



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDODINÂMICA DE UMA
MISTURA DE RESÍDUO DE ACEROLA E SOJA EM LEITO DE
JORRO**

Carolina Turolla Bortolotti

Uberlândia

2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**ESTUDO EXPERIMENTAL DA FLUIDODINÂMICA DE UMA MISTURA DE
RESÍDUO DE ACEROLA E SOJA EM LEITO DE JORRO**

Carolina Turolla Bortolotti

**Dissertação de Mestrado apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como
parte dos requisitos necessários à obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Química, da Faculdade de Engenharia
Química, área de Concentração de
Desenvolvimento de Processos Químicos.**

Uberlândia - MG

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

B739e Bortolotti, Carolina Turolla, 1988-
2012 Estudo experimental da fluidodinâmica de uma mistura de resíduo
de acerola e soja em leite de jorro / Carolina Turolla Bortolotti. - 2012.
101 f. : il.

Orientadores: Cláudio Roberto Duarte e Marcos Antônio de Souza
Barrozo.

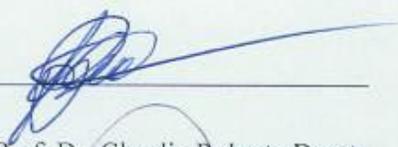
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Química.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Processo de leite de jorro - Teses.
3. Acerola - Teses. 4. Soja - Teses. 5. Resíduos - Teses. I. Duarte, Cláudio
Roberto, 1975- II. Barrozo, Marcos Antônio de Souza. III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química. IV. Título.

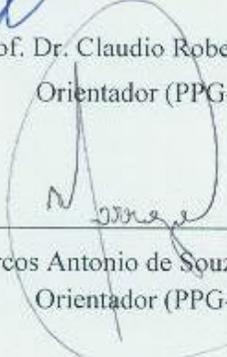
CDU: 66.0

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 18 DE DEZEMBRO DE 2012

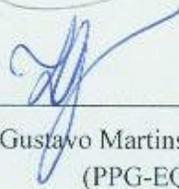
BANCA EXAMINADORA:



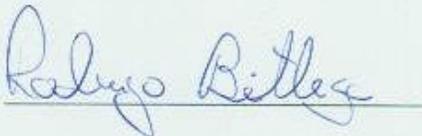
Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
Orientador (PPG-EQ/UFU)



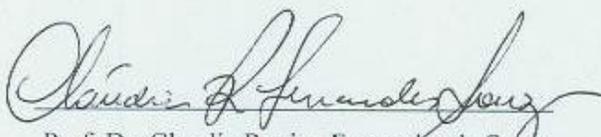
Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
Orientador (PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
(PPG-EQ/UFU)



Prof. Dr. Rodrigo Bettega
(FEQUI/UFU)



Prof. Dr. Cláudia Regina Fernandes de Souza
(FCFRP/USP)

Dedico incondicionalmente este trabalho a Raquel e Dimas Bortolotti, meus pais, sem o apoio e amor dos quais eu nada seria.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não seria possível sem o apoio de algumas pessoas que com maior ou menor intensidade, estiveram presentes em minha jornada. Por isso aproveito esse espaço para agradecer a algumas delas.

Agradeço aos meus pais mais uma vez, por todas as ligações atendidas, todos os problemas solucionados e todas as broncas que me foram dadas ao longo não só desse trabalho como também de minha vida. Ao meu irmão Ricardo, eu agradeço por ser fonte de inspiração acadêmica e intelectual e pela serenidade transmitida em todos os momentos.

Agradeço as amigas Camila, Clara, Vanessa e Mariana por serem minha fortaleza nos momentos difíceis, por me distraírem nos momentos de tristeza e me mostrarem que “não tá fácil pra ninguém”.

Às minhas irmãs por opção, que mesmo com toda a distância e ausência, sempre estiveram presentes em minha vida: Duda, Fer, Ayra, Raquel e Maíra, amo vocês pra sempre e nada vai conseguir mudar.

Muito obrigada aos alunos Bruno, Marielle, Priscilla, Isabelle, Ana Vitoria, Lucas e Otavio, pela ajuda no laboratório. Agradeço também aos companheiros de laboratório, Mariana, Ricardinho, Bia, Kassia, Curt, Marcos Roberto, Angélica, Irineu, Jânio, Diogo, Danylo, Pires e Renata por tornarem o dia-a-dia menos estressante e dividirem seu conhecimento comigo.

Aos meus companheiros de pós, Dio, Renata, Larissa, Rondinele, Verônica, Wilson, Jana, Mauri, Magno e Hávala, muito obrigada pela divisão de experiências e pelo companheirismo.

Ao orientador Claudio, por ter me aceitado e me auxiliado na árdua missão de me tornar mestre.

Ao amigo e orientador Marquinho, obrigada pela paciência, amizade e ensinamentos passados. Você agregou muito na minha vida acadêmica e pessoal. Nunca me esquecerei de todas as nossas conversas.

E por último a Deus, por colocar essas pessoas especiais na minha vida, sem as quais eu não conseguiria superar os obstáculos, o mundo seria bem menos divertido e eu uma pessoa bem menos feliz.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Acerola	3
2.2 Compostos Bioativos	7
2.2.1 Ácido Ascórbico	7
2.2.2 Ácido Cítrico	9
2.2.3 Compostos Fenólicos	10
2.2.4 Flavonoides	10
2.3 Leito de jorro	12
2.4 Misturas binárias em leito de jorro	21
2.5 Modelos de empacotamento de misturas binárias de partículas	23
2.6 Modelos de Cinética de Secagem	26
2.7 Cinética da Degradação da Vitamina C	27
2.7.1 Modelos de Degradação da Vitamina C	29
2.8 Relevância do Tema	32
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Amostra e caracterização	33
3.2 Unidade Experimental	37
3.3 Curvas Características	39
3.4 Secagem	40
3.5 Segregação	40

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 Análise dos compostos bioativos.....	42
4.2 Caracterização das partículas	44
4.3 Porosidade da mistura de soja e acerola	45
4.4 Ângulo de repouso da mistura resíduo de acerola-soja	50
4.5 Fluidodinâmica da mistura em leito de jorro	52
4.5.1 Curvas características de vazão de ar em função da queda de pressão	52
4.5.2 Efeito das variáveis x_D e H_0 sobre a condição de jorro mínimo	60
4.5.3-Segregação axial de partículas em leito de jorro	67
4.5.4 Cinética de secagem	70
4.5.5 Cinética de variação dos compostos bioativos ao longo do tempo de secagem	71
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	76
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	78
APÊNDICES	90
APÊNDICE 1 - AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS PARA O CAMU CAMU92	
APÊNDICE 2 – ANÁLISES DO RESÍDUO DE ACEROLA REALIZADAS PELO ITAL .	94
APÊNDICE 3 – CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE ACEROLA	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Conteúdo de vitamina C em frutos de acerola, oriundos de diferentes países (ARAUJO e MINAMI, 1994).	4
Tabela 2-2 Composição da acerola em 100 g de polpa (MILLER <i>et al.</i> , 1961).	5
Tabela 2-3 Trabalhos da literatura de secagem de frutas em leito de jorro.	19
Tabela 2-4 Modelos para cálculo da porosidade de mistura de partículas.....	25
Tabela 2-5 Modelos de cinética de secagem (BARROZO, 1995).....	27
Tabela 3-1 Propriedades do leito de jorro.	39
Tabela 4-1 Propriedades do resíduo de acerola e da soja.....	44
Tabela 4-2 Característica do resíduo de acerola após 1 hora de estufa.....	45
Tabela 4-3 Características do resíduo de acerola após 2 horas de estufa	45
Tabela 4-4 Dados da composição das misturas de soja e resíduo de acerola estudados.....	46
Tabela 4-5 Modelos para cálculo da porosidade de mistura de partículas.....	48
Tabela 4-6 Propriedades da mistura resíduo de acerola-soja a diferentes alturas de leito estático e frações mássicas.	50
Tabela 4-7- Condições dos experimentos e respostas referentes à condição de jorro mínimo para a altura de 6 cm.	60
Tabela 4-8- Condições dos experimentos e respostas referentes à condição de jorro mínimo para a altura de 8 cm.	61
Tabela 4-9- Condições dos experimentos e respostas referentes à condição de jorro mínimo para a altura de 9 cm.	62
Tabela 4-10- Efeitos das variáveis x_D e H_0 sobre a vazão de alimentação de ar no jorro mínimo ($R^2= 0,8624$).	63
Tabela 4-11- Efeitos das variáveis x_D e H_0 sobre a queda de pressão na condição de jorro mínimo ($R^2= 0,9253$).	65
Tabela 4-12 - Modelos de cinética de secagem.	70
Tabela 4-13- Coeficiente quadrático de correlação dos modelos de cinética de secagem para a mistura resíduo de acerola - soja.	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Oxidação do ácido ascórbico a ácido dehidroascórbico.....	8
Figura 2.2- Estrutura básica dos flavonoides.....	11
Figura 2.3- O leito de jorro com suas regiões características (DUARTE, 2006).	13
Figura 2.4- Curva característica de um leito de jorro.	14
Figura 2.5 Mistura de partículas não esféricas: (a) influência da esfericidade no empacotamento dos leitos de monopartículas; (b) mistura de partículas com esfericidade distinta, em que predomina o mecanismo de preenchimento.....	24
Figura 3.1 Resíduo de acerola.	33
Figura 3.2 Ângulo de repouso estático.....	36
Figura 3.3 Esquema do ângulo de repouso dinâmico.	37
Figura 3.4 Esquema da unidade experimental (a) equipamentos e instrumentação da unidade de leito de jorro; (b) leito de jorro com a inserção de guilhotinas na região cônica.	38
Figura 4.1 Teores dos compostos bioativos presentes na acerola <i>in natura</i> , na polpa vendida comercialmente e nos resíduos agroindustriais de acerola (borra e semente). a) fenólicos b) flavonoides c) vitamina C d) acidez	42
Figura 4.2 Porosidade de misturas binárias de fibras de diferentes valores de λ	47
Figura 4.3 Porosidade da mistura soja e resíduo de acerola em função da fração mássica de resíduo de acerola (x_D): dados experimentais e simulados.	47
Figura 4.4 Volume específico de misturas para os diferentes valores de G do modelo D Finkers e Hoffman (1998).	49
Figura 4.5 Ângulo de repouso estático do resíduo de acerola e da soja.....	51
Figura 4.6 Ângulo de repouso estático do resíduo de acerola a diferentes umidades.	51
Figura 4.7 Ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola e da soja.	52
Figura 4.8 Ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola a diferentes umidades.....	52
Figura 4.9- Curvas características da relação entre vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D=0$	53
Figura 4.10 Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D =0,15$	53

Figura 4.11- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,25$	53
Figura 4.12- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,35$	54
Figura 4.13- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,45$	54
Figura 4.14- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,50$	54
Figura 4.15- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0$	55
Figura 4.16- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,15$	55
Figura 4.17- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,25$	55
Figura 4.18- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,35$	56
Figura 4.19- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,50$	56
Figura 4.20- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,65$	56
Figura 4.21- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D = 0$	57
Figura 4.22- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D = 0,05$	57
Figura 4.23- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D = 0,10$	57
Figura 4.24- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D = 0,15$	58
Figura 4.25- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D = 0,20$	58
Figura 4.26- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D = 0,30$	58

Figura 4.27- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,40$	59
Figura 4.28- Processo de formação da condição de jorro estável em um meio leito, contendo mistura binária de soja e sementes de acerola ($x_D=0,25$ e $H_0=8$ cm).....	59
Figura 4.29- Superfície de resposta para a vazão de ar na condição de jorro mínimo (Q_{jm}) em função da fração mássica da maior partícula na mistura (x_D) e da altura de leito estático (H_0).	64
Figura 4.30- Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de jorro mínimo em função da fração mássica da maior partícula na mistura e da altura de leito estático.....	66
Figura 4.31- Índice de mistura para as diferentes condições iniciais. a) altura de leito estático de 6 cm b) altura de leito estático de 8 cm.	67
Figura 4.32- Perfil axial da composição da mistura de partículas com desvio padrão para a altura de 6 cm de leito estático a) fração mássica de 0,15 b) fração mássica de 0,25 e c) fração mássica de 0,35	68
Figura 4.33- Perfil axial da composição da mistura de partículas com desvio padrão para a altura de 8 cm de leito estático a) fração mássica de 0,15 b) fração mássica de 0,25 e c) fração mássica de 0,35.	68
Figura 4.34- Índice de mistura de uma mistura de resíduo de acerola e soja $x_D=0,25$ e $H_0=8$ cm em leito de jorro e temperatura ambiente ao longo do tempo de secagem.....	69
Figura 4.35- Dados experimentais de cinética de secagem da semente de acerola. a) ajustado pelo modelo de Overhults b) ajustado pelo modelo de Page.	71
Figura 4.36 - Cinética de secagem do resíduo de acerola	72
Figura 4.37 - Índice de Mistura no topo da mistura de resíduo de acerola e soja ao longo do tempo em um leito de jorro.	72
Figura 4.38 - Variação da vitamina C no resíduo de acerola em função do tempo.....	73
Figura 4.39 - Variação dos compostos fenólicos do resíduo de acerola em função do tempo.	74
Figura 4.40 - Variação dos compostos flavonoides do resíduo de acerola em função do tempo.	74

LISTA DE SÍMBOLOS

$A, B, C, n,$	Parâmetro das Equações
b	Vetor dos parâmetros das variáveis isoladas
B	Matriz dos termos quadráticos e interação
C	Concentração de compostos bioativos
C_0	Concentração inicial de compostos bioativos
d_5, d_{50}, d_{95}	Diâmetro o qual 5, 50 e 95% das partículas são inferiores, respectivamente
D_c	Diâmetro da coluna
d_{eq}	Diâmetro equivalente individual das partículas não esféricas
D_i	Diâmetro de entrada
d_p	Diâmetro das partículas
$D_r(w), z(w)$	Funções polinomiais do conteúdo de água
D_r, C_1 e C_2	Parâmetros do modelo WLF
$F(\delta), f(\delta), d(\delta), G(\delta)$	Funções de interações entre as partículas
H	Altura do leito
H_0	Altura de leito estático
I_M	Índice de Mistura
K	Constante da taxa
m_D, m_d, m_{D+d}	Massa do resíduo de acerola, da soja e total respectivamente
m_{Df}	Massa final de resíduo
m_{Di}	Massa de resíduo no compartimento i
MR	Razão de Umidade
m_{tf}	Massa total final
p	Nível de significância
Q_{jm}	Vazão de jorro mínimo

R^2	Coefficiente quadrático de correlação
t	Tempo
T	Temperatura
T_f	Temperatura Final
T_g	Temperatura de transição vítrea
T_r	Temperatura de referência
V	Volume total da mistura
V_D V_d	Volume parcial do resíduo de acerola e da soja
V_{D+d}	Volume total do resíduo de acerola e da soja
V_L	Volume do leito na altura de 8 cm
\bar{V}_i	Volume parcial individual médio
w	Atividade de água
x'	Matriz das variáveis codificadas
x_1 e x_2	Variáveis codificadas de altura e fração mássica, respectivamente
x_D	Fração mássica do resíduo de acerola
X_D X_d	Fração volumétrica do resíduo de acerola e da soja, respectivamente
$X_{D,min}$	Fração volumétrica mínima da mistura
x_{D0}	Fração mássica inicial de resíduo de acerola
x_{Di}	Fração mássica de resíduo de acerola no compartimento i
x_{Dt}	Fração mássica total de resíduo de acerola
X_i	Fração volumétrica individual
α	Ângulo de repouso dinâmico
δ	Razão entre os diâmetros das duas partículas
$-\Delta P_{jm}$	Queda de pressão no mínimo jorro
ϵ	Porosidade total da mistura

$\varepsilon_D^0, \varepsilon_d^0$	Porosidade inicial do leito de resíduo de acerola e soja, respectivamente
ϕ_i	Esfericidade da partícula
γ	Ângulo do cone
λ	Razão entre o comprimento e largura da partícula
ρ_{ap}	Densidade aparente
ρ_{real}	Densidade real

RESUMO

A acerola (*Malpighia emarginata*) é rica em vitamina C e compostos bioativos. O Brasil é um dos três principais produtores de acerola do mundo sendo um dos maiores produtores de resíduos agrícolas. Uma forma de reutilizar esses resíduos é fazendo a secagem do mesmo. O resíduo de acerola tem uma baixa escoabilidade no leito de jorro, devido a sua baixa densidade e umidade elevada. Por isso, soja pode ser utilizada como material de apoio mantendo assim, a estabilidade fluidodinâmica e prevenindo a contaminação física do material, mantendo suas características alimentícias. Devido às diferenças no tamanho das partículas, densidades e forma dos materiais utilizados, a mistura de acerola e soja está sujeita à segregação de partículas. Para quantificar a segregação, o Índice de Mistura foi definido como sendo a razão entre a concentração final local e a concentração inicial global de resíduo de acerola. Ao longo da secagem do resíduo de acerola, há uma alteração nos teores dos compostos bioativos devido à influência de fatores como temperatura e vazão do ar de secagem. O presente trabalho estudou a fluidodinâmica de um leito de jorro operando com mistura de resíduo de acerola e soja, a diferentes frações mássicas de resíduo de acerola, em diferentes alturas de leito estático. Foi analisada a segregação da mistura e a partir dos resultados obtidos foi possível quantificar o efeito da concentração de resíduo de acerola sobre o Índice de Mistura e concluiu-se que há uma concentração de resíduo de acerola no topo do leito para todas as alturas de leito estático e frações mássicas estudadas. Observou-se também que a segregação é intensificada com um aumento do tempo de secagem. Também foram quantificados os teores de fenólicos, flavonoides, ácido ascórbico bem como a umidade a diferentes tempos de secagem e foi possível verificar a umidade de equilíbrio bem como um aumento nos teores dos compostos bioativos quantificados após a secagem.

