distinguem pela fluidização, ou não, das partículas maiores. A partir de então é notada uma pequena diferença da porosidade na região de leito fixo com relação à inicial que é dada pela formação dos canais preferenciais, que pode ser advinda da forma irregular dos “nibs” que não retomam sua conformação inicial no leito, acarretando num comportamento linear na região de leito fixo com coeficiente linear menor do que na ida.

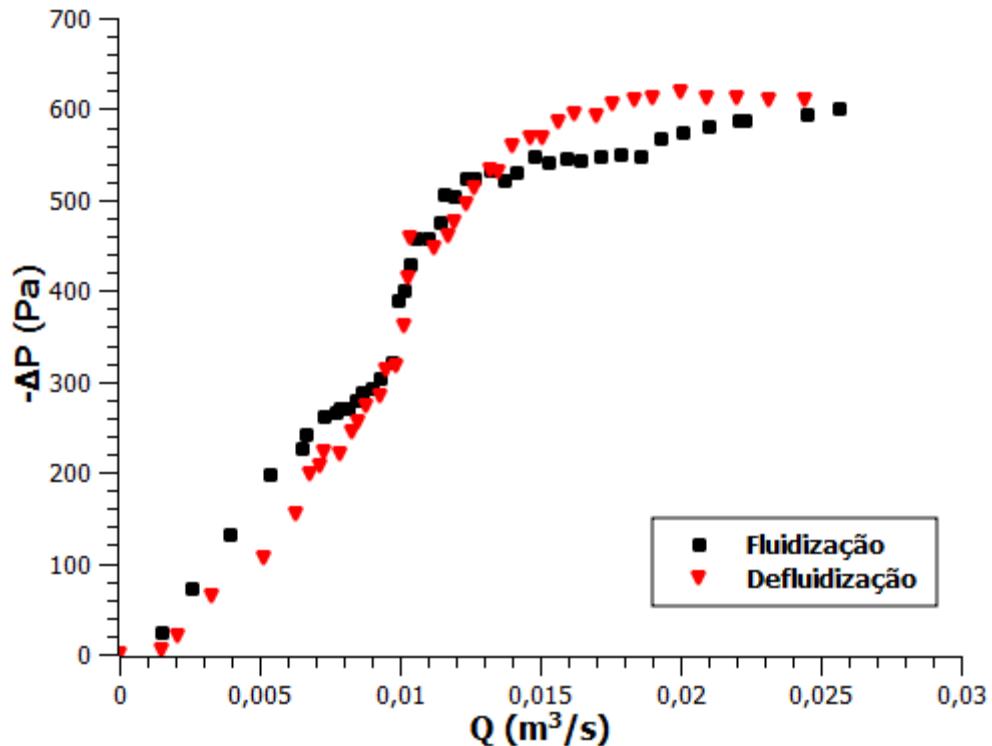


Figura 4.4: Queda de pressão em função da vazão de ar para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, carga de 450g, $X = 5,09 \pm 0,17\%$ b.u.

Houve, também, semelhança com a carga de “nibs” anterior na curva de altura de leito em função da vazão de ar da carga de 450 g, conforme apresentado na Figura 4.5. Além de apresentar as regiões de leitos fixo (empacotado e frouxo) e fluidizado bem evidentes, a curva mostra que as partículas não retomam a altura inicial, mas sim a uma altura maior, ou seja, ao fim da corrida experimental o leito teve uma maior porosidade do que a inicial devido à forma não esférica dos “nibs” que podem se arranjar de forma fibrosa devido ao alongamento presente em algumas de suas partículas compondo os canais preferenciais que não se desfazem completamente ao fim da corrida e as segregam no leito.

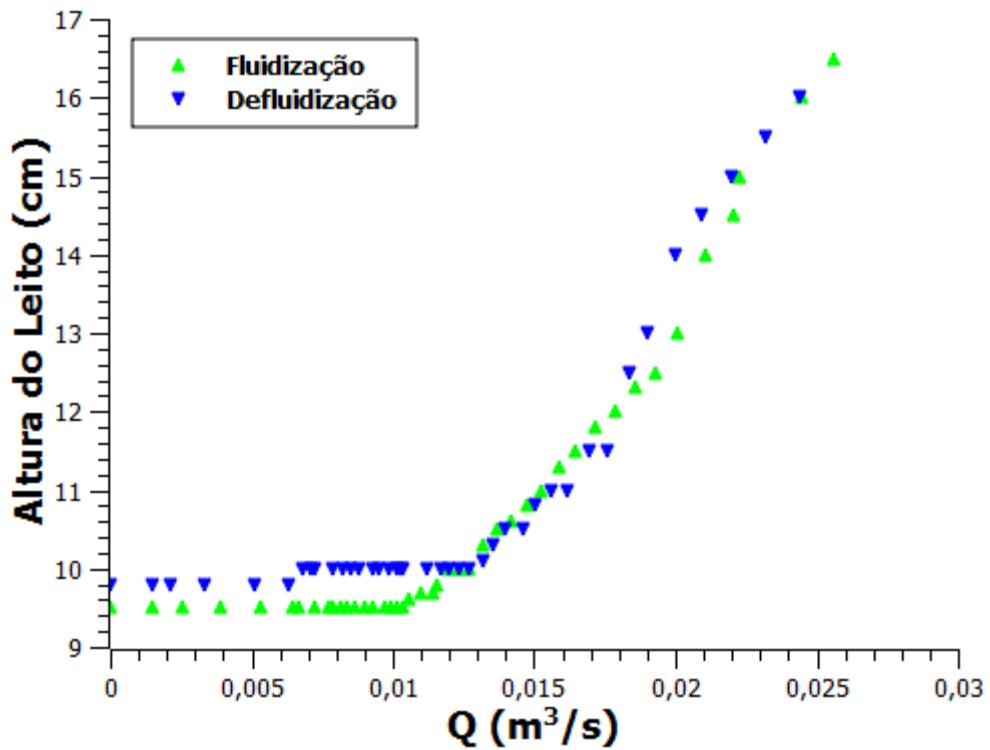


Figura 4.5: Altura do leito em função da vazão de ar para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, carga de 450 g, $X = 5,09 \pm 0,17\% \text{ b.u.}$

Na Figura 4.6, são exibidas as curvas que caracterizam a fluidodinâmica dos “nibs” com carga de 600 g. Como era esperado, o comportamento obtido foi semelhante aos com carga de 300 e 450g, apresentando a histerese na defluidização acompanhada da estabilização na região de fluidização e um aumento da porosidade na região de leito fixo. Sabe-se que quanto maior a razão de altura da coluna de particulado por diâmetro do leito, mais comportada a região de fluidização, o que é coerente com o observado experimentalmente, uma vez que dentre as três cargas estudadas,

o leito de 600 g foi a qual apresentou uma maior estabilidade na região de fluidização, tanto na vazão ascendente como na defluidização.

Na Figura 4.7, é apresentado o comportamento da altura de leito em função da vazão de ar para a carga de 600 g, nele observou-se as mesmas características discutidas para o leito com carga de 450 g. Porém, a diferença de altura entre as condições inicial e final foi maior, já que neste caso têm-se um maior número de partículas alongadas formando, consequentemente, mais caminhos preferenciais que não se desfazem completamente e promovem uma maior porosidade do leito o final da corrida.