ABSTRACT

West Indian cherry (*Malpighia emarginata*) is rich in vitamin C and other bioactive compounds. Brazil is one of the three largest producers of fruit in the world, being one of the greatest producer of agricultural residues. Drying is a method to allow the reuse of these residues. The residue of West Indian cherry has a low flowability in the spouted bed due to the low density of biomass and high moisture, thus it could be used soybean as an auxiliary material to keep the fluid dynamic stability and maintain the food characteristics of the final product. As this process involves a mixture of solids of different sizes, shapes and densities, it is subjected to particle segregation phenomena. In order to quantify the segregation, the Index of Mixture was defined as the ratio between the final local concentration and the initial global concentration of west Indian cherry. During the drying, there is a change in the contents of the bioactive compounds due to the influence of temperature and air flow rate. The present paper studied the fluid dynamic of the mixture of West Indian cherry residue and soybean in a spouted bed operating with different mass fraction of biomass in different heights of static bed. It was analyzed the mixture segregation and from the achieved results was possible to quantify the effect of the west Indian cherry concentration on degree of mixing and to conclude that there is a concentration of West Indian cherry residue on the top of the bed for all the static bed heights and mass fractions studied. It were also quantified the contents of phenolics, flavonoids, ascorbic acid, as well as moisture in different drying times and it was possible to verify the equilibrium moisture as well as an increase on the bioactive compounds contents quantified after drying.

1. INTRODUÇÃO

As indústrias beneficiadoras de frutas geram uma elevada quantidade de resíduos, incluindo cascas, sementes, aparas, bagaços, membranas e vesículas. Tais resíduos apresentam elevadas taxas de constituintes indispensáveis à alimentação humana (FORTALEZA, 2005), como: fibras, vitaminas, minerais, substâncias fenólicas e flavonoides (DUZZIONI, 2010), com efeitos benéficos na manutenção da saúde e na prevenção de doenças degenerativas (LUXIMON-RAMMA *et al.*, 2003).

A acerola (*Malpighia emarginata*) ou cereja das Antilhas é originária da América tropical, sendo amplamente cultivada nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. A constatação dos elevados teores de vitamina C, ou ácido ascórbico, naturalmente encontrados neste fruto, incrementou o seu consumo na forma de suco, compota, geleia e no enriquecimento de sucos e de alimentos dietéticos (CARPENTIERI-PÍPOLO *et al.*, 2002). Além disso, em virtude do alto teor de compostos bioativos tem favorecido a ampliação de oportunidades para o seu cultivo, processamento e comercialização (AGOSTINI-COSTA, 2003).

Santos *et al* (2010) relata que os resíduos do processamento da acerola representam 40% do volume processado. Estes resíduos são, geralmente, desprezados quando poderiam ser utilizados como fontes alternativas de nutrientes, com o objetivo de aumentar o valor nutritivo da dieta de populações carentes, bem como solucionar deficiências dietéticas alimentares.

De acordo com Santos e Silva (2008), a quantidade de água em frutas e vegetais é superior a 80%, o que limita sua vida útil e dificulta as condições de transporte e armazenamento. Como consequência disso, tem ocorrido um aumento do consumo de frutas e vegetais processados, que podem ser armazenados e transportados a baixo custo. Sua quantidade reduzida de água dificulta o desenvolvimento de microrganismos, responsáveis pela deterioração de alimentos frescos.

A secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos processos agroindustriais, cerâmico, químico, alimentício, dentre outros.

A técnica de secagem em leito de jorro foi desenvolvida inicialmente para a secagem de grãos. Recentemente, há estudos na área de secagem pastas e líquidos utilizando inertes (CUNHA *et al.*, 2000, MEDEIROS *et al.*, 2009) bem como para o uso em processos de recobrimento de sólidos (DUARTE, 2006).

Durante a secagem das partículas no leito de jorro, as colisões que ocorrem na região da fonte promovem uma dispersão das partículas, que é mais pronunciada para partículas menores e menos densas. Isso aliado à diferença nas velocidades terminais das partículas pode causar a segregação das mesmas (ISHIKURA *et al.*, 2003).

Tendo em vista que os resíduos da acerola não são aproveitados como fonte nutricional para alimentação humana e que existe, ainda, um desconhecimento por parte da comunidade científica (nutricionistas, tecnólogos e/ou técnicos em alimentos e engenheiros químicos e de alimentos) a respeito desses resíduos (SANTOS *et al.*, 2010), fez-se necessário a elaboração desse trabalho.

Durante a secagem de frutas, legumes e hortaliças, há uma degradação dos compostos presentes em tais materiais, devido à exposição ao calor, luz, oxigênio, dentre outros fatores (SANTOS e SILVA, 2008). Por isso, um estudo quantificando tais compostos como os fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico após a secagem é necessário. Sendo assim, este estudo também objetivou avaliar o conteúdo de compostos fenólicos totais, o teor de flavonoides, o teor de ácido ascórbico e a acidez dos resíduos agroindustriais do processamento da polpa das frutas *in natura* e após secas em um secador de leito de jorro a diferentes tempos de secagem.

Este estudo teve como objetivo geral a investigação da fluidodinâmica da mistura de soja e resíduo agroindustrial de acerola, em diferentes alturas de leito estático e em diferentes proporções da mistura, avaliando o efeito da altura de leito estático e da composição do leito na segregação e fluidodinâmica do mesmo, visando um futuro estudo de secagem do mesmo.

Como objetivos específicos, este estudo objetivou caracterizar o resíduo de acerola e a soja, quantificar o ângulo de repouso estático e dinâmico da soja e do resíduo de acerola para tentar explicar a diferença no comportamento fluidodinâmico dos mesmos, investigar a fluidodinâmica da mistura de resíduo de acerola e soja a diferentes alturas de leito estático e proporções mássicas, visando o trabalho de secagem e avaliar o conteúdo de compostos fenólicos totais, o teor de flavonóides e o teor de ácido ascórbico dos resíduos agroindustriais do processamento da polpa das frutas *in natura* e após secas em um secador de leito de jorro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Acerola

O Brasil é um dos três maiores produtores de frutas do mundo. Sua produção superou 43 milhões de toneladas em 2008, o que representa 5% da produção mundial. Com esse saldo, o país fica atrás apenas da China e da Índia. Cerca de 53% da produção brasileira é destinada ao mercado de frutas processadas e 47% ao mercado de frutas frescas. Existe um mercado externo potencial acessível à fruticultura brasileira de 28,3 milhões de toneladas (SEBRAE, 2009). Existem plantios comerciais de acerola em praticamente todos os estados brasileiros (ALVES, 1996).

A acerola (*Malpighia emarginata*), também conhecida como cereja das Antilhas é um arbusto frutífero, cujo cultivo para fins comerciais vem se expandindo no Brasil, país considerado o maior produtor, consumidor e exportador de acerola do mundo (CHAVES *et al.*, 2004). A acerola apresenta potencial para industrialização, uma vez que pode ser consumida sob forma de compotas, geleias, utilizada no enriquecimento de sucos e de alimentos dietéticos, na forma de alimentos nutracêuticos, como comprimidos ou cápsulas, empregados como suplemento alimentar, chás, bebidas para esportistas, barras nutritivas e iogurtes (CARPENTIERI-PÍPOLO *et al.*, 2002). Pode ser consumida também na forma de suco (integral ou concentrado), licor, *soft drinks*, bombons, goma de mascar, néctares, purê, sorvetes, cobertura de biscoitos, refrigerantes etc. No entanto, as formas mais comuns de comercialização da acerola são o fruto *in natura*, a polpa congelada e o suco engarrafado (CARVALHO e MANICA, 1994; YAMASHITA *et al.*, 2003).

A acerola é uma planta originária da América Central que tem sido propagada pela América do Sul, incluindo o Brasil, devido a sua boa adaptação ao solo e ao clima. Sua importância nutricional está relacionada principalmente ao alto teor de vitamina C (VENDRAMINI e TRUGO, 2000). De acordo com Carvalho e Manica (1994) e Araújo e Minami (1994), cada 100 g de polpa contém de 1000 a 2500 mg de vitamina C, teor comparável apenas ao camu-camu, uma fruta nativa da Amazônia, que apresenta cerca de 2950 mg de vitamina C para cada 100 g de polpa integral (ANDRADE *et al.*, 1991).

Na Tabela 2.1 pode-se observar o teor de ácido ascórbico em frutos de acerola produzidos em diversas localizações geográficas. Os resultados destoantes de frutos oriundos da Guatemala devem-se, possivelmente, a altitude onde os pomares estão localizados. A composição química do fruto é dependente de uma série de fatores, como a espécie cultivada, condições ambientais e também do estágio de maturação da fruta.

Tabela 2.1 Conteúdo de vitamina C em frutos de acerola, oriundos de diferentes países (ARAUJO e MINAMI, 1994).

Fonte Bibliográfica	País de origem dos frutos	Espécie Botânica	Vitamina C* (mg/100g)
Ansejo e Gusmán (1946)	Porto Rico	<i>M. punicifolia</i>	2247
Luiz et al. (1946)	Cuba	<i>M. glabra</i>	956
Mustard (1946)	Flórida	<i>M. punicifolia</i>	1317
Jaffe et al. (1950)	Venezuela	<i>M. punicifolia</i>	1130
Munsell et al. (1950a)	Guatemala	<i>M. glabra</i>	15
Munsell et al. (1950b)	Guatemala	<i>M. glabra</i>	16
Cravioto (1951)	México	<i>M. punicifolia</i>	2520
Cravioto et al. (1951)	México	<i>M. glabra</i>	125
Leme Jr. (1951)	Brasil	<i>M. glabra</i>	560 - 1540
Gusmán (1953)	Guatemala	<i>M. glabra</i>	26
Floch e Gelard (1955)	Guiana Francesa	<i>M. punicifolia</i>	1759
Massien et al. (1955)	México	<i>M. punicifolia</i>	1900
Ansejo (1956)	Haiti	<i>M. punicifolia</i>	1180
Ansejo e Santmaria (s.d.)	Colômbia	<i>M. punicifolia</i>	1100
Fitting e Miller (1958)	Havai	<i>M. punicifolia</i>	1945
Brune et al. (1966)	Brasil	<i>M. glabra</i>	1570
Brown (1967)	Queensland	<i>M. glabra</i>	1625
Fonseca et al. (1969)	Brasil	<i>M. punicifolia</i>	1975
Leme Jr. Et al. (1973)	Brasil	<i>M. punicifolia</i>	1050
Alves (1993)	Brasil	<i>M. emarginata</i>	1021 - 1822

* Vitamina C determinada na polpa de frutos parcialmente maduros

A determinação da composição centesimal, mineral e vitamínica da acerola foi realizada por Miller *et al.* (1961), que analisaram lotes mistos de acerola. Os resultados são apresentados na Tabela 2.2. Além da vitamina C, a acerola possui outras vitaminas, mas em pequena quantidade. Os autores consideraram a acerola uma fonte pobre de vitaminas do

complexo B e uma fonte regular de vitamina A. Quanto ao teor de minerais também não foi considerada uma fonte importante. Além dos ácidos ascórbico e dehidroascórbico, a acerola possui outros ácidos orgânicos. Asenjo (1980) relata que a acidez total presente no suco de frutos maduros foi de 81,6 a 188,5 mL de NaOH 0,1 N em 100 mL de suco e de 133,8 a 208,4 mL em suco de frutos parcialmente maduros. A acidez do suco variou proporcionalmente ao ácido ascórbico presente, mas não de forma linear, provavelmente devido à presença de outros ácidos, em particular o ácido málico. Santini (1952), *apud* Asenjo (1980), determinou que o ácido málico constitui de 25 a 50% dos ácidos totais presentes na acerola. O ácido cítrico foi encontrado apenas como traço e o ácido tartárico não havia sido detectado até então. Estes ácidos orgânicos têm um papel importante no metabolismo geral de frutas, participando da síntese de compostos fenólicos, lipídeos e compostos voláteis, apresentando também um papel fundamental no sabor característico das frutas (ULRICH, 1970).

Tabela 2.2 Composição da acerola em 100 g de polpa (MILLER *et al.*, 1961).

Composição aproximada	[g]
Água	91,1
Proteína	0,68
Extrato etéreo	0,19
Fibra bruta	0,60
Cinzas	0,45
Carboidratos*	6,98
Minerais	[mg]
Cálcio	8,70
Fósforo	16,20
Ferro	0,17
Vitaminas	[mg]
Caroteno	0,408
Tiamina	0,028
Riboflavina	0,078
Niacina	0,340
Ácido ascórbico	2329

*Obtido por diferença

Quanto ao conteúdo de açúcares, Asenjo (1980), utilizando técnicas cromatográficas, verificou a presença de glicose, frutose e sacarose. Quanto ao teor de açúcares totais, Alves *et al.* (1995) encontraram teores entre 2,5 a 3,3%, para a acerola ainda verde, enquanto o teor encontrado para acerolas maduras chegou a 5%. Manica e Carvalho (1995) reportam valores mais próximos, 4,5% para acerola verde e 4,7% para a acerola madura, o mesmo ocorrendo com Vendramini e Trugo (2000) que encontraram 4,3% de açúcares totais para a acerola verde e 4,4% para a acerola madura. O amadurecimento da fruta envolve uma série de reações bioquímicas complexas, como hidrólise de amido, conversão de cloroplastos em cromoplastos com a transformação da clorofila, produção de carotenóides, antocianinas, fenóis e compostos voláteis (SPEIRS e BRADY, 1991 *apud* VENDRAMINI e TRUGO, 2000), resultando em uma fruta delicada, difícil de ser transportada e manuseada.

Os resíduos do processamento da acerola representam 40% do volume de produção. Estes resíduos são, geralmente, desprezados quando poderiam ser utilizados como fontes alternativas de nutrientes, com o objetivo de aumentar o valor nutritivo da dieta de populações carentes, bem como solucionar deficiências dietéticas alimentares.

O uso eficiente e sustentável dos resíduos agroindustriais é altamente viável e minimiza o impacto ambiental. Uma das opções mais eficazes é a recuperação de constituintes bioativos de plantas e alimentos, os quais podem ser utilizados na indústria farmacêutica, cosmética e alimentícia (MAKRIS *et al.*, 2007). Além disso, alternativas economicamente vantajosas para explorar o conteúdo antioxidante de resíduos de frutas, das indústrias processadoras de suco, podem fornecer suplementos nutricionais de baixo custo para a população (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

Em busca de uma melhor qualidade de vida, certos compostos químicos que exercem uma potente atividade biológica, os compostos bioativos, têm se destacado como fonte de benefícios para saúde humana. Os compostos bioativos, por possuírem propriedade antioxidante, atuam minimizando os danos oxidativos causados ao organismo pelas espécies reativas de oxigênio e nitrogênio, prevenindo doenças crônicas não transmissíveis degenerativas, como cardiovasculares, cânceres, distúrbios metabólicos, doenças neurodegenerativas e enfermidades inflamatórias (CARRATU e SANZINI, 2005).

Uma classe de alimentos que vem sendo discutida atualmente são os denominados alimentos funcionais. Genericamente estes alimentos podem ser definidos como aqueles com um possível impacto sobre a saúde individual, o desempenho físico, ou estado da mente em adição ao seu valor nutritivo normal (GIESE, 1995).

Pesquisas estão voltadas para a busca de compostos naturais que apresentem propriedades funcionais, com vistas a substituir ou reduzir o uso dos antioxidantes sintéticos, pois o emprego dos mesmos pela indústria de alimentos, como inibidores da oxidação lipídica de óleos, gorduras e alimentos que os contém, cuja inocuidade tem sido questionada, aliada ao fato de que os consumidores, preocupados com a saúde, têm demonstrado interesse por produtos naturais (PESCHEL *et al.*, 2006). Neste contexto, tem sido investigada a ação antioxidante de sementes de citros (BOCCO *et al.*, 1998); de casca de maçã (WOLFE *et al.*, 2003); de sementes de uvas (MIELNIK *et al.*, 2006); entre outros. Entretanto, estudos relacionados à atividade antioxidante de resíduos de frutas tropicais e subtropicais são escassos (CAETANO, 2009).