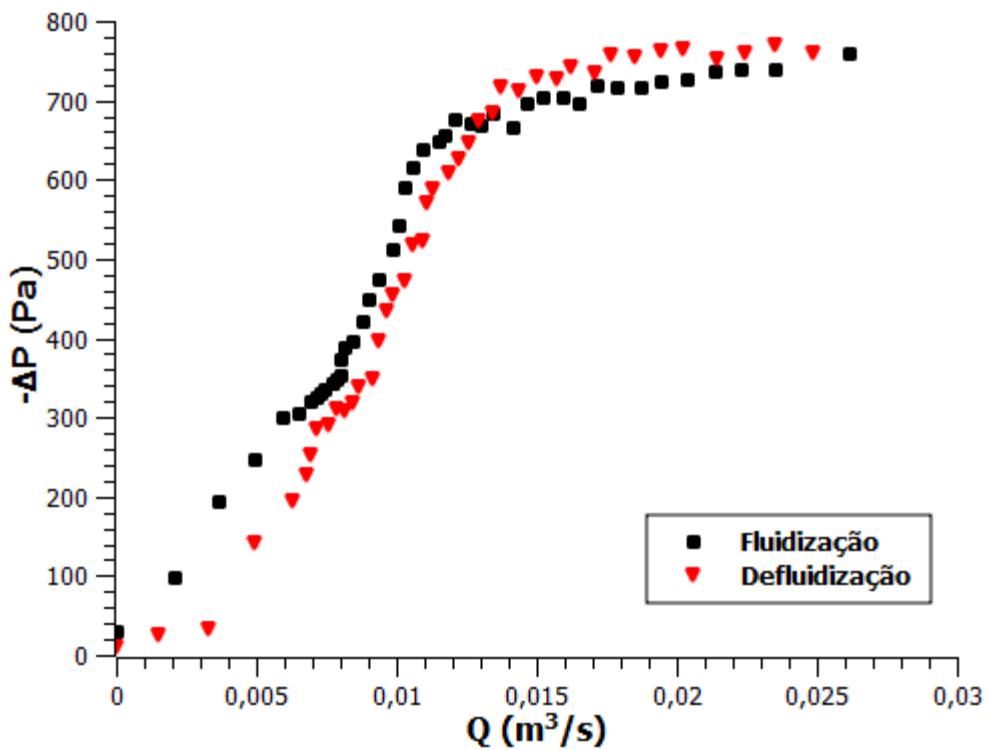


Figura 4.6: Queda de pressão em função da vazão de ar para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, carga de 600 g, $X = 5,09 \pm 0,17\%$ b.u.

A influência da carga de particulado na queda de pressão no leito em função da vazão de ar decrescente é mostrada na Figura 4.8. Conforme o esperado observou-se que aumentando a carga de “nibs” no leito tem-se um consequente aumento proporcional do ΔP no patamar de leito fluidizado, já que nele a queda de pressão é correspondente ao peso aparente do leito.

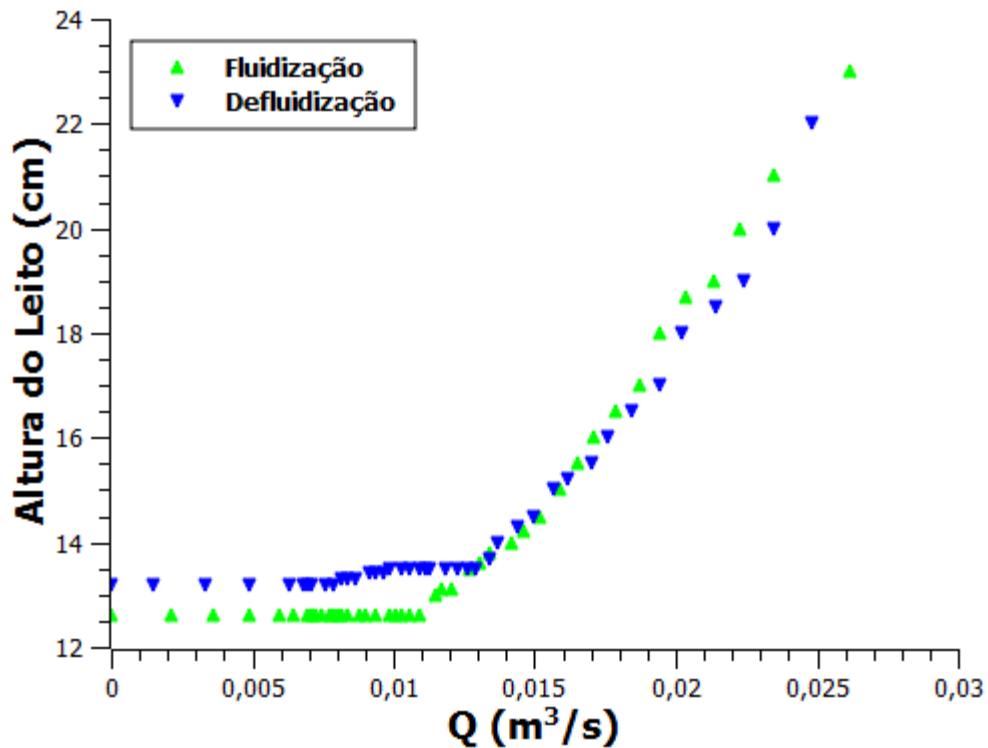


Figura 4.7: Altura do leito em função da vazão de ar para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, carga de 600 g, $X = 5,09 \pm 0,17\% \text{ b.u.}$

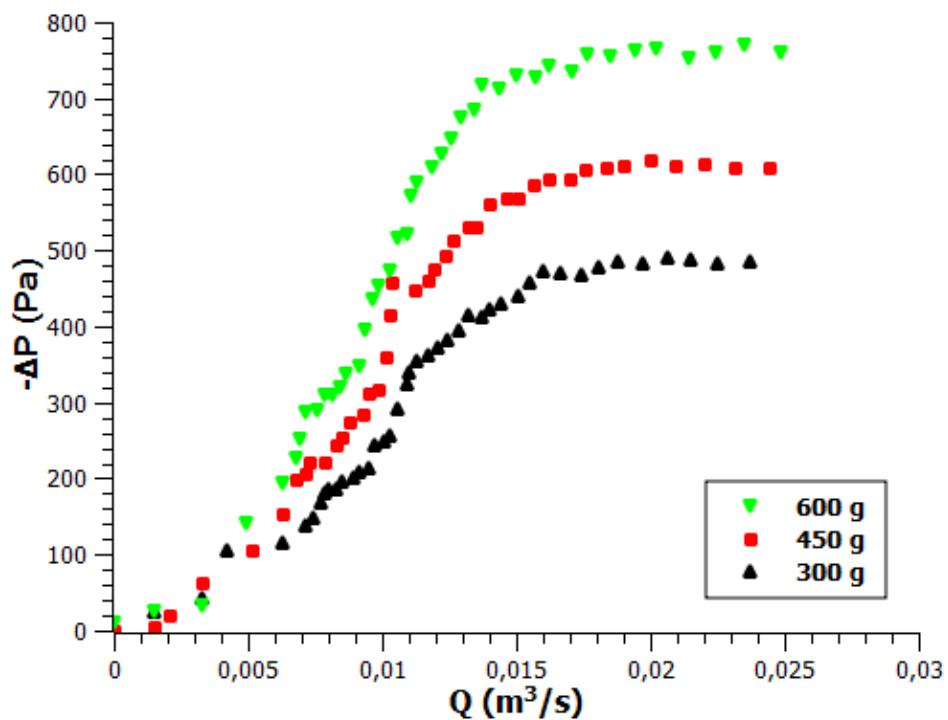


Figura 4.8: Queda de pressão em função da vazão de ar decrescente para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, diferentes cargas e $X = 5,09 \pm 0,17\% \text{ b.u.}$

A partir da comparação das alturas do leito em função da vazão de ar decrescente nos diferentes leitos, apresentada na Figura 4.9, foi observado que a reorganização em leito fixo foi dada de forma análoga entre as três cargas e ocorrendo numa estreita faixa de vazão, que foi estudada utilizando método gráfico.

Na Figura 4.10 é mostrado como foram obtidos, graficamente, os valores de vazões mínimas de fluidização e, consequentemente, os de velocidades mínimas de fluidização (v_{mf}) usando como exemplo os resultados com a carga de 600 g de “nibs”. Trata-se de encontrar o ponto no qual há a interseção das retas que melhor representam as regiões de leito fixo e fluidizado.

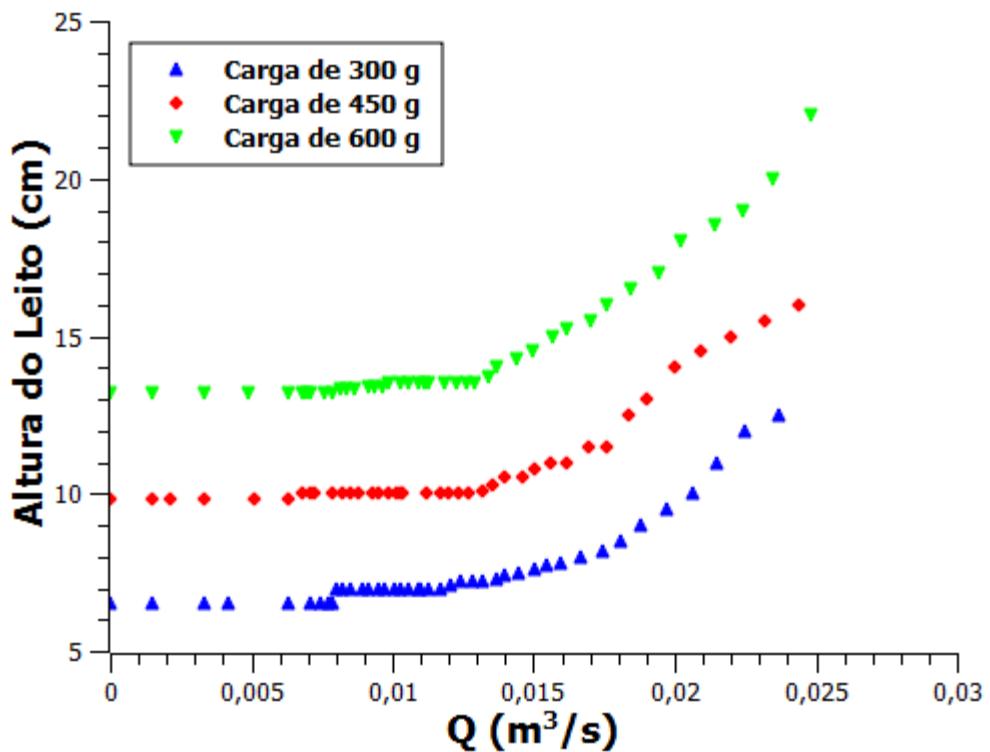


Figura 4.9: Altura do leito em função da vazão de ar decrescente para partículas de diâmetro médio de 1,53 mm, diferentes cargas e $X = 5,09 \pm 0,17$ % b.u.