2.2 Compostos Bioativos

Os principais compostos bioativos presentes na acerola e que apresentam importantes atividades biológicas, em especial como agentes antioxidantes e preservantes são o ácido ascórbico (vitamina C), o ácido cítrico, e os compostos fenólicos, dentre os quais destacam-se os flavonoides. A seguir apresenta-se uma breve revisão sobre estes compostos, como eles atuam e suas principais aplicações.

2.2.1 Ácido Ascórbico

O ácido ascórbico ou vitamina C é um poderoso antioxidante e funciona como agente preservativo em alimentos, evitando escurecimento e outras reações oxidativas. As moléculas do ácido ascórbico sofrem oxidação antes que as outras moléculas do alimento se oxidem, impedindo e protegendo essas outras moléculas da oxidação (PIETTA, 2000). O ácido ascórbico oxida-se facilmente a ácido dehidroascórbico conforme a Figura 2.1.

tecnologia, o aumento dos gastos destinados à saúde, o envelhecimento da população, e um maior enfoque nos benefícios atingidos através da dieta.

O teor de vitamina C de um produto é influenciado por uma grande variedade de fatores como grau de maturação, tratamentos culturais, condições de plantio e manuseio pré e pós-colheita, bem como estocagem. Estes fatores podem ser controlados pelo emprego de tecnologia adequada (LEE e KADER, 2000).

Mapson (1970) ressalta que enzimas contendo ferro e cobre em seus grupos prostéticos são as mais eficientes no processo de destruição oxidativa do ácido ascórbico. Existem pelo menos quatro enzimas que ocorrem em frutas e são as principais responsáveis pela destruição oxidativa da vitamina: ácido ascórbico oxidase, fenolase, citocromo oxidase e peroxidase. Asenjo (1980) isolou em frutos de acerola tanto em desenvolvimento, quanto maduros, a enzima ascorbato oxidase, cuja atividade foi rapidamente diminuída pelo abaixamento da temperatura. Quanto maior o grau de maturação, maior a atividade desta enzima.

2.2.2 Ácido Cítrico

O ácido cítrico além de antioxidante, também é um agente quelante, e é usado juntamente com o ácido ascórbico para formar quelatos de baixo peso molecular com o ferro aumentando, assim, sua absorção pelo organismo, quelar pro-oxidantes, os quais podem causar rancidez, e também para inativar enzimas como a polifenoloxidase que provocam reações de escurecimento (HANSULD E. BRIANT, 1954).

Na indústria alimentícia é usado como acidulante e antioxidante, previne a turbidez, auxilia na retenção da carbonatação, potencializa os conservantes, confere sabor “frutal” característico, prolonga a estabilidade da vitamina C, reduz alterações de cor, realça os aromas e tampona o meio.

2.2.3 Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos e polifenólicos constituem um amplo grupo de substâncias químicas, considerados metabólitos secundários das plantas, com diferentes estruturas químicas e atividades, englobando mais de 8000 compostos distintos. A distribuição dos compostos fenólicos nos tecidos e células vegetais varia consideravelmente de acordo com o tipo de composto químico, situando-se no interior das células e na parede celular (MARTINEZ-VALVERDE *et al.*, 2000). O interesse nesta classe de compostos está relacionado ao seu envolvimento no crescimento e no metabolismo das plantas, e no impacto exercido sobre a qualidade sensorial e nutricional de frutas e vegetais, e mais recentemente, na atividade fisiológica exercida em humanos (ROBARDS *et al.*, 1999). Quimicamente, os compostos fenólicos são substâncias que possuem um anel aromático, um anel benzeno, com um ou mais grupos hidróxidos, incluindo derivados funcionais. Os polifenóis variam desde moléculas simples, como ácidos fenólicos, até compostos altamente polimerizados, como os taninos (MARTINEZ-VALVERDE *et al.*, 2000). Segundo Pietta (2000), os compostos fenólicos podem se agrupar em diferentes classes, dependendo de sua estrutura química básica, sendo que os ácidos fenólicos, os ácidos cinâmicos, os flavonoides e os taninos, são os grupos de maior importância nutricional.

A atividade antioxidante dos compostos fenólicos é interessante desde o ponto de vista tecnológico, até nutricional. Assim, compostos fenólicos intervêm como antioxidantes naturais do alimento e a obtenção ou preparação de alimentos com um alto conteúdo destes compostos supõem uma redução na utilização de aditivos antioxidantes, resultando em alimentos mais saudáveis, que podem ser incluídos dentro da classe dos alimentos funcionais (MARTINEZ-VALVERDE *et al.*, 2000).

2.2.4 Flavonoides

Os flavonoides correspondem ao mais importante grupo dentro dos compostos fenólicos, dividindo-se em várias subclasses com mais de 5000 compostos (Pietta, 2000), sendo os polifenóis o mais distribuído entre as plantas. A estrutura dos flavonoides, como mostra a Figura 2.2, consiste de um esqueleto de difenil propano ($C_6-C_3-C_6$) com dois anéis benzênicos (A e B) ligado a um anel pirano (C) (BEHLING *et al.*, 2004). Esta estrutura básica

é a responsável pela atividade antioxidante destes compostos, e permite múltiplas substituições e variações no anel pirona dando lugar a formação de flavonóis, flavonas, flavononas, isoflavonoides, catequinas, calconas, dihidrocalconas, antocianidinas, protoantocianidinas e taninos condensados (HERTOG *et al.*, 1993). Os principais subgrupos de flavonoides presentes em frutas são antocianinas, protoantocianinas, flavonóis e catequinas (KÄHKÖNEN *et al.*, 1999).

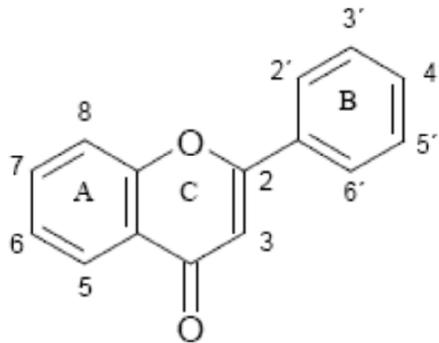


Figura 2.2- Estrutura básica dos flavonoides.

Estudos epidemiológicos apresentam uma relação entre o consumo de flavonoides e a redução no risco de doenças cardiovasculares (HERTOG *et al.*, 1993, 1997; KNEKT *et al.*, 1996; YOCHUM *et al.*, 1999) e alguns tipos de câncer (KNEKT *et al.*, 1997; DE STEFANI *et al.*, 1999; GARCIA-CLOSAS *et al.*, 1999; YANG *et al.*, 2001), mas a evidência ainda é considerada inconclusiva (HOLLMAN, 2001; KRIS-ETHERTON *et al.*, 2002), pois tal associação não foi observada em outros estudos, especialmente com câncer (HERTOG *et al.*, 1995).

Então, determinar a concentração de flavonoides nos alimentos é considerado uma prioridade (NEUHOUSER, 2004; SCALBERT *et al.*, 2005). A composição de flavonoides de algumas frutas tem sido apresentada na literatura, entretanto mais dados são necessários, visto que a composição varia de acordo com a variação na cultura, o tempo, o clima, grau de maturação, processamento e armazenagem das frutas (ROBARDS e ANTOLOVICH, 1997; AHERNE e O'BRIEN, 2002).

2.3 Leito de jorro

O leito de jorro foi desenvolvido, inicialmente, por Mathur e Gishler (1955) para secagem de trigo devido a sua característica de boa agitação dos sólidos e um efetivo contato gás-sólido. Uma grande característica desse equipamento é o movimento cíclico e uniforme das partículas no interior do leito, o que proporciona um bom contato fluido-partícula, garantindo elevados coeficientes de calor e de transferência de massa, justificando, assim, seu uso em secagem e inoculação de grãos (DUARTE, 2006).

A agitação das partículas presentes em seu interior é promovida por uma corrente de gás, e seu movimento no interior do equipamento é cíclico e uniforme, sendo esta uma das razões da aplicação do leito de jorro em diversas atividades industriais, tais como oxidação parcial catalítica de metano para a síntese de gás (MARNASIDOU *et al.*, 1999), recobrimento de comprimidos (KUCHARSKI e KMIEK, 1983), gaseificação de carvão e liquefação (UEMAKI e TSUJI, 1986), pirólise de serragem ou de mistura de resíduos de madeira (AGUADO *et al.*, 2000; OLAZAR *et al.*, 1994), inoculação de sementes de soja (DUARTE, 2006), secagem de vegetais (STANISTAWSKI, 2005) etc.

Neste equipamento há três regiões de comportamento fluidodinâmico distintos: região anular, região de jorro e região de fonte, possuindo, cada uma delas, características específicas, o que aumenta ainda mais a complexidade de seu estudo. Um esquema do leito de jorro e suas regiões podem ser observados na Figura 2.3.

O leito de jorro é geralmente composto por uma base cônica utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito e por um vaso normalmente cilíndrico circular, sendo que, o uso de um vaso completamente cônico ou triangular (GO *et al.*, 2007) também foram estudados (PASSOS *et al.*, 1997).



Figura 2.3- O leito de jorro com suas regiões características (DUARTE, 2006).

O gás em alta velocidade é adicionado a este conjunto pela base inferior do tronco de cone, permeando entre as partículas. A intensa circulação destas partículas começa quando a vazão do gás é suficiente para promover o transporte pneumático das mesmas na região central do leito. Ao atingirem a fonte, as partículas perdem totalmente sua energia cinética, caindo posteriormente na região anular e aí fazem um movimento descendente até regiões inferiores do leito. A região anular, caracterizada pelo deslizamento das partículas em contracorrente ao escoamento do gás, possui porosidade próxima a do leito estático (SANTOS, 2011).

A caracterização fluidodinâmica de um leito de jorro pode ser feita por meio da construção da sua curva característica, a qual representa a queda de pressão em função da velocidade e/ou vazão de gás injetado na entrada do leito (Figura 2.4).

A curva característica representa fisicamente a transição entre um leito estático e um leito de jorro estabelecido, sendo os trechos da curva ilustrados na Figura 2.4 descritos a seguir (MATHUR e EPSTEIN, 1974):

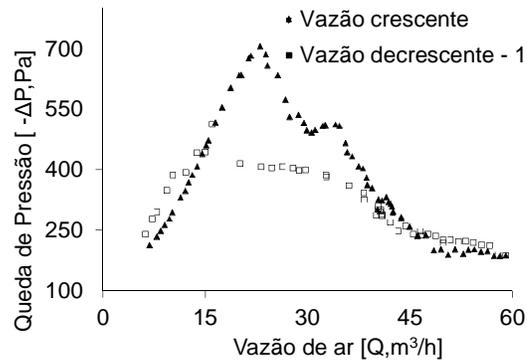


Figura 2.4- Curva característica de um leito de jorro.

Com uma baixa velocidade do gás este simplesmente percola através das partículas sem as perturbar e a queda de pressão aumenta com a velocidade do gás, como em qualquer leito empacotado estático.

Em certa velocidade do gás, a velocidade do jato torna-se suficientemente alta para arrastar as partículas da vizinhança imediata da entrada de fluido, formando uma cavidade relativamente vazia pouco acima desta entrada. As partículas que rodeiam a cavidade são comprimidas contra o material acima, formando um arco compactado, que oferece uma resistência maior para fluir. Por isso, apesar da existência de uma cavidade oca, a queda de pressão total através do leito continua a aumentar.

Com o aumento da 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 aumenta mais 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 os sólidos empacotados 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 uma diminuição 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 redução na queda de pressão. Assim todo o leito torna-se móvel e em estado de jorro.

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

A linha composta por triângulos na Figura 2.4 é dita “curva de ida”, devido ao fato de ser obtida pelo aumento gradativo da velocidade de gás, enquanto que a linha composta por quadrados é denominada “curva de volta”, por ser obtida por um processo inverso ao anterior.

Como na “volta” o leito já se encontra expandido, pode-se observar a ocorrência do fenômeno conhecido como histerese (a curva de “ida” é diferente da curva de “volta”).

Um parâmetro importante na execução do projeto e do aumento de escala em leitos de jorro é conhecido como velocidade de mínimo jorro, o qual pode ser obtido através da curva característica como a representada na Figura 2.4 (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

Segundo alguns autores (KUCHARSKI e KIMIEC, 1983; MARKOWSKI e KAMINSKI, 1983, OLAZAR *et al.*, 1992, JING *et al.*, 2000) a velocidade de mínimo jorro é o ponto no qual a queda de pressão começa a parar de cair ou começa a subir na curva característica (Figura 2.4). Este parâmetro representa o valor mínimo de velocidade para existência de um jorro estável.

Cunha (2008) e outros autores relatam diversas alterações do modelo convencional do leito de jorro. As mais destacadas na literatura, são:

Leito de jorro cônico: Constituído apenas por uma base cônica, esse leito tem como principal vantagem a maior carga, ou seja, para uma mesma altura do leito é possível alimentar 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).

Leito de seção retangular: Leito composto de um prisma retangular com uma base de tronco piramidal, muito utilizado para o estudo da influência do ângulo da base como uma das variáveis de processo de recobrimento (CONCEIÇÃO FILHO, 1997).

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).

Leito de jorro com tubo interno (VIEIRA NETO, 2007): O leito de jorro foi provado ser um método eficaz de contato gás-sólido. Contudo, ele 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, provendo um meio de controle do movimento das partículas e um bom contato gás-sólido na operação (ISHIKURA *et al.*, 2002).

Uma das grandes dificuldades encontradas na utilização de um leito de jorro ocorre quando da necessidade de *scale up*, visto que, dependendo das condições geométricas e operacionais, o leito de jorro apresenta instabilidades caracterizadas por formações de bolhas acarretando o surgimento de pulsações da fonte e, conseqüentemente, a diminuição de sua eficiência. Logo, a fim de superar estes problemas, um melhor entendimento das propriedades do escoamento e do comportamento deste sistema multifásico é de suma importância.

A secagem empregando o leito de jorro apresenta vantagens para produção em pequena escala, devido ao baixo custo de aquisição e instalação. Além disso, esse equipamento pode ser operado a temperaturas elevadas, produzindo pós com características compatíveis aos obtidos nos secadores tipo *spray* (ROSA, 2005). De acordo com Ferreira *et al.* (2002), o secador de leito de jorro tem sido apontado como um equipamento apropriado para a secagem de grãos e pastas ou suspensões e a sua aplicação na secagem de alimentos

tem se ampliado a cada dia, viabilizando a obtenção de produtos com características satisfatórias para o consumo direto, ou o uso como matéria prima para alimentos desidratados.

Mortola *et al.* (2003) estudaram a desidratação de cebola utilizando-se o leito de jorro com alimentação contínua da cebola em pasta e com inertes de polietileno. Foi observado que a carga de inertes é o fator mais significativo dentre as variáveis observadas (carga de inerte, vazão e temperatura do ar de alimentação e vazão de alimentação da pasta). Os mesmos autores analisaram também a produção de gelatina em pó a partir da alimentação de uma pasta de gelatina utilizando-se o leito de jorro e inertes de polietileno e verificaram que os fatores mais significantes foram a vazão e temperatura do ar de entrada.

Souza (2003) secou *Bauhinia forficata* em *spray dryer* e em leito de jorro comparando os resultados obtidos para ambos os casos. Passos *et al* (2004) secou “licor negro” em leito de jorro com partículas inertes visando a produção de um pó combustível. Os autores tiveram problemas com a aglomeração de pó na parede do leito.

Duarte (2006) utilizou o leito de jorro para recobrir grãos de soja e simulou a fluidodinâmica do mesmo utilizando a técnica de CFD e concluiu que o leito de jorro é uma alternativa melhor que as máquinas comerciais utilizadas analisando a qualidade da semente após os processos.

Go *et al.* (2007) estudaram a secagem de trigo em um leito de jorro triangular e formularam um modelo que prevê a densidade *bulk* das partículas no leito como função da umidade inicial do trigo. Tal modelo baseia-se nos modelos de transferência de calor de massa no interior do leito e seguem as suposições descritas por Brooker *et al.* (1974), exceto a de que o coeficiente de transferência de massa convectivo pode ser desprezado, pois a umidade na superfície não está em equilíbrio com o ar de secagem. Para tal modelagem, o secador foi dividido em três seções diferentes, o jorro, a fonte e a região anular.

Cunha (2008) estudou a extração mecânica da bixina em leito de jorro e verificou que era possível a utilização de tal equipamento no processo de extração de pó, sendo que na presença de tubo *draft*, a produção para mesmas condições experimentais era incrementada.

Vieira *et al.* (2009) estudaram a influência de fatores como o diâmetro e a densidade das partículas no comportamento fluidodinâmico do leito e observaram que maiores diâmetros ou densidades acarretam em uma maior vazão de jorro mínimo e uma menor altura da fonte.

Ghalavand *et al.* (2010) estudaram a secagem de ervilha em leito de jorro variando-se a carga de material, a temperatura e vazão do ar de entrada e o diâmetro das partículas, concluindo que um aumento na vazão e no diâmetro das partículas diminui a taxa de secagem, ao passo que um aumento na temperatura e na vazão do ar de secagem, tinha um efeito positivo na secagem.