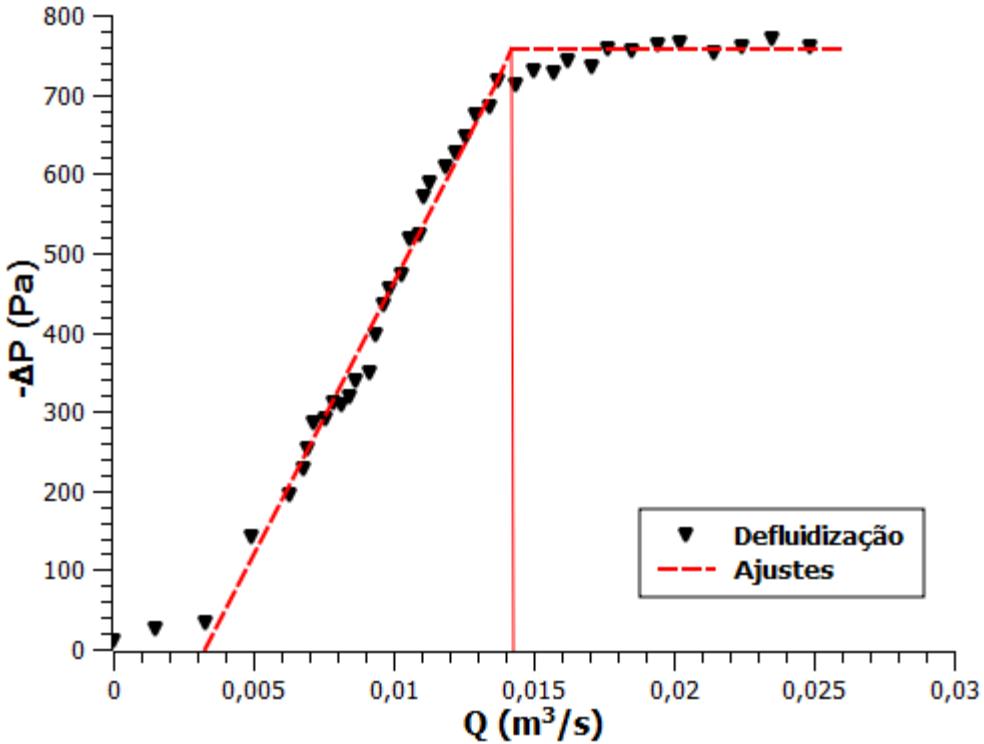


Figura 4.10: Ilustração da obtenção da vazão e queda de pressão na mínima fluidização.

A Tabela 4.4 mostra os valores de velocidade e vazão mínima de fluidização obtidos graficamente para cada carga de partícula, com as quais foram feitas o estudo fluidodinâmico.

Tabela 4.4: Velocidades, vazões e queda de pressão mínimas de fluidização para “nibs” de cacau, diâmetro médio de 1,53 mm, $X=5,09\pm0,17\%$ b.u.

<i>Carga (g)</i>	$-\Delta P_{mf} (Pa)$	$Q_{ar} (m^3/s)$	$v_{mf} (m/s)$	$IF (-)$	$Fr (-)$
300	$465,1\pm3,2$	$0,01427\pm0,00003$	$1,54\pm0,02$	1,46	159
450	$582,5\pm4,6$	$0,01434\pm0,00012$	$1,55\pm0,02$	1,22	160
600	$724,1\pm0,2$	$0,01400\pm0,00019$	$1,51\pm0,02$	1,14	153

Nota-se não haver uma diferença estatística entre as velocidades de mínima fluidização para as três cargas utilizadas, logo o aumento da carga de particulado no leito propiciou, apenas, um aumento significativo na queda de pressão correspondente à sua massa aparente por área do transversal do leito. Analisando a dimensão do número de Froude, tem-se que as três cargas de “nibs” possuem $Fr > 13$, fato que, segundo Kunii e Levenspiel (1969), faz dos “nibs” partículas de Fluidização Agregativa, ou seja: as massas específicas do fluido e do “nibs” são bem

diferentes; possuem partículas grandes – velocidade de escoamento relativamente elevado; fluidização irregular; o fluido atravessa o leito, principalmente, sob fora de bolhas e as partículas se dispersam mais aglomeradas e a fase fluida se comporta como um gás borbulhante através do leito. Este resultado confere com o observado nos estudos fluidodinâmicos, dos quais os gráficos de fluidização fogem do usual e apresentam peculiaridades, conforme foi discutido.