Nagaraju e Bhattacharya (2010) tostaram café em leito de jorro. Robins e Fryer (2003) estudaram a secagem de cevada em leito de jorro como alternativa ao processo artesanal (mais comum).

Com relação às variáveis de processo que influenciam na fluidodinâmica do jorro, vários autores estudaram o efeito da altura, vazão, temperatura, presença de *draft*, presença de inertes.

Cunha (2008), a partir de um planejamento experimental realizado para estudar o efeito da carga de sementes, da vazão do ar e da presença do tubo *draft* na extração mecânica da bixina concluiu que a presença do *draft* foi a variável que teve o maior efeito em todas as respostas estudadas (massa de pó extraído, produtividade e concentração de bixina), causando uma canalização do ar para a região de jorro, aumentando a velocidade do ar e das sementes nesta região. Como essa região é onde ocorre a maior atrição devido a mais elevada velocidade das partículas, um incremento dessa velocidade, devido à presença do *draft*, favoreceu ainda mais a extração mecânica da bixina.

O leito de jorro tem se apresentado como uma boa opção alternativa ao leito fixo, estufa ou bandejas na secagem de frutas e resíduos de frutas. Muitas vezes a secagem se dá com o auxílio de inertes.

Silva (2007) ao realizar experimentos de secagem com resíduos cítricos em leito de jorro notou que o produto se aglomerava mecanicamente formando canais preferenciais no equipamento, o que dificultou a formação do jorro. Para auxiliar na fluidodinâmica do

equipamento e possibilitar o jorro, surgiu a ideia da adição de inertes. Foram testados como inertes esferas de vidro (densidade de 2516 kg/m³ e diâmetro de 3,76 mm), *pellets* de polipropileno (densidade de 905,3 kg/m³ e diâmetro de 2,91 mm) e o ABS (partícula arredondada de densidade de 1022,1 kg/m³ e diâmetro de 3,76 mm), sendo que para os dois últimos materiais, a movimentação do material foi melhorada conseguindo promover a formação do jorro.

Na Tabela 2.3 há um resumo com alguns trabalhos da literatura sobre secagem de frutas em leito de jorro.

Tabela 2.3 Trabalhos da literatura de secagem de frutas em leito de jorro.

Autor	Material	Foco do trabalho	Conclusão
Medeiros <i>et al.</i> (2002)	Frutas tropicais	Influência da composição das frutas na secagem em leito de jorro	O teor de fibras não influenciou na estabilidade do leito, altas concentrações de açúcar causaram problemas na estabilidade do jorro enquanto que pectina e amido ajudaram na estabilidade do mesmo.
Souza (2009)	Frutas tropicais	Influência da composição das frutas na secagem em leito de jorro	O leito de jorro apresentou um bom desempenho na secagem das misturas de frutas com adição da oleína ou gordura de palma em pó, amido e pectina
Silva (2007)	Resíduo de limão	Influência da composição das frutas na secagem em leito de jorro	Não foi possível jorrar o material, sendo necessária a adição de inertes (vidro, polipropileno e ABS), mas não foi possível separação do material seco do resíduo.
Marmo (2007)	Resíduo de azeitona	Analisar o custo energético da secagem	Quando o efeito do aquecimento do ar aumentava, o efeito da vazão de ar diminuía.

No leito de jorro contendo uma mistura binária de partículas de diferentes tamanhos e densidades, pode ocorrer mistura e segregação de partículas. A segregação ocorre

principalmente devido à diferença de velocidade terminal das partículas (ISHIKURA *et al.*, 1983 *apud* SANTOS, 2011).

Santos (2011) apresenta uma boa revisão de trabalhos da literatura que avaliaram o fenômeno da segregação de misturas em leito de jorro. Segundo Grace *et al.* (1983), as partículas maiores e mais densas possuem um tempo de recirculação menor devido a uma trajetória mais curta. Assim, essas partículas quando arrastadas pelo ar na região de jorro, sobem a uma altura menor na fonte e caem numa região mais interna da região anular, mais distante da parede.

Grace *et al.* (1983) também concluíram que a trajetória das partículas na região de fonte é extremamente influenciada pela colisão e aglomeração. Apesar da dispersão devido a colisões aleatórias, existe uma forte correlação entre a posição radial na qual as partículas entram na região de fonte, a altura máxima atingida e a posição radial em que elas caem na superfície da região anular. Além disso, o comportamento das partículas tende a seguir trajetórias mais curtas através das regiões de jorro, fonte e região anular. Durante colisões que ocorrem na região de fonte, ocorre um espalhamento das partículas na região de fonte, que é mais pronunciado para partículas menores e menos densas do que para partículas maiores. Esse pode ser considerado o principal fator que promove a segregação. Já o processo de mistura foi favorecido pela rotação das partículas ao longo da superfície livre e devido aos processos de mistura na região de jorro.

Observou-se também (GRACE *et al.* 1983) que a segregação era menos severa quando se aumentava a velocidade do gás de forma que a fonte seja super desenvolvida a ponto de lançar as partículas à parede na saída do leito. Leitos de jorro operando com pequena altura de leito estático, em que a fonte é bastante diluída, geralmente apresentam menor colisão entre partículas, o que diminui o efeito da segregação. Assim, a segregação induzida pela colisão das partículas na fonte aparece como uma função da relação entre a massa das duas espécies de partículas, fazendo com que duas espécies de massa igual, mas com tamanho e densidades diferentes não apresentem tendência de segregação. A fim de resolver o problema da segregação de partículas em leitos de jorro operando com misturas binárias, foi proposta a instalação de um defletor cônico na região de fonte, que incrementava a distribuição das partículas mais pesadas na região anular.

As características fluidodinâmicas do leito de jorro permitem combinar, em uma mesma unidade, o impacto e a secagem das sementes, garantindo uma boa qualidade do produto final (MASSARANI *et al.*, 1992).

De acordo com Passos e Mujumdar (2000), o leito de jorro pode ser uma alternativa bastante atrativa para a secagem de pastas em pequena escala. Esta técnica, quando aplicada em equipamentos em escala de laboratório, possui amplas vantagens, como baixo custo de montagem, operação e manutenção, demanda de espaço físico pequeno e produto final com baixa umidade (3-10 %) na forma de pó.

As comparações na secagem em leito de jorro e em leito fluidizado mostraram que o leito de jorro trazia vantagens sobre o leito fluidizado em termos de qualidade do produto (MADHIYANON e SOPONRONNARIT, 2005).

No entanto, a grande desvantagem do leito de jorro é sua dificuldade de *scale up*, portanto, se fazem necessários mais estudos sobre o comportamento fluidodinâmico de sistemas em escalas laboratoriais para facilitar seu possível uso em escalas industriais.

2.4 Misturas binárias em leito de jorro

Em alguns processos envolvendo o leito de jorro, inertes são adicionados para facilitar a transferência de calor (HATAMIPOUR e MOWLA, 2003), ou mesmo para facilitar a fluidodinâmica na mistura no leito de jorro (SILVA, 2007). No entanto, devido à diferença no tamanho, forma, velocidade terminal e características da superfície do material, há uma grande diferença no comportamento de cada componente da mistura, podendo então causar o fenômeno da segregação (ISHIKURA *et al.*, 2003).

Santos (2011) realizou um estudo sobre a fluidodinâmica da mistura de polietileno e esferas de vidro em leito de jorro, e verificou que há sim o fenômeno da segregação na mistura e que tal fenômeno era influenciado pela altura de leito estático e composição da mistura.

Sabe-se que o leito de jorro é um equipamento que tem sua fluidodinâmica altamente influenciada pela porosidade do leito estático. Leitos mais empacotados (menor quantidade de vazios) oferecem maior resistência à movimentação das partículas, logo, chegam a maiores picos de queda de pressão na curva característica. No entanto, como a porosidade na região anular é menor, o escoamento do gás concentra-se na região de jorro e assim, a vazão necessária para iniciar o jorro é menor. Desta forma, a porosidade de misturas binárias torna-se uma condição inicial essencial para a modelagem e simulação do leito de jorro.

A estrutura de empacotamento de uma mistura binária não é apenas função da composição das misturas binárias, mas também, das forças de fricção as quais as partículas são submetidas, da razão entre os tamanhos das partículas, de sua forma e do mecanismo de empacotamento das mesmas.

Muitos trabalhos encontrados na literatura apresentam resultados da investigação dos mecanismos que fazem com que haja uma variação da porosidade em leitos empacotados. Sabe-se que a fração de vazios varia de acordo com a diferença entre o tamanho e forma das partículas que compõe a mistura. Se há uma grande variação do volume específico, então a interação interpartículas é grande e, conseqüentemente, a porosidade é reduzida.

Estudos sobre a porosidade de leitos contendo misturas de partículas esféricas podem ser encontrados facilmente na literatura. A variação da porosidade em relação à composição de misturas binárias de esferas de vidro, foi estudada por Dias *et al.* (2004) para diferentes razões entre os diâmetros das partículas (δ) entre 0,1 e 0,0375. Para prever a porosidade de cada fração de partículas na mistura binária, um modelo linear de mistura foi adotado. Os autores mostraram que um ponto relevante nos desvios entre os dados experimentais e os obtidos pelos modelos era o efeito de parede, que era mais pronunciado em misturas cuja composição era rica em partículas maiores. Além disso, em misturas cuja razão entre os diâmetros das partículas (δ) era maior que 0,0035, havia um efeito similar ao de parede na interface entre as partículas menores e maiores.

Um erro que também pode comprometer a predição da porosidade por modelos ocorre quando não é contabilizado o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas maiores pelas menores, dando origem a um leito com baixa porosidade. Desta forma, Dias *et al.*

(2004) empregaram uma função de correção válida para a região em que a porosidade era mínima. Mota *et al.* (2001) assim como, Yu *et al.* (1996), também incorporaram funções de correção ao modelo de empacotamento linear.

Nas operações de engenharia, muitos dos materiais particulados utilizados apresentam baixa esfericidade, influenciando dessa forma, na porosidade da mistura. Porém, na literatura os estudos sobre o empacotamento de leitos compostos por partículas esféricas são muito comuns, enquanto as informações sobre o empacotamento de leitos de partículas não esféricas são limitadas (DIAS *et al.* 2004; YU *et al.*, 1996).

Recentemente, estudos mostraram que a relação entre porosidade e esfericidade depende da forma das partículas e do método de empacotamento do leito (ZOU e YU, 1996). A literatura mostra também que, a porosidade de um leito composto por partículas não esféricas tende a aumentar conforme a diminuição da esfericidade das partículas (ZOU e YU, 1996).

2.5 Modelos de empacotamento de misturas binárias de partículas

Na termodinâmica, o volume de um sistema de soluções é definido em termos do volume específico parcial de cada substância presente. No caso de um sistema composto por partículas sólidas, os mecanismos de empacotamento têm importância significativa no volume total da mistura. Desta forma, surgiram modelos de empacotamento de misturas adequados a partículas esféricas que prevêm o efeito da razão de diâmetro entre as partículas e relacionam também a fração de cada componente na mistura com a porosidade total. A aplicação destes modelos de empacotamento para uma mistura binária de partículas não esféricas é possível devido ao uso do conceito de diâmetro equivalente, definido na Equação (2.1) (YU e STANDISH, 1988). O diâmetro equivalente pode ser definido como o diâmetro da esfera que apresenta mesmo comportamento de empacotamento que a partícula não-esférica, no entanto, o significado deste “mesmo comportamento” ainda precisa ser esclarecido. Assim, costuma-se empregar os modelos de empacotamento até então desenvolvidos para partículas esféricas, no cálculo da porosidade de leitos de partículas não esféricas.

$$d_{eq} = \left(d_p / \phi_i^{2,785} \exp[2,946(1 - \phi_i)] \right) \quad (2.1)$$

Sabe-se que as interações partícula-partícula são dependentes da relação entre os diâmetros das mesmas. A literatura apresenta de forma clara que, para partículas de tamanho uniforme, leitos compostos por partículas não esféricas tendem a apresentar maior porosidade, à medida que a esfericidade das partículas diminui (ZOU e YU, 1996), como exemplifica a Figura 2.5 (a), na qual se observa dois leitos formados por partículas de esfericidade diferente. Como o leito composto pelas partículas menos esféricas apresenta maior porosidade, ele forma uma matriz de partículas com grande quantidade de espaços vazios (preenchidos com ar). Assim, adicionando as partículas da outra fase, representadas pela cor preta na Figura 2.5 (b), esses vazios são preenchidos sem que esse esqueleto se desfça, o que indica uma redução da porosidade, na medida em que se aumenta a quantidade das partículas mais esféricas, caracterizando assim uma região em que predomina o mecanismo de preenchimento.

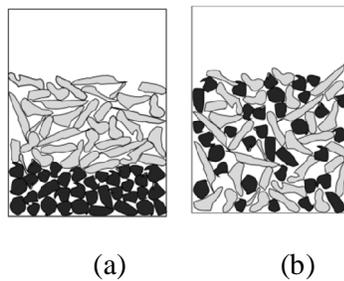


Figura 2.5 Mistura de partículas não esféricas: (a) influência da esfericidade no empacotamento dos leitos de monopartículas; (b) mistura de partículas com esfericidade distinta, em que predomina o mecanismo de preenchimento.

No presente trabalho foram utilizados os modelos A, B, C, D e E, definidos na Tabela 2.4, considerando: a fração mássica da maior partícula na mistura (x_D), a porosidade do leito composto apenas por partículas maiores (ε_D^0) e a porosidade do leito contendo apenas partículas menores (ε_d^0).

Tabela 2.4 Modelos para cálculo da porosidade de mistura de partícula

Modelos de Porosidade	
A– Modelo da mistura ideal (Yu e Standish, 1988)	$V = \sum_{i=1}^n X_i \bar{V}_i; \quad \varepsilon = 1 - \frac{1}{V}$
B– Yu <i>et al.</i> (1996)	$\varepsilon = \{1 - (1 - \varepsilon_D^{(0)}) X_D^{[1,35 - X_D F(\delta)]}\} * [\varepsilon_d^{(0)} + (1 - \varepsilon_d^{(0)}) X_D^{[f(\delta)]}]$ Funções de interação entre partículas: $F(\delta) = \left\{ 0,27 - \frac{1,55}{1 + \frac{\exp\left(\frac{\delta + 0,06}{0,27}\right)}{1}} \right\}^{-1}; \quad f(\delta) = 5 - 4\sqrt{\delta}$
C– Modelo empregado por Dias <i>et al.</i> (2004)	$X_{D,\min} = \frac{1 - \varepsilon_D^{(0)}}{1 - \varepsilon_d^{(0)} \varepsilon_D^{(0)}}$ $\varepsilon = \frac{\varepsilon_d^{(0)} (1 - X_D) \exp(1,2264 X_D^{1/\sqrt{\delta}})}{1 - \varepsilon_d^{(0)} X_D}, X_D \leq X_{D,\min}$ $\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_D^{(0)}}{X_D}, X_D > X_{D,\min}$
D– Yu <i>et al.</i> (1993) <i>apud</i> Finkers e Hoffmann (1998)	$V_d = \frac{1}{1 - \varepsilon_d^0} \quad V_D = \frac{1}{1 - \varepsilon_D^0}$ $\left(\frac{V - V_D X_D}{V_d} \right)^2 + 2G_{(\delta)} \left(\frac{V - V_D X_D}{V_d} \right) \left(\frac{V - X_D - V_d X_d}{V_D - 1} \right) + \left(\frac{V - X_D - V_d X_d}{V_D - 1} \right)^2 = 1$ $\frac{1}{G_{(\delta)}} = \begin{cases} 1,355\delta^{1,566} & (\delta \leq 0,824) \\ 1 & (\delta \geq 0,824) \end{cases}$
E – Yu e Standish (1987)	$V = [V_d - (V_d - 1)g(\delta)]X_d + X_D V_D + V_D(1 - f(\delta))X_D$ $f(\delta) = (1 - \delta)^{3,33} + 2,81\delta(1 - \delta)^{2,77}$ $g(\delta) = (1 - \delta)^{1,97} + 0,36\delta(1 - \delta)^{3,67}$

Para o modelo linear de empacotamento, Yu *et al.* (1996) propuseram uma modificação que prediz a densidade de empacotamento de uma mistura composta por partículas não esféricas. O modelo citado foi estruturado baseado na similaridade entre o empacotamento de partículas esféricas e não esféricas, observando o conceito de diâmetro equivalente de empacotamento.

De modo geral, o volume do sistema é dado em função do volume específico de cada uma das fases (V_i) e a fração volumétrica do componente da mistura (X_i). Conforme o modelo de empacotamento linear modificado, que examina a razão entre os diâmetros das duas fases

granulométricas, o volume do sistema (V) pode ser obtido através das equações mostradas pelos modelos que constam na Tabela 2.4.

2.6 Modelos de Cinética de Secagem

Os modelos usados para representar a cinética de secagem podem ser classificados em três classes: empíricos, semi-empíricos e teóricos.