4.3. UMIDIFICAÇÃO DOS “NIBS”

Com o intuito de avaliar a secagem dos “nibs” de cacau, fez-se necessária a umidificação do particulado após o estudo fluidodinâmico. Para tanto, utilizou-se de um suporte com rede para depositar o material e o expor à vapor d’água proveniente de um banho-maria à temperatura de $85,0 \pm 0,3^\circ\text{C}$. Aproveitou-se também para determinar a cinética do processo através da leitura da massa da amostra ao longo do tempo de umidificação.

Na Figura 4.11 é mostrado o gráfico de umidificação dos “nibs” de cacau. Percebe-se um comportamento típico de um material poroso, devido ao seu rápido acréscimo de umidade um curto espaço de tempo, bem como uma rápida estabilização do patamar em torno de $X = 0,65$ b.s., indicando que todos os poros acessíveis já estavam umidificados.

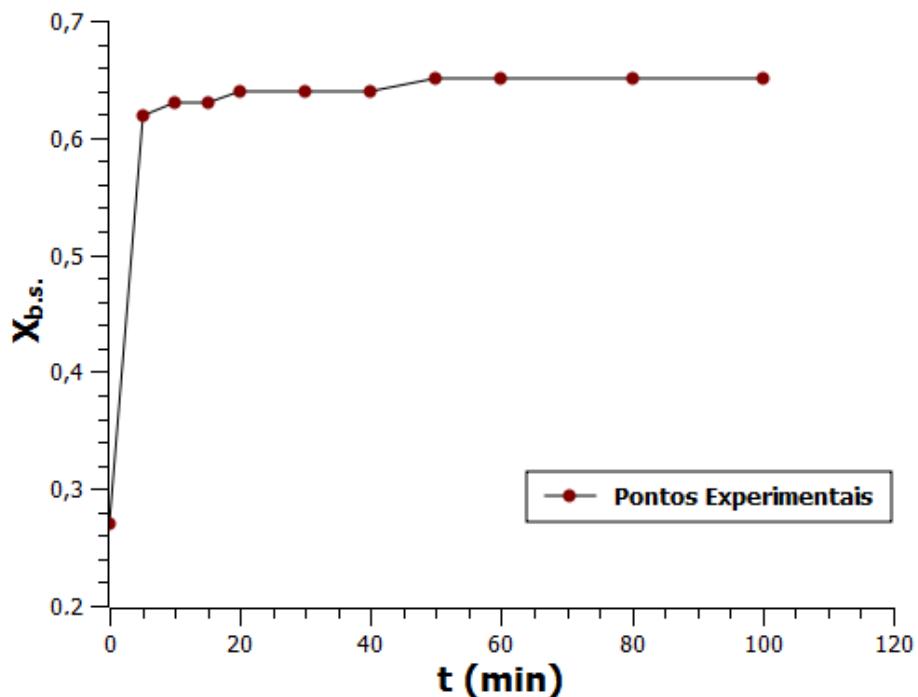


Figura 4.11: Teor de umidade em função do tempo, na umidificação dos “nibs” de cacau.

Feita a umidificação dos “nibs” fez-se possível o estudo da sua secagem em leito fluidizado, conforme será discutido no tópico a seguir.

4.4. SECAGEM DOS “NIBS”

Os resultados típicos de teor de umidade em função do tempo, a partir dos quais é possível avaliar a influência da velocidade de ar de alimentação sobre secagem dos “nibs”, são apresentados na Figura 4.12.