Os modelos empíricos trazem como vantagem sobre os modelos teóricos um bom ajuste dos dados para uma modelagem matemática pouco complexa e uma completa flexibilidade da abordagem, mas apresentam como desvantagem o fato de não apresentar credibilidade fora da faixa medida, não se basear em princípios físicos fundamentais e ser utilizados apenas em problemas bem particulares (MOREIRA, 2000).

Os modelos semi-empíricos apresentam como vantagem sobre os modelos empíricos o fato de serem mais fundamentados em teoria, a dependência que a secagem apresenta pela temperatura, pressão e umidade relativa pode ser incorporadas nas condições de contorno e possuem solução analítica em alguns casos. Mas apresentam como desvantagem o fato de serem ruins para dados de materiais mais espessos e de apresentarem muitas considerações teóricas que podem ser questionáveis (MOREIRA, 2000).

Os modelos teóricos apresentam como vantagem o fato de serem mais próximos dos princípios teóricos, que os modelos empíricos ou semi-empíricos, de terem mais credibilidade para extrapolação e de terem melhor reconhecimento das inter-relações entre as variáveis, mas apresentam como desvantagem uma matemática muito complexa, parâmetros desconhecidos e um maior tempo de desenvolvimento, necessitando de computadores velozes e programas sofisticados (MOREIRA, 2000). Na Tabela 2.5, pode-se observar alguns modelos de cinética de secagem apresentados por Barrozo (1995).

Muitas outras equações de secagem de natureza essencialmente empírica são apresentadas na literatura. A utilização das equações empíricas frequentemente fornece bons resultados na previsão do comportamento da secagem de grãos.

Nota-se que a maioria dos modelos apresentados para determinação da cinética de secagem de um material apresenta uma não linearidade em algum de seus parâmetros, por exemplo, a influência da temperatura sobre a taxa de evaporação é descrita pela Equação de Arrhenius.

Tabela 2.5 Modelos de cinética de secagem (BARROZO, 1995).

Equação	Referência
$MR = \exp(-Kt)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	LEWIS
$MR = C \exp(-Kt)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	BROOKER <i>et al.</i>
$MR = C \left(\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	HENDERSON e HENDERSON
$MR = \exp(-Kt^n)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	PAGE
$MR = \exp(-(Kt)^n)$ onde: $K = \exp\left(A + \frac{B}{T_f}\right)$	OVERHULTS <i>et al.</i>

Menezes *et al* (2009) utilizaram o modelo de Page e o modelo de Mota Lima para a simulação da secagem do bagaço do maracujá amarelo, sendo que este último apresentou um coeficiente de correlação levemente superior. Perazzini (2011) verificou dentre vários modelos que o de Overhults foi o que mais se aproximou dos dados obtidos experimentalmente na secagem de resíduos cítricos.

2.7 Cinética da Degradação da Vitamina C

Sabe-se que o teor dos compostos bioativos, como a vitamina C, varia ao longo da secagem. A seguir encontra-se uma breve revisão bibliográfica de trabalhos que analisaram o teor de vitamina C antes e após a secagem.

Goula e Adamopoulos (2006) estudaram a cinética de degradação do ácido ascórbico em tomates partidos ao meio durante a secagem a ar quente. De acordo com os autores, era necessário introduzir um coeficiente de correção no modelo proposto devido a uma maior degradação nas metades de tomate.

Khraisheh *et al* (2004) reportaram uma taxa inicial baixa de ácido ascórbico seguida por uma degradação mais rápida conforme a umidade diminuiu. O aumento da degradação do

ácido ascórbico a baixas umidades foi atribuído à concentração de ácido ascórbico, a qual se torna maior conforme o decorrer do processo, resultando em um aumento da taxa da reação.

Outro fator que afeta a cinética de retenção e da degradação do ácido ascórbico durante a secagem é a temperatura. Alguns estudos examinaram a relação entre a temperatura e a reação de degradação usando a Equação de Arrhenius (MCMINN e MAGGI, 1997 e ORIKASA *et al.*, 2008). Maiores valores da taxa de reação foram observadas quando a temperatura de secagem foi aumentada. Em experimentos com kiwi, a taxa da reação observada por Orikasa *et al.* (2008) à 70°C foi mais de três vezes superior que a taxa observada à 40°C.

A retenção de vitamina C nos tomates secos ou nas polpas de tomate secas foi reportada por vários autores (GOULA e ADAMOPOULOS, 2006 e MARFIL *et al.*, 2008, KERKHOFS *et al.*, 2005, GIOVANELLI e PARADISO, 2002, ZANONI *et al.*, 1999, LAVELLI *et al.*, 1999). Nesses estudos a temperatura do ar variou de 42 a 110°C. O tempo de secagem, umidade final, cultura do tomate e velocidade do ar foram variados. No geral, a retenção de vitamina C foi baixa e em algumas condições, não foi possível detectar a vitamina.

A influência da temperatura na degradação da vitamina C pode ser observada pelos resultados obtidos por Zanoni *et al.* (1999). À 80°C, quando a umidade era de aproximadamente 46%, a perda de vitamina C foi de aproximadamente 62%, enquanto a uma umidade de 47,6% à 110°C, a perda foi de 100%. Quanto maior o tempo de secagem, menor a retenção de nutrientes.

Estudando a secagem de pimentão, Sigge *et al.* (1999) desidrataram pimentões verdes a diferentes temperaturas e umidades relativas. Um dos objetivos foi a verificação da influência da umidade relativa na retenção de vitamina C. O aumento da umidade relativa resultou numa menor retenção do ácido ascórbico.

Estudando a secagem de páprica Kim *et al.* (2006) observaram que com maior superfície de contato, a secagem foi mais rápida, a temperatura utilizada foi menor e a retenção de vitamina C foi maior.

2.7.1 Modelos de Degradação da Vitamina C

Durante a secagem do resíduo de acerola, seus compostos bioativos podem ser degradados. A cinética de degradação pode ser significativamente afetada por vários fatores tais como pH, temperatura, luz, enzimas, oxigênio e catalisadores metálicos.

Dependendo das condições ambientais, dois tipos de degradação podem ocorrer: aeróbica e anaeróbica.

O mecanismo da degradação anaeróbica é complexo e não foi completamente estabelecido. Este tipo de degradação é relativamente insignificante na maioria dos produtos alimentícios. Por outro lado, o ácido ascórbico é oxidado ao ácido dehidroascórbico em condições aeróbicas, seguido de hidrólise e posterior oxidação (GREGORY, 1996 *apud* SANTOS e SILVA, 2008). Este mecanismo de reação pode ser simplificado por:



Em que

L-Ácido Ascórbico (AA): $C_6H_8O_6$

L-Ácido Dehidroascórbico (DHAA): $C_6H_6O_6$

Modelo de Primeira Ordem

Foi sugerido por Joselyn e Miller (1949) que a degradação do ácido ascórbico pode ser descrita por uma cinética de primeira ordem segundo a Equação 2.2:

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (2.2)$$

No qual C é a concentração de ácido ascórbico; t é o tempo; e K a constante da taxa.

Santos e Silva (2008) apresentam os seguintes trabalhos nos quais a perda de ácido ascórbico foi reportada como sendo um modelo de primeira ordem durante a secagem da batata (MCMINN e MAGEE, 1997, KHRAISHEH *et al.*, 2004), abacaxi (RAMALLO e MASCHERONI, 2004), rosa mosqueta (ERENTURK *et al.*, 2005, PIRONE *et al.*, 2007), goiaba (SANJINEZ-ARGANDONA *et al.*, 2005), tomate (GOULA e ADAMOPOULOS, 2006) e kiwi (ORIKASA *et al.*, 2008).

Modelo Thermal Death Time (TDT)

O Modelo *Thermal Death Time* é descrito pela Equação 2.3 segundo Frias e Oliveira (2001).

$$\log\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\int_0^t \frac{10^{\frac{T(t)-T_r}{z(w)}}}{D_r(w)} dt \quad (2.3)$$

Em que C é a quantidade de ácido ascórbico no tempo t, C₀ é o conteúdo inicial de ácido ascórbico, T é a temperatura, $D_r(w) = \sum_{i=0}^n D_{ri} w^i$ e $z(w) = \sum_{j=0}^{n'} z_j w^j$ são funções polinomiais do conteúdo de água e w é a quantidade de água.

Modelo Williams-Landel-Ferry (WLF)

O Modelo Williams-Landel-Ferry apresentado por Nicoletti *et al* (2007) é descrito pela Equação 2.4

$$\log\left(\frac{C}{C_0}\right) = -\int_0^t \frac{10^{\frac{C_1 C_2 (T-T_r)}{[C_2+(T_g-T_r)][C_2+(T-T_g)]}}}{D_r} dt \quad (2.4)$$

Em que C é a quantidade de ácido ascórbico no tempo t , C_0 é a quantidade inicial de ácido ascórbico, T_g é a temperatura de transição vítrea (temperatura a qual o comportamento passa de sólido para um comportamento de líquido), T é a temperatura, T_r é a temperatura de referência e D_r , C_1 e C_2 são parâmetros do modelo WLF.

Modelo Weibull

O modelo de *Weibull* apresentado por Marfil *et al* (2008) é descrito pela Equação 2.5

$$\frac{C}{C_0} = \exp[-(Kt)^\beta] \quad (2.5)$$

Em que C é a quantidade de ácido ascórbico no instante t , C_0 é a quantidade inicial de ácido ascórbico, K é a taxa constante e β é a constante de forma.

Um ponto discutido por Lin e Agalloco (1979) foi a influência da luz na reação de degradação. Quando a intensidade de luz foi aumentada, a degradação do ácido ascórbico aumentou. Isto pode ser atribuído ao fato de que a luz pode ser uma fonte de energia que promove a degradação. De acordo com os autores, o mecanismo que controla a reação de degradação é complexo. O mecanismo pode mudar de acordo com a atividade de água. Em atividades de água maiores, a água pode diluir a concentração de ácido ascórbico, induzindo a uma menor taxa de degradação. Então, aumentando a atividade de água, a taxa da reação é reduzida. No entanto, aumentando a quantidade de água, a fase aquosa torna-se menos viscosa, aumentando o meio de difusão. Esses efeitos facilitam a reação de oxidação e conseqüentemente, a degradação.

Tais modelos podem ser utilizados para representar a variação dos teores de vitamina C e outros compostos bioativos ao longo da secagem e permitem um melhor entendimento da cinética reacional.

2.8 Relevância do Tema

O Brasil é um dos maiores produtores de fruta do mundo, e dentre essas frutas, destaca-se a produção da acerola (SEBRAE, 2009). Durante o processamento da fruta, há uma grande geração de resíduos, os quais são descartados, apesar de ricos em alguns compostos bioativos

Para se reaproveitar esses resíduos, seria interessante a secagem dos mesmos para reduzir a atividade de água, e conseqüentemente, a degradação do material. A secagem no leito de jorro é interessante, devido ao grande contato fluido-partícula, que garante altos coeficientes de troca de calor e de massa entre as fases, porém ao longo da secagem, os nutrientes são degradados devido à exposição à luz, oxigênio e temperatura.

O resíduo de acerola pode não apresentar estabilidade fluidodinâmica, necessitando assim de um material de apoio para auxiliar a secagem. A soja é uma alternativa inovadora para ser utilizada como material de apoio (visto que nos trabalhos da literatura esferas de vidro ou polipropileno são comumente utilizadas), pois não contamina fisicamente o material, mantendo o caráter alimentício do mesmo. Quando há uma mistura binária de partículas, pode ocorrer segregação das partículas no interior do leito de jorro, devido à diferença em seus tamanhos e densidades.

Portanto, um estudo avaliando a fluidodinâmica da mistura de resíduo de acerola e soja em leito de jorro, bem como os teores dos compostos bioativos como os fenólicos totais, flavonóides, ácido ascórbico e acidez antes e após a secagem para verificar a qualidade desse resíduo seco faz-se necessário.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Amostra e caracterização

Amostra

O resíduo do processamento da acerola foi fornecido pela indústria Nettare Indústria Comércio Importação e Exportação de Alimentos Ltda – Uberlândia (MG). Tal resíduo consiste em sementes com um pequeno excesso de polpa aderidas (Figura 3.1). Foi fornecida também a borra, uma polpa mais espessa que não passou pela peneira existente na fábrica no processamento da fruta, a qual também é descartada.



Figura 3.1 Resíduo de acerola.

A polpa de acerola congelada e a soja (do tipo BRS Valiosa RR) utilizada nos experimentos foram adquiridas em comércio local na região do Triângulo Mineiro e a acerola *in natura* foi obtida em uma fazenda também na cidade de Uberlândia (MG).

Umidade

O teor de umidade do produto foi determinado através do método da estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 horas.

Determinação de sólidos solúveis

Os sólidos solúveis foram determinados utilizando-se o refratômetro HI 96801 da Hanna instruments e os resultados foram expressos em $^{\circ}\text{Brix}$

Análises de compostos bioativos

Para a realização das análises dos compostos bioativos, o material que estava congelado foi descongelado em temperatura ambiente envolto em papel alumínio para que a presença da luz não degradasse os compostos fenólicos, flavonoides, o ácido ascórbico e o ácido cítrico. Para o mesmo fim, as análises foram realizadas com a luz apagada.

Para a realização dos ensaios analíticos, a acerola foi separada da semente, processada no liquidificador e congelada em pequenas porções, a polpa de acerola vendida comercialmente já foi adquirida congelada, a borra e a semente de acerola foram separadas em pequenas porções e congeladas. As amostras eram descongeladas em temperatura ambiente e diluídas em meio aquoso ou metanoico, de acordo com o ensaio analítico em questão. No caso do resíduo de acerola, por ser sólido, este foi triturado no liquidificador antes da realização dos ensaios analíticos.

Teor de acidez titulável total (ATT)

O teor de acidez titulável total (expressa em % de ácido cítrico) das amostras foi realizado de acordo com os métodos da Association of Official Analytical Chemists (1995). Os resultados foram expressos em mg de ácido cítrico/100 g amostra em base seca.

Teor de ácido ascórbico

O conteúdo de ácido ascórbico foi determinado por titulometria, método que se baseia na redução do 2,6-diclorofenol-indofenol pelo ácido ascórbico, e os resultados expressos em mg de ácido ascórbico/100g de amostra em base seca (AOAC, 1995).

Determinação de compostos fenólicos

O teor de fenólicos totais foi determinado pelo método de Folin–Ciocalteu, usando ácido gálico como padrão. A leitura da absorbância foi realizada a 760 nm. A curva analítica foi construída utilizando o ácido gálico como padrão. Os resultados estão expressos em mg de ácido gálico por 100 g de amostra em base seca.

Determinação do teor de flavonoides totais

A extração dos flavonoides foi efetuada com metanol de acordo com Yu e Dahegren (2000). O conteúdo de flavonoides totais foi determinado pelo método colorimétrico segundo Zhishen *et al.* (1999), com leitura de absorbância a 510 nm.

Este método utiliza o AlCl_3 como agente de deslocamento para diminuir a interferência de outros compostos na leitura da absorvância da solução. A rutina foi utilizada como padrão para a obtenção da curva de calibração. Os resultados foram expressos em mg equivalente de rutina/100 g de amostra em base seca.

Densidade real

A densidade real foi obtida utilizando-se picnômetro a gás Hélio.

Densidade aparente

A densidade aparente foi obtida por picnometria utilizando-se o hexano como fluido.

Determinação do diâmetro da partícula

Para a obtenção do diâmetro médio de Sauter, a amostra foi peneirada utilizando o seguinte conjunto de peneiras: 3/8" (9,52 mm), 1/4" (6,35 mm) e 6 # (3,36 mm).

Esfericidade

A esfericidade do resíduo de acerola foi calculada utilizando o equipamento HAVER-CPA 3-2 (analisador foto-óptico de partículas) e a esfericidade da soja foi considerada como sendo 0,9 (BARROZO, 1995).

Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado utilizando-se o método no qual o material é submetido a incineração na mufla, à 500°C por 3 horas.

Porosidade

As partículas foram pesadas e acrescidas aleatoriamente a um recipiente cônico, similar à parte cônica do leito de jorro empregado neste estudo, até que fosse atingida a altura de leito estático de 8 cm. As medidas de porosidade das misturas foram realizadas em triplicata, calculadas pela Equação (3.1).

$$\varepsilon = 1 - \frac{V}{V_L} \quad (3.1)$$

Ângulo de repouso

A determinação do ângulo de repouso pode auxiliar no entendimento da diferença no comportamento fluidodinâmico das partículas no leito de jorro

O ângulo de repouso pode ser definido como o ângulo máximo do talude formado pelo material com relação a horizontal e de acordo com Silva e Correa (2000), é influenciado pela umidade, tamanho, forma e constituição externa do material.

O ângulo de repouso estático foi determinado colocando-se o material em um cilindro com umas das extremidades aberta, apoiando-o em uma superfície lisa, e levantando-o a uma velocidade constante, deixando as partículas caírem. Foi analisado o ângulo o qual essas partículas estão repousadas conforma ilustrado na Figura 3.2.

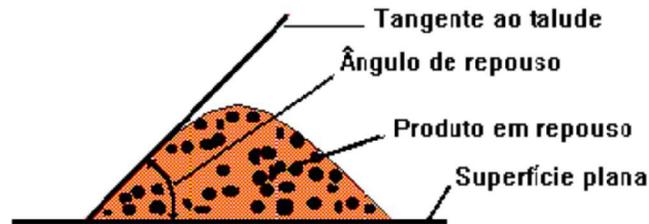


Figura 3.2 Ângulo de repouso estático.

O ângulo de repouso dinâmico foi determinado de acordo com o método do tambor rotativo (POZITANO e ROCHA, 2011). Tal metodologia consiste em girar manualmente o cilindro por 5 vezes sobre uma superfície lisa e analisar o ângulo no qual as partículas repousam ao final das 5 voltas. Na Figura 3.3 pode-se observar o cilindro vazio (A), o cilindro com o material em sua posição inicial (B) e o cilindro após a rotação (C).

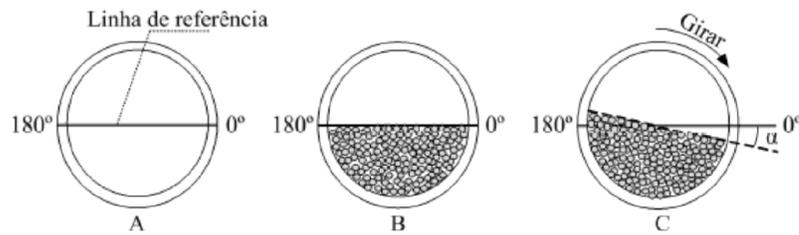


Figura 3.3 Esquema do ângulo de repouso dinâmico.

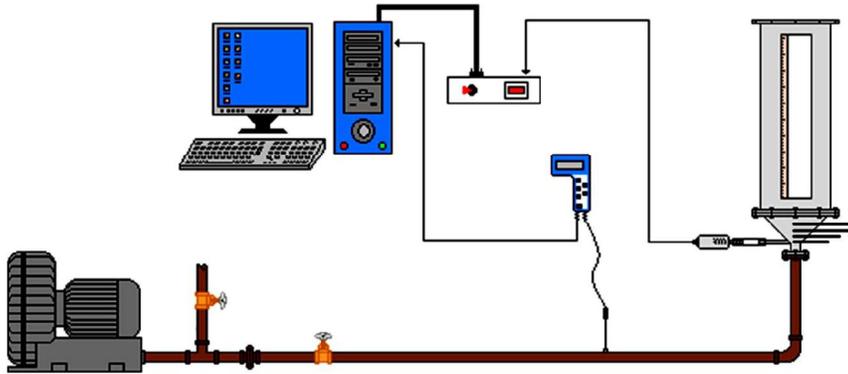
3.2 Unidade Experimental

Os experimentos foram realizados em um leito de jorro adaptado para o estudo de segregação de partículas. A Figura 3.4 (a) apresenta um esquema da unidade de leito de jorro instalada no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, composta por:

- Um compressor centrífugo de 7,5 cv;
- duas válvulas tipo gaveta;
- tubulação de aço galvanizado;
- leito de jorro construído em aço inoxidável, com visor que permite observar o andamento dos experimentos, adaptado com um sistema de guilhotinas, o qual permitiu realizar amostragens da mistura em diferentes posições axiais no leito (2 em 2 cm até a altura de 10 cm da base do leito);
- Um termoanemômetro para a coleta dos dados de velocidade do ar na linha e calibração da placa de orifício;
- Sistema de aquisição de dados composto por: um transdutor de pressão instalado na base cônica do leito, logo acima da entrada de ar; um bloco conector para a conexão entre os sinais emitidos pelo transdutor de pressão e a placa de aquisição de dados A/D (analógico-digital); placa de aquisição de dados que converte os sinais do transdutor de pressão para a forma digital; microcomputador, no qual os sinais digitais serão processados e analisados,

com o auxílio do *software* LabVIEW™, versão 7.1, escolhido para ajustar a frequência de coleta do sinal de pressão no leito.

- Medidor de vazão do tipo placa de orifício, previamente calibrado.



(a)



(b)

Figura 3.4 Esquema da unidade experimental (a) equipamentos e instrumentação da unidade de leito de jorro; (b) leito de jorro com a inserção de guilhotinas na região cônica.

Os dados referentes à geometria do leito e as alturas de leito estático que foram estudadas neste trabalho são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Propriedades do leito de jorro.

H_0 [m]	Altura do leito estático	0,06; 0,08; 0,09
D_c [m]	Diâmetro da coluna	0,210
D_i [m]	Diâmetro de entrada	0,035
γ	Ângulo do cone	60°
H [m]	Altura do leito	0,85

3.3 Curvas Características

Testes iniciais de fluidodinâmica de resíduo de acerola em leito de jorro contendo apenas o resíduo (semente de acerola), não apresentaram estabilidade fluidodinâmica, principalmente devido à baixa densidade do material e a baixa elasticidade no choque entre as partículas, dificultando o escoamento do resíduo no leito. Para auxiliar na fluidodinâmica do equipamento e auxiliar o jorro, optou-se por empregar grãos de soja como material de apoio, pois a soja possui uma boa movimentação no leito e devido ao caráter alimentício do produto, não ocorre a contaminação do material.

As curvas características, relacionando a queda de pressão e vazão de ar, foram obtidas experimentalmente. A vazão de ar foi gradativamente aumentada, até que o jorro completo da mistura fosse estabelecido, e então gradativamente reduzida.

Os testes iniciais mostraram que este tipo de mistura de partículas com densidades tão distintas apresenta características fluidodinâmicas diferenciadas. Assim, optou-se por analisar os efeitos das duas variáveis, x_D (fração mássica de resíduo de acerola na mistura) e H_0 (altura de leito estático), sobre a mínima vazão de ar em que os dois tipos de material encontram-se jorrando, e sua respectiva queda de pressão. Esse ponto foi denominado de jorro mínimo conjunto.

3.4 Secagem

A secagem das amostras foi realizada em um secador leito de jorro, na vazão do ar de secagem de $1,2 \cdot Q_{jm}$ a temperatura ambiente e $1,5 \cdot Q_{jm}$ a 70°C .

3.5 Segregação

Foram realizadas medidas do nível de segregação das partículas durante o regime de jorro. A vazão foi ajustada para um valor constante, 20% superior a vazão de ar no jorro mínimo correspondente ao da mistura em questão.

Em seguida, o soprador foi desligado instantaneamente e as guilhotinas foram inseridas, separando a mistura em diferentes amostras correspondentes às diferentes alturas médias de leito: 0,01; 0,03; 0,05 e 0,07 m.

Após a coleta das amostras, a mistura de partículas contida em cada compartimento foi separada por catação. Desta forma, quantificou-se a massa de cada componente na mistura, e assim, foi obtida a composição da mistura em cada posição axial.

O nível de segregação pode ser expresso pela definição do índice de mistura I_M , que relaciona a fração mássica final de resíduo de acerola em determinado compartimento com a fração mássica inicial de resíduo de acerola na mistura. Esta fração mássica foi calculada com base na massa final de resíduo de acerola no leito, visto que a mesma varia conforme a secagem do material, o que dificulta a comparação com a fração mássica inicial.

$$I_M = \frac{\left(\frac{M_{Di}}{M_{ti}} \right)}{\left(\frac{M_{Df}}{M_{tf}} \right)} = \frac{x_{Di}}{x_{Dt}} \quad (3.2)$$

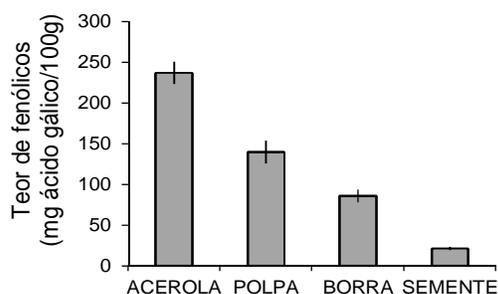
Sendo que M_{Di} é a massa de resíduo de acerola no compartimento i , M_{ti} a massa total do compartimento i , M_{Df} a massa final de resíduo, M_{tf} a massa total, x_{Di} , a fração mássica no compartimento i e x_{Di} , a fração mássica inicial no leito.

Assim, se $I_M > 1$, significa que há concentração de resíduo de acerola no compartimento em questão, se $I_M < 1$, há concentração de soja no compartimento em questão e se $I_M = 1$, a mistura continua na mesma concentração de resíduo de acerola que no início do experimento no leito.

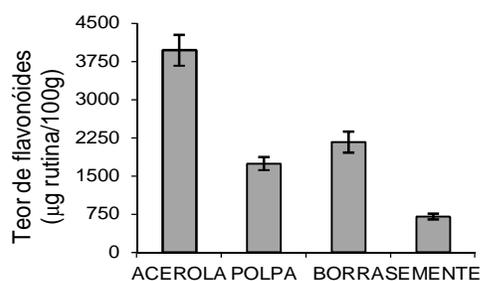
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise dos compostos bioativos

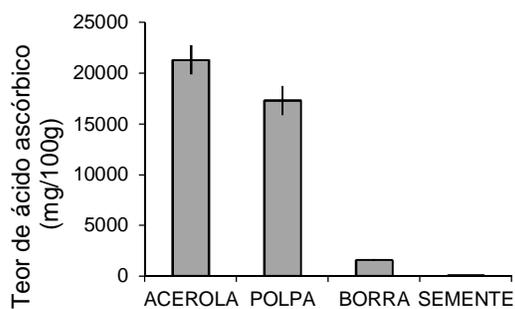
Foram analisados os teores de fenólicos totais, flavonoides, ácido ascórbico e ácido cítrico presentes na acerola *in natura*, na polpa de acerola vendida comercialmente, na borra e no resíduo do processamento agroindustrial da acerola. Os resultados estão apresentados na Figura 4.1.



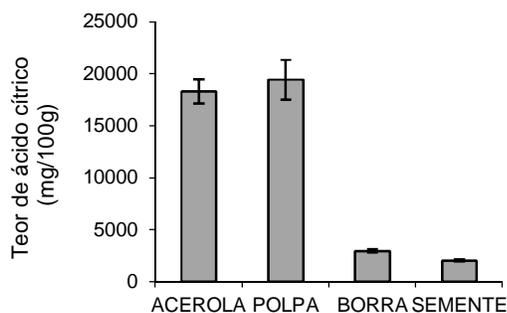
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.1 Teores dos compostos bioativos presentes na acerola *in natura*, na polpa vendida comercialmente e nos resíduos agroindustriais de acerola (borra e semente).

a) fenólicos b) flavonoides c) vitamina C d) acidez

Os resultados de compostos fenólicos totais (Figura 4.1 a) mostram que a acerola *in natura* apresenta teores superiores aos encontrados na polpa congelada vendida comercialmente, que por sua vez apresenta teores maiores que os encontrados no resíduo do processamento do suco da acerola (borra e semente). Todos os teores obtidos são estatisticamente diferentes entre si ($p < 0,05$). Os teores presentes na borra são equivalentes a 61,4% dos teores encontrados na polpa vendida comercialmente, sendo que esse material é descartado, sem aproveitamento nenhum de seus compostos.

Analisando os teores de flavonoides (Figura 4.1 b), observa-se que a acerola *in natura* apresenta teores superiores aos encontrados na polpa e nos resíduos do processamento da acerola. Vale ressaltar que os teores presentes na borra são maiores que os teores presentes na polpa (vendida comercialmente). Observa-se também que os teores presentes na semente, são equivalentes a 40% dos teores presentes na polpa vendida comercialmente. Todos os teores obtidos são estatisticamente diferentes entre si ($p < 0,05$).

Em termos de vitamina C (Figura 4.1 c), observa-se que os teores presentes na acerola *in natura* são superiores aos presentes na polpa vendida comercialmente, e aos dos resíduos agroindustriais de acerola. Todos os teores obtidos são estatisticamente diferentes entre si ($p < 0,05$).

Os teores de acidez (Figura 4.1 d) presentes na acerola *in natura* e na polpa vendida comercialmente são estatisticamente iguais. Os teores presentes na borra são superiores aos encontrados na semente e apesar de serem inferiores aos obtidos na polpa e na fruta, pode ser relevante o seu aproveitamento.

Foram analisados também os teores de fenólicos totais, flavonoides, ácido cítrico e ácido ascórbico para o camu camu, comparando os teores presentes na polpa e na casca da fruta. Os resultados obtidos são apresentados no Apêndice 1.

Foram realizadas também análises pelo Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL) para obter-se a composição centesimal do resíduo de acerola, as quais estão apresentadas no Apêndice 2. Dentre os dados apresentados, vale destacar um teor elevado de carotenoides neste resíduo, o que intensifica o interesse em se estudar o reaproveitamento do mesmo.

4.2 Caracterização das partículas

A Tabela 4.1 apresenta as propriedades físicas do resíduo de acerola e da soja, medidas experimentalmente. Os valores encontrados para a soja são coerentes com os valores encontrados na literatura. Dados referentes à caracterização da semente de acerola são escassos na literatura, no entanto a densidade real encontrada é semelhante aquela encontrada por Alves *et al* (2010) que foi de 1354,7 kg/m³. A baixa esfericidade da semente de acerola também era esperada devido ao seu formato elipsoidal.

A densidade real do resíduo de acerola encontrado por picnometria a gás Hélio é superior ao da soja, ao passo que a densidade aparente do resíduo é inferior. Essa diferença se deve a metodologia utilizada para determinação da densidade real, na qual o material é seco e triturado, perdendo então sua porosidade intrínseca da partícula. Então a porosidade da semente de acerola é contabilizada na densidade aparente e não na densidade real.

Tabela 4.1 Propriedades do resíduo de acerola e da soja.

	d_p [mm]	ρ_{ap} [kg/m ³]	ρ_{real} [kg/m ³]	ϕ	d_{eq} [mm]
Soja	6,30±0,40	1188,20±6,18	1232,95±0,60	0,90	6,29
Resíduo de acerola	7,05 ±0,07	677,47 ±0,45	1344,85±13,86	0,68	8,04

O resíduo de acerola também foi analisado pela HAVER&BOECKER, utilizando o foto analisador de imagem HAVER CPA-2-1. Não foi possível realizar a análise para o material úmido, pois o mesmo não escoava no equipamento. Foi feita a análise para o material após 1 e 2 horas de estufa. Os resultados obtidos seguem nas Tabelas 4.2 e 4.3. Sendo que d_5 , d_{50} e d_{95} são os diâmetros de peneira de 5, 50 e 95% das partículas respectivamente. Demais resultados são apresentados no Apêndice 3.

Foi determinado o teor de cinzas do resíduo agroindustrial de acerola. O valor obtido para o resíduo foi de 2,17±0,06% e para a borra foi de 5,17±0,01%.

O teor de sólido solúveis presentes na borra foi de 8,9± 0,1 ° Brix e na acerola *in natura* de 7,83 ± 0,058 ° Brix

Tabela 4.2 Característica do resíduo de acerola após 1 hora de estufa.

	Média	Desvio padrão
d5 [mm]	5,58	0,04
d50 [mm]	8,43	0,05
d95 [mm]	12,43	1,11
Esfericidade	0,68	0,01

Tabela 4.3 Características do resíduo de acerola após 2 horas de estufa

	Média	Desvio padrão
d5 [mm]	6,37	0,18
d50 [mm]	8,74	0,03
d95 [mm]	12,60	0,90
Esfericidade	0,69	0,00

4.3 Porosidade da mistura de soja e acerola

A Tabela 4.4 apresenta os valores médios das frações mássicas e volumétricas e a porosidade da mistura de resíduo agroindustrial de acerola e soja, bem como a porosidade média da mistura obtida experimentalmente para a altura de leito estático de 8 cm, sendo que x_D é a fração mássica da partícula de maior tamanho (resíduo de acerola), m_D a massa de resíduo de acerola, m_d , a massa de soja utilizada na mistura, V_D e V_d os volumes utilizados de resíduo de acerola e soja respectivamente, V_{D+d} o volume total ocupado pelas partículas, X_D e X_d a fração volumétrica de resíduo de acerola e de soja respectivamente e ϵ , a porosidade da mistura no leito.

Leitos compostos apenas por soja apresentam porosidade de cerca de 0,4, enquanto leitos compostos apenas por resíduo de acerola têm porosidade de 0,5. Observa-se que as maiores taxas de variação da porosidade ocorrem quando o leito é rico em soja. Assim, a adição de resíduo de acerola a uma matriz composta por soja faz com que a porosidade do leito diminua, caracterizando uma região influenciada pelo mecanismo de preenchimento. Comportamento semelhante foi observado por Santos (2011) estudando a mistura de areia e bagaço de cana de açúcar, na qual adição de areia a uma matriz composta por partículas de biomassa fez com que a porosidade do leito diminuísse.