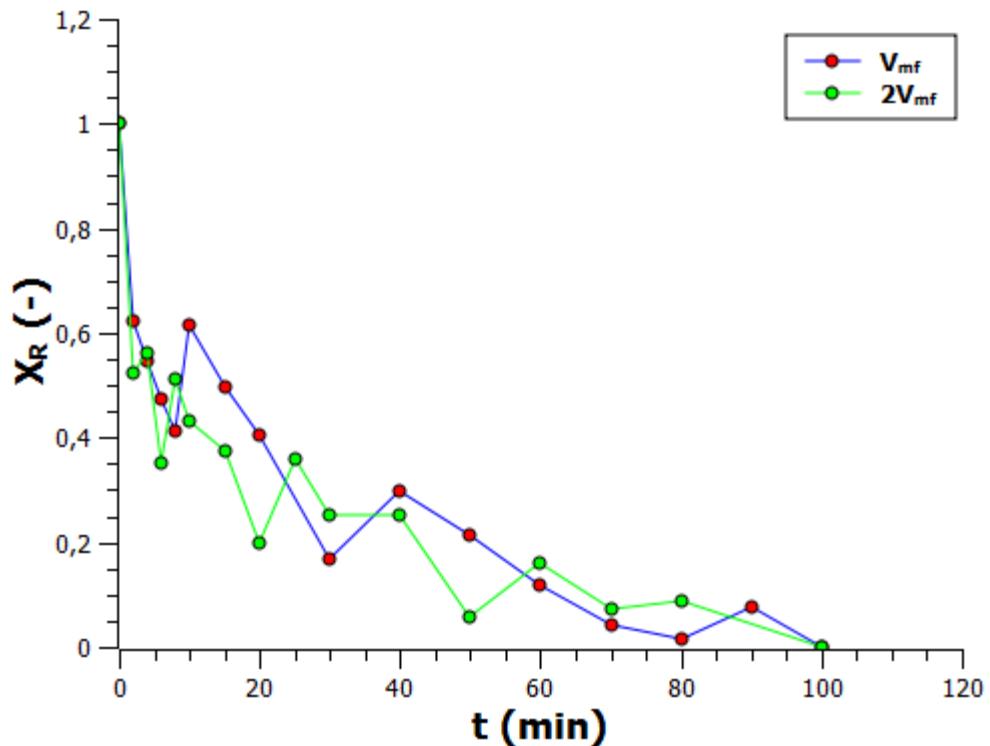


Figura 4.12: Adimensional de umidade em base secagem função do tempo de secagem.

A Figura 4.12 possibilita a comparação entre duas condições diferentes do processo de secagem dos “nibs” de cacau, operação em v_{mf} e em $2v_{mf}$. É notório que a velocidade do ar influencia somente nos primeiros instantes no processo, em que a umidade superficial das partículas é removida, fazendo com que a curva de secagem em $2v_{mf}$ apresente valores de X_R menores que àqueles em v_{mf} . Em seguida, é perceptível que o comportamento de secagem dos “nibs” é regido pelo mecanismo de difusão de umidade e, por isso, não é significativamente influenciado pela velocidade do ar, conforme é visto na Figura 4.12.

5. CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados encontrados, é possível inferir que dentre os modelos de distribuição granulométrica avaliados o que melhor representa os dados experimentais é o RRB, o qual apresentou um $R^2=0,9895$ e seu parâmetros de modelo foram: $D'=1,8818$ mm e $n=5,7679$. Avaliou-se as influências da carga de “nibs” de cacau em seu comportamento durante o estudo fluidodinâmico e da velocidade do ar na alimentação do processo de secagem. Foi visto que a carga de partículas no leito não afetou significativamente a velocidade mínima de fluidização, a qual foi em média $v_{mf}=1,53\pm0,02$ m/s, porém afetou as quedas de pressão de mínima fluidização as quais foram proporcionais ao aumento da carga de “nibs”, sendo de $465,1\pm3,2$, $582,5\pm4,6$ e $724,1\pm0,2$ Pa para as cargas de 300, 450 e 600 g, respectivamente. Similarmente, este comportamento também foi observado por Almeida (2016), onde a velocidade de mínimo jorro não foi influenciada pela fração mássica, diferentemente da queda de pressão. Ainda na fluidodinâmica, foi notado o comportamento peculiar de partícula inerte pelos “nibs” devido à sua forma irregular e ampla faixa granulométrica trabalhada que promoveu uma segregação das partículas, assim como pelo seu número de Froude superior a 13, caracterizando sua fluidização como aggregativa. Os índices de fluidização (IF) para as três cargas de partículas estudas indicam uma fluidização altamente efetiva, viabilizando o processo de secagem devido ao eficiente aumento dos fenômenos de transporte de calor e massa. Na umidificação dos “nibs” percebeu-se um comportamento característico de partícula com alta porosidade, com uma alta taxa de umidificação e leve alcance do equilíbrio. A influência da alta porosidade também se mostrou influente no processo de secagem, no qual foi observada a rápida remoção da umidade superficial dos “nibs” nos primeiros minutos do processo, tanto utilizando a v_{mf} quanto usando duas vezes o seu valor. Após essa fase, a difusão governa o processo de secagem e a influência da velocidade do ar deixa de ser significativa. Desta forma, percebe-se que os “nibs” de cacau apresentam interessantes peculiaridades no comportamento fluidodinâmico, os quais ainda não são encontrados na literatura. Pela dificuldade de se encontrar trabalhos a respeito desse particulado, fica clara a necessidade de se estudar sua fluidodinâmica e avaliar seu beneficiamento se utilizando de diferentes tecnologias a fim de se obter uma maior qualidade dos seus produtos variados com uma maior eficiência do processo. Pelo observado nos estudos, do ponto de vista fluidodinâmico e de secagem, admite-se que a tecnologia de leito fluidizado se apresenta como