Tabela 4.4 Dados da composição das misturas de soja e resíduo de acerola estudados.

x_D	m_D (g)	m_d (g)	$V_D(\text{cm}^3)$	$V_d(\text{cm}^3)$	$V_{D+d}(\text{cm}^3)$	X_D	X_d	ε
0,00	0,00	327,29	0,00	275,03	275,03	0,00	1,00	0,40
0,15	40,37	228,38	59,63	191,91	251,54	0,27	0,76	0,45
0,25	61,81	185,11	91,30	155,56	246,86	0,37	0,63	0,46
0,35	79,62	147,73	117,61	124,15	241,76	0,49	0,51	0,47
0,5	103,03	101,39	152,19	85,20	237,40	0,64	0,36	0,48
0,75	133,12	44,40	196,63	37,31	233,94	0,84	0,16	0,49
1,00	153,44	0,00	226,65	0,00	226,65	1,00	0,00	0,50

Zhou e Yu (2003) apresentam a porosidade obtida experimentalmente de diferentes misturas binárias a diferentes composições, verificando que o comportamento da curva varia de acordo com a relação entre o comprimento e a largura (λ) da partícula. Quanto maior o valor de λ , maior a diferença entre a porosidade do leito composto apenas por partículas maiores (ε_D^0) e a porosidade do leito contendo apenas partículas menores (ε_d^0). Pode-se observar na Figura 4.2, que a curva obtida experimentalmente neste trabalho ($\lambda=1,47$ para o resíduo de acerola) é semelhante à curva obtida por Zhou e Yu (2003) para o menor valor de λ apresentado (7,32)

Foram testados os 5 modelos apresentados na Tabela 4.5 para a predição da porosidade da mistura de semente de acerola e soja com altura de leito estático de 8 cm. Dentre os modelos estudados, observa-se que os modelos A (Modelo da mistura ideal Yu e Standish, 1988) e E (Yu e Standish, 1987) superestimaram os valores de porosidade da mistura, indicando que existe efeito de interação entre as duas fases.

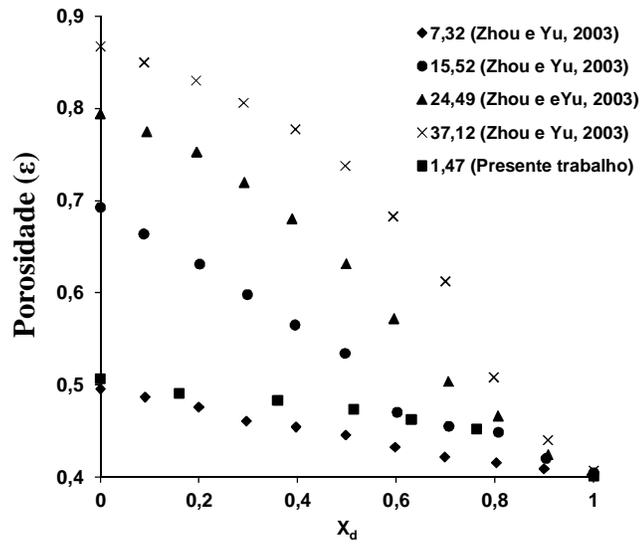


Figura 4.2 Porosidade de misturas binárias de fibras de diferentes valores de λ .

A Figura 4.3 apresenta uma comparação entre os dados experimentais de porosidade e a porosidade da mistura de soja e resíduo de acerola nas diferentes composições obtida pelos modelos testados, empregando o conceito de diâmetro equivalente de empacotamento.

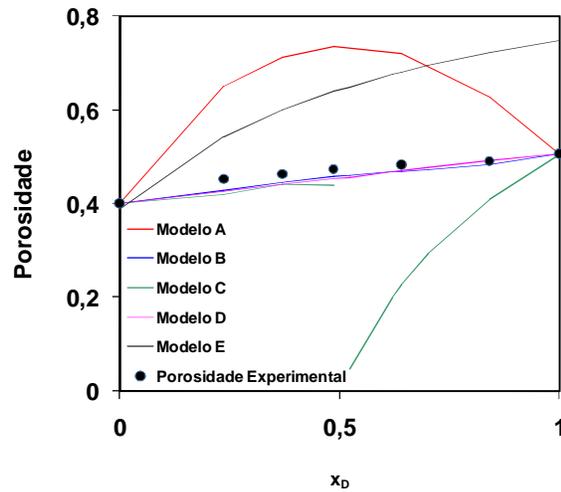


Figura 4.3 Porosidade da mistura soja e resíduo de acerola em função da fração mássica de resíduo de acerola (x_D): dados experimentais e simulados.

Tabela 4.5 Modelos para cálculo da porosidade de mistura de partículas.

Modelos de Porosidade	
A- Modelo da mistura ideal (Yu e Standish, 1988)	$V = \sum_{i=1}^n X_i \bar{V}_i; \quad \varepsilon = 1 - \frac{1}{V}$
B- Yu <i>et al.</i> (1996)	$\varepsilon = \{1 - (1 - \varepsilon_D^{(0)}) X_D^{[1,35 - X_D F(\delta)]}\} * [\varepsilon_d^{(0)} + (1 - \varepsilon_d^{(0)}) X_D^{[f(\delta)]}]$ <p>Funções de interação entre partículas:</p> $F(\delta) = \left\{ 0,27 - \frac{1,55}{1 + \frac{1}{\exp\left(\frac{\delta + 0,06}{0,27}\right)}} \right\}^{-1}; \quad f(\delta) = 5 - 4\sqrt{\delta}$
C- Modelo empregado por Dias <i>et al.</i> (2004)	$X_{D,\min} = \frac{1 - \varepsilon_D^{(0)}}{1 - \varepsilon_d^{(0)} \varepsilon_D^{(0)}}$ $\varepsilon = \frac{\varepsilon_d^{(0)} (1 - X_D) \exp(1,2264 X_D^{1/\sqrt{\delta}})}{1 - \varepsilon_d^{(0)} X_D}, X_D \leq X_{D,\min}$ $\varepsilon = 1 - \frac{1 - \varepsilon_D^{(0)}}{X_D}, X_D > X_{D,\min}$
D- Yu <i>et al.</i> (1993) apud Finkers e Hoffmann (1998)	$V_d = \frac{1}{1 - \varepsilon_d^0} \quad V_D = \frac{1}{1 - \varepsilon_D^0}$ $\left(\frac{V - V_D X_D}{V_d} \right)^2 + 2G_{(\delta)} \left(\frac{V - V_D X_D}{V_d} \right) \left(\frac{V - X_D - V_d X_d}{V_D - 1} \right) + \left(\frac{V - X_D - V_d X_d}{V_D - 1} \right)^2 = 1$ $\frac{1}{G_{(\delta)}} = \begin{cases} 1,355\delta^{1,566} & (\delta \leq 0,824) \\ 1 & (\delta \geq 0,824) \end{cases}$
E -Yu e Standish (1987)	$V = [V_d - (V_d - 1)g(\delta)]X_d + X_D V_D + V_D(1 - f(\delta))X_D$ $f(\delta) = (1 - \delta)^{3,33} + 2,81\delta(1 - \delta)^{2,77}$ $g(\delta) = (1 - \delta)^{1,97} + 0,36\delta(1 - \delta)^{3,67}$

O modelo C (Dias *et al.*, 2004), que contabiliza o efeito dos dois mecanismos que regem o empacotamento, falhou ao calcular a composição da mistura, pois prediz um ponto no qual a porosidade é mínima a uma fração volumétrica de 0,522, o que não ocorre experimentalmente.

O modelo B (Yu *et al.*, 1996) e o modelo D (Yu *et al.*, 1993 *apud* Finkers e Hoffmann, 1998) foram bons para a predição da porosidade da mistura. O desvio máximo encontrado no modelo B foi de 4,9% e no modelo D foi de 5,6%, com relação aos dados obtidos experimentalmente. O modelo D contabiliza a porosidade individual de cada componente,

ponderado por funções da relação dos diâmetros das partículas e pelo parâmetro $G(\delta)$, que é função da razão entre os diâmetros equivalentes das partículas.

A Figura 4.4, apresentada por Finkers e Hoffman (1998), ilustra o comportamento do volume específico como função da composição volumétrica, para diferentes valores de $G(\delta)$. O valor de G obtido experimentalmente foi de 1,082, muito próximo de 1, o que indica um aumento quase linear do volume específico, e conseqüentemente da porosidade com a fração volumétrica do componente de maior diâmetro equivalente.

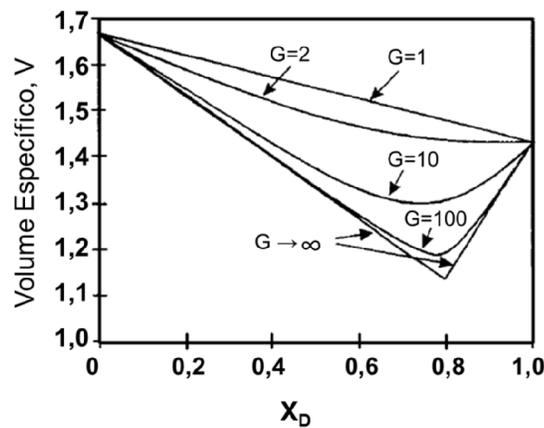


Figura 4.4 Volume específico de misturas para os diferentes valores de G do modelo D Finkers e Hoffman (1998).

Foi calculada também a porosidade das misturas utilizadas para os testes fluidodinâmicos. A massa de semente e de soja foi medida de acordo com a composição de cada mistura e acrescentadas aleatoriamente a um recipiente cônico, de mesma geometria que o cone do leito de jorro, até que fosse atingida a altura de leito estático do respectivo teste, e assim, foi estimada a porosidade inicial do leito estático.

A Tabela 4.6 apresenta os valores médios das frações mássicas e a porosidade da mistura de resíduo agroindustrial de acerola e soja, bem como a porosidade média da mistura obtida experimentalmente para as alturas de leito estático estudadas.

Tabela 4.6 Propriedades da mistura resíduo de acerola-soja a diferentes alturas de leito estático e frações mássicas.

H_0 [m]	x_D	ε	m_D [g]	m_d [g]	m_{D+d} [g]
0,06	0,00	0,63	0,00	157,89	157,89
	0,15	0,65	20,59	114,22	134,81
	0,25	0,65	30,9	94,04	124,94
	0,35	0,66	40,3	74,81	115,11
	0,45	0,66	48,59	59,36	107,95
	0,50	0,68	49,95	50,02	99,97
0,09	0,00	0,42	0,00	470,96	470,96
	0,05	0,46	21,01	399,13	420,14
	0,10	0,48	39,06	351,08	390,14
	0,15	0,52	52,59	297,75	350,34
	0,20	0,52	67,59	270,16	337,75
	0,30	0,53	93,11	216,90	310,01
	0,40	0,54	115,02	170,09	285,11

4.4 Ângulo de repouso da mistura resíduo de acerola-soja

Com o intuito de auxiliar no entendimento da fluidodinâmica da mistura de soja e resíduo de acerola ao longo da secagem no leito de jorro, foi analisado o ângulo de repouso estático e dinâmico do resíduo de acerola em diferentes umidades e os ângulos de repouso da soja.

Na Figura 4.5, pode-se observar uma grande diferença entre o ângulo de repouso estático do resíduo de acerola ($40,02 \pm 2,25$) e o ângulo de repouso estático da soja ($23,34 \pm 0,90$). Tal diferença, aliada a diferença de formato e densidade pode explicar a diferença no comportamento fluidodinâmico das duas partículas dentro do leito de jorro.

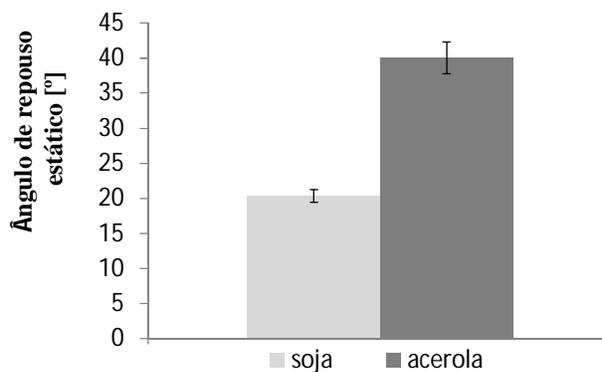


Figura 4.5 Ângulo de repouso estático do resíduo de acerola e da soja.

A Figura 4.6 ilustra o ângulo de repouso estático obtido a diferentes umidades do material. Pode-se concluir que não há uma variação significativa no ângulo de repouso estático com a umidade. A variação encontrada pode ser fruto da flutuação da medida e incertezas experimentais.

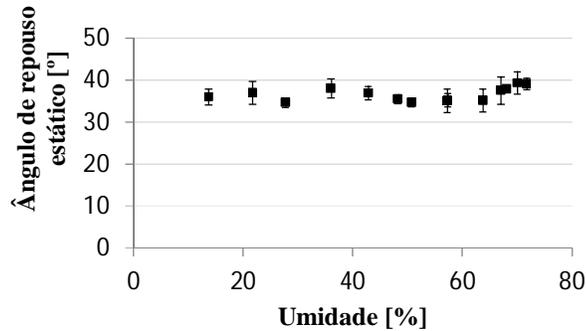


Figura 4.6 Ângulo de repouso estático do resíduo de acerola a diferentes umidades.

Na Figura 4.7 pode-se observar o ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola ($49,29 \pm 4,16$) e da soja ($30,07 \pm 7,80$). Observa-se novamente uma elevada diferença em tais valores, o que pode auxiliar na explicação da diferença do comportamento fluidodinâmico desses materiais. Observa-se também na Figura 4.8, os valores do ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola obtidos em diferentes umidades. Não foi observada nenhuma diferença significativa entre os valores obtidos, não podendo ser possível observar uma tendência no ângulo de repouso com a variação da umidade.

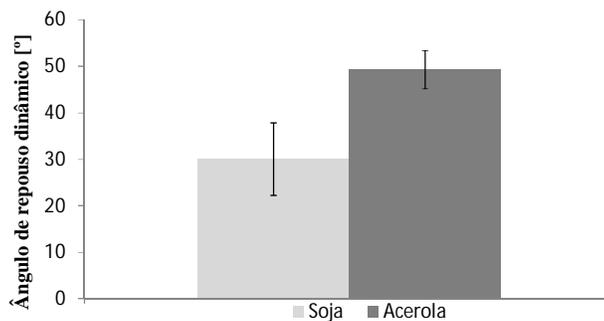


Figura 4.7 Ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola e da soja.

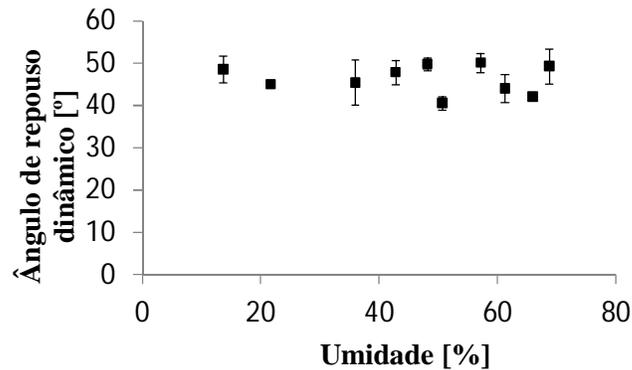


Figura 4.8 Ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola a diferentes umidades.

4.5 Fluidodinâmica da mistura em leito de jorro

4.5.1 Curvas características de vazão de ar em função da queda de pressão

Nas Figuras 4.9 a 4.27 pode-se verificar a curva característica da queda de pressão em função da vazão do ar de um leito de jorro operando com diferentes misturas de semente de acerola e soja, para alturas de leito estático de 6, 8 e 9 cm, respectivamente a temperatura ambiente. A Figura 4.28 apresenta imagens em um meio leito ($x_D = 0,25$ e $H_0 = 8$ cm) para visualização da dinâmica das partículas à medida em que se aumenta a vazão de alimentação de ar.

É importante ressaltar que ao longo da obtenção da curva característica da mistura, o resíduo de acerola vai perdendo umidade e alterando suas características. Portanto, ao chegar ao ponto de obtenção do jorro mínimo completo da mistura, o material já não está mais em sua umidade inicial, e sim em uma umidade reduzida. No entanto, a réplica da curva relativa a vazão descendente é coerente com o primeiro resultado de vazão de jorro mínimo em quase todos os casos.

Para auxiliar na identificação do ponto correspondente ao jorro mínimo completo da mistura, foi observado tanto o gráfico da curva característica quanto seus respectivos desvios, combinadamente com a observação visual ao longo do experimento. Pode-se observar

nitidamente uma mudança no comportamento do desvio da medida da queda de pressão no ponto correspondente ao jorro mínimo completo da mistura (ponto destacado no gráfico).