uma forma viável para o beneficiamento (torrefação) dos “nibs” de cacau, precisando-se agora estudar o comportamento dos índices de compostos fenólicos ao decorrer da fluidização.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABIOLA, S. S.; TEWE, O. O. Chemical evaluation of cocoa by-products. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v. 68, n. 4, p. 335-336, 1991.
2. AGYEMAN, K. O. G.; OLDHAM, J. H. Utilization of cocoa by-products as an alternative source of energy. **Biomass**, v. 10, p. 311-318, 1986.
3. ALMEIDA, P. S. Análise da fluidodinâmica da casca de cacau em leito de jorro – Estudo experimental e simulação via CFD [Dissertação de Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.
4. AREGHEORE, E. M. Chemical evaluation and digestibility of cocoa (*Theobromacacao*) by products fed to goats. **Trop. Anim. Health Prod.**, v. 34, p. 339-348, 2002.
5. BERBERT, P. R. Estudo de pectina do mel e da casca do fruto do cacau. **RevistaTheobroma**, Ilheus, v. 2, n. 49, p. 51, 1972.
6. BIEHL, B.; ZIEGLEDER, G. COCOA| Chemistry of Processing. **Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition**. Second Edition, 2003, p. 1436-1448.
7. BOREL, L.D.M.S. Aplicação de um secador de leito fluidizado assistido por aquecimento infravermelho para o beneficiamento de pólen apícola [Dissertação de Mestrado]. São Cristóvão (SE): Universidade Federal de Sergipe, 2014. 139 p.
8. CHEPOTE, R. E.; SANTANA, J. L. C.; DeLEON, F. Como utilizar composto de casca de cacau na adubação do cacaueiro. **Difusão Agropecuária**, Ilhéus, v. 2, n. 1, p. 11-17, 1990.
9. CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2012.
10. DONKOH, A.; ATUAHENE, C. C.; WILSON, B. N.; ADOMAKO, D. Chemical composition of cocoa pod husk and its effect on growth and food efficiency in broiler chicks. **Anim. Feed. Sci. Technol.**, v. 35, p. 161-169, 1991.
11. FIHUEIRA, A.; JANICK, J.; BEMILLER, J. N. New products from *Theobroma cacao*: seed pup and pod gum. In: JANICK, J.; SIMON, J. E. **New crops**. New York: Wiley, 1993, p 475-478.
12. FOUST, A.; WENZEL, L.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSON, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC. 1982.

13. GEANKOPLIS, J. *Transport Processes and Unit Operations*. 3rd edition. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
14. MUJUMDAR, A. S.; editor. **Handbook of Industrial Drying**. 4rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2015.
15. NAIR, K. P. P. **The Agronomy and Economy of Important Tree Crops of Developing World**. 1 ed. Burlington: Elsevier, 2010. p 131-180.
16. PEREIRA, I. O. Viabilidade da utilização de casca de cacau como combustível no aquecimento de ar para secagem de amêndoas de cacau[Dissertação de Doutorado]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2013.
17. SANTOS, M. M. N. Aproveitamento tecnológico de resíduos da cadeia do cacau para geração de energia [Dissertação de Mestrado]. Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2016.
18. SODRÉ, G. A.; VENTURINI, M. T.; RIBEIRO, D. O.; MARROCOS, P. C. L. Extrato da casca do fruto do cacaueiro como fertilizante potássico no crescimento de mudas de cacaueiro. **Rev. Bras. Frutic.**, v. 34, p. 881-887, 2012.
19. SYAMSIRO, M.; SAPTOADI, H.; TAMBUNAN, B. M.; PAMBUDI, N. A. A. Preliminary study on use of cocoa pod husk as a renewable source of energy in Indonesia. **Energy for Sustainable Development**, 2011.
20. 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.