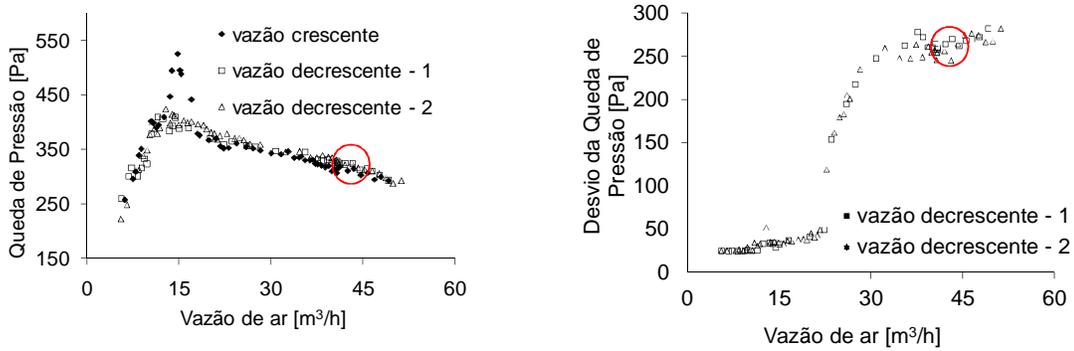


Figura 4.9- Curvas características da relação entre vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D=0$.

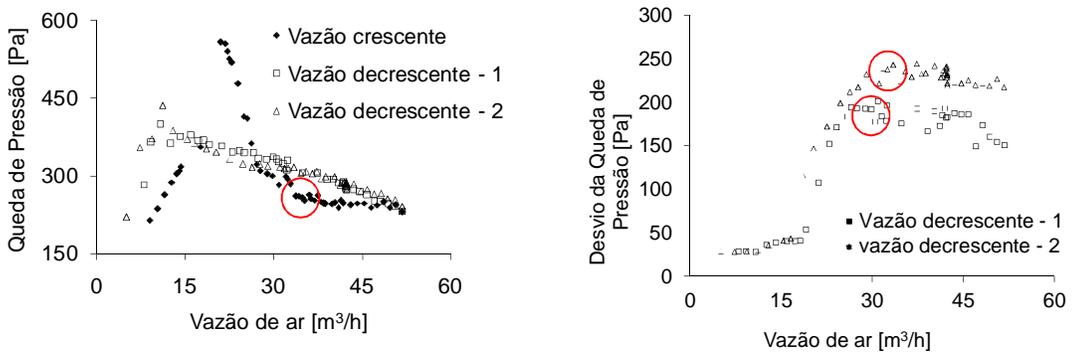


Figura 4.10 Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D=0,15$.

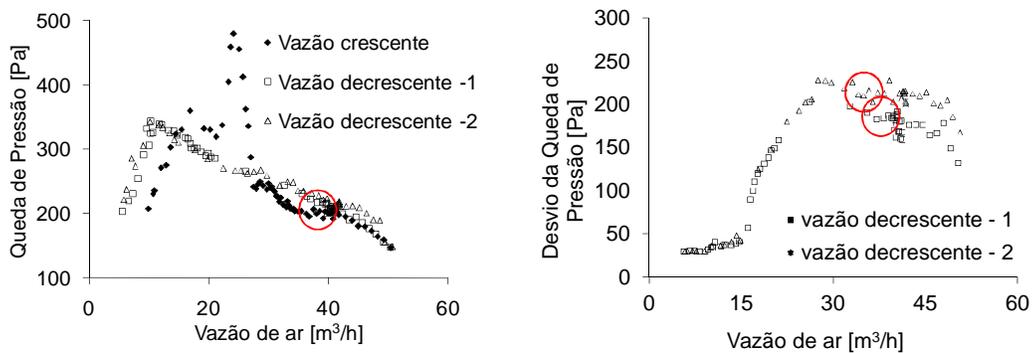


Figura 4.11- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D=0,25$.

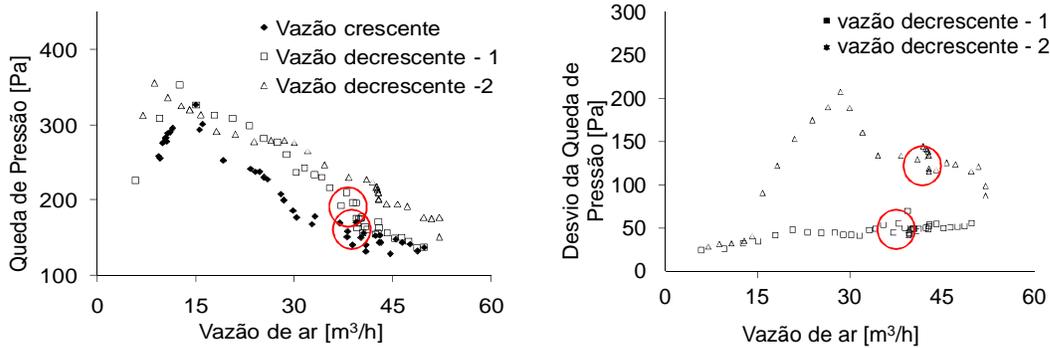


Figura 4.12- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,35$.

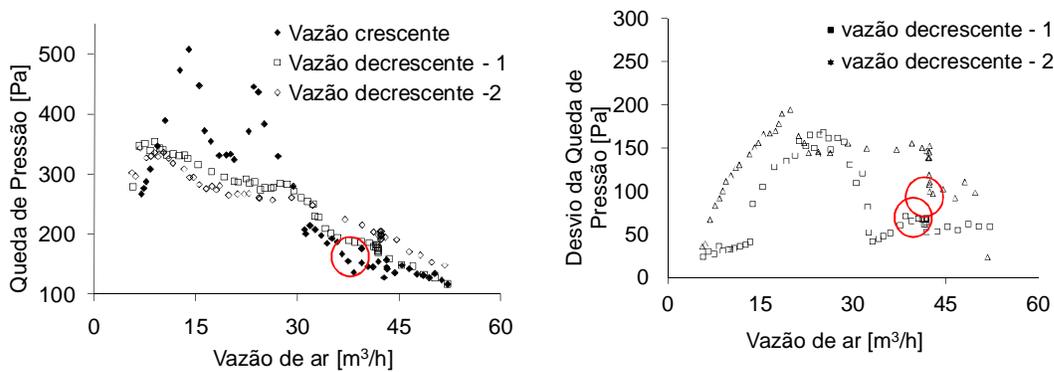


Figura 4.13- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,45$.

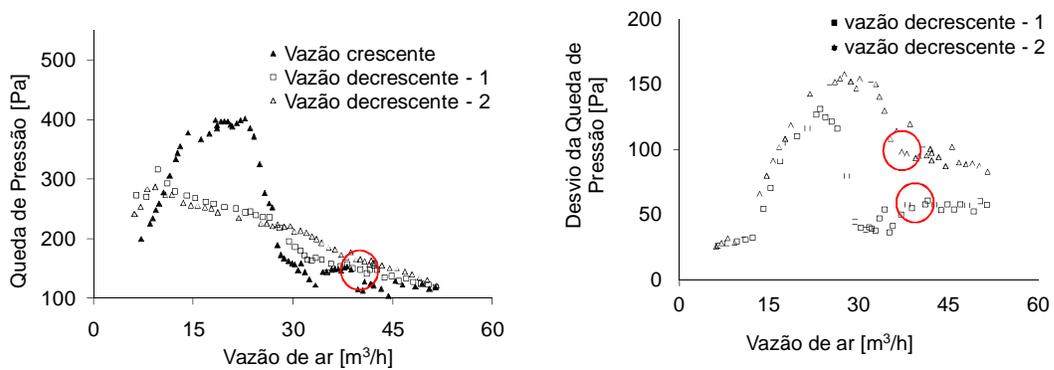


Figura 4.14- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=6$ cm, $x_D = 0,50$.

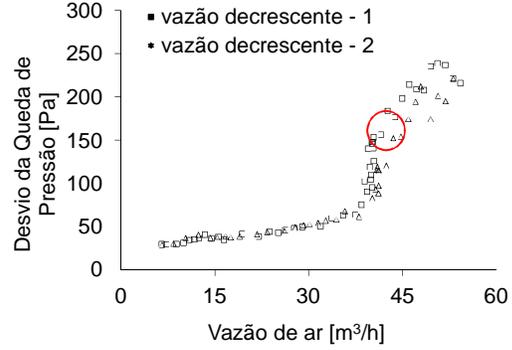
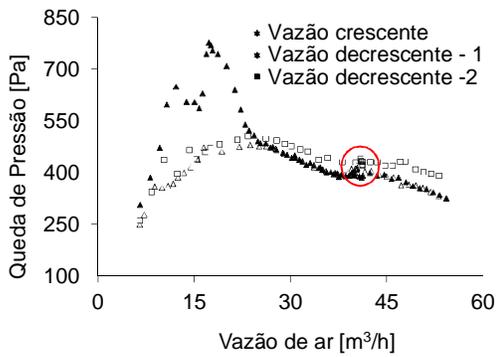


Figura 4.15- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0$.

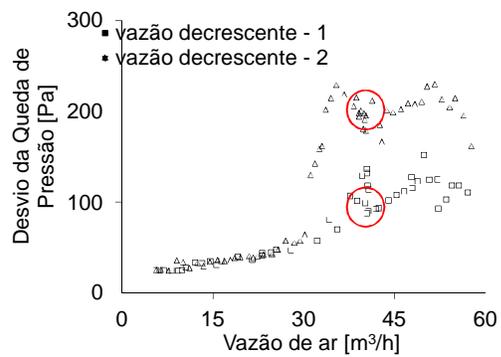
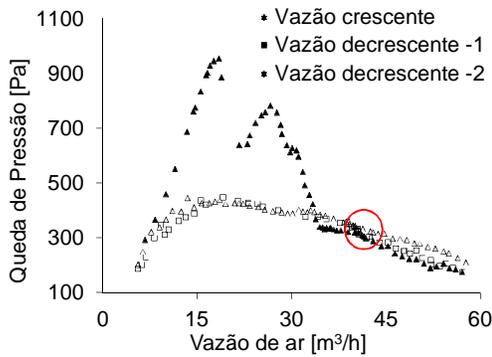


Figura 4.16- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,15$.

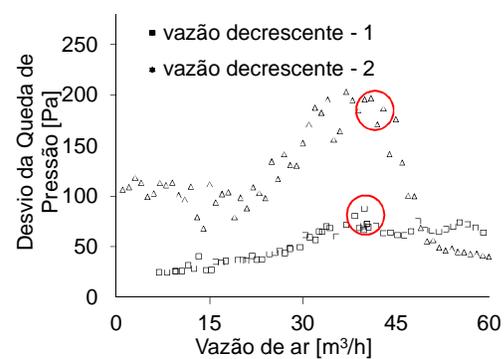
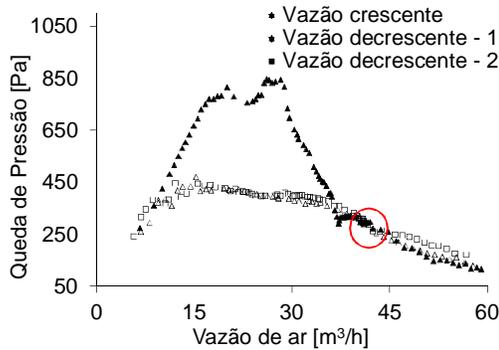


Figura 4.17- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D = 0,25$.

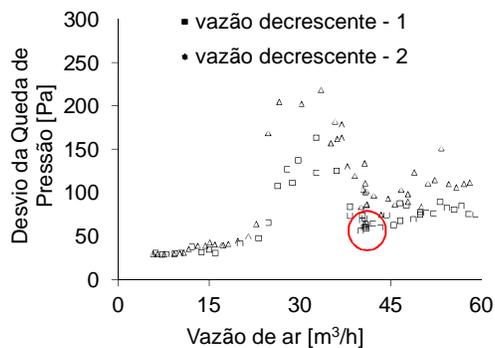
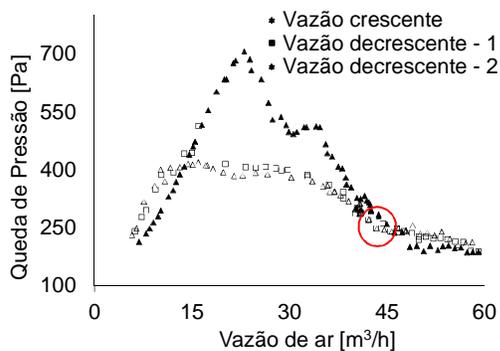


Figura 4.18- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D=0,35$.

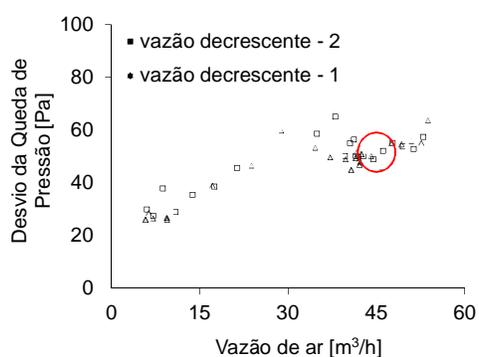
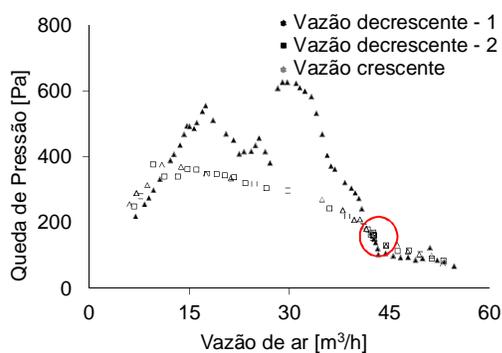


Figura 4.19- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D=0,50$.

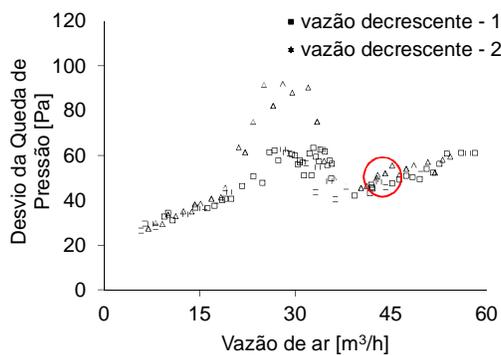
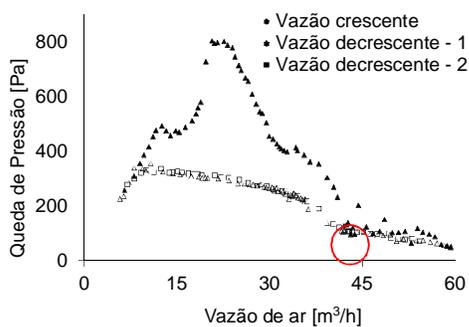


Figura 4.20- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=8$ cm, $x_D=0,65$

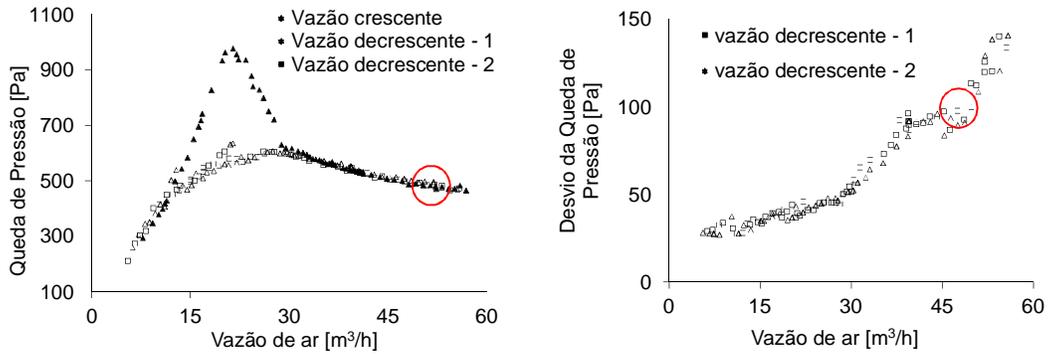


Figura 4.21- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0$.

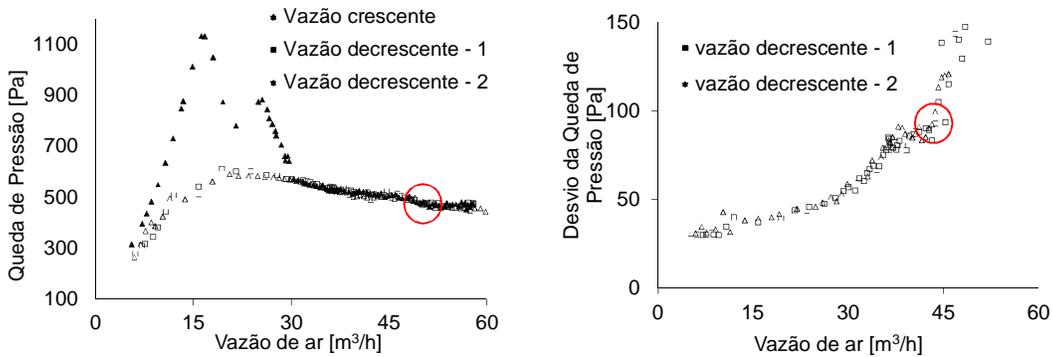


Figura 4.22- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,05$.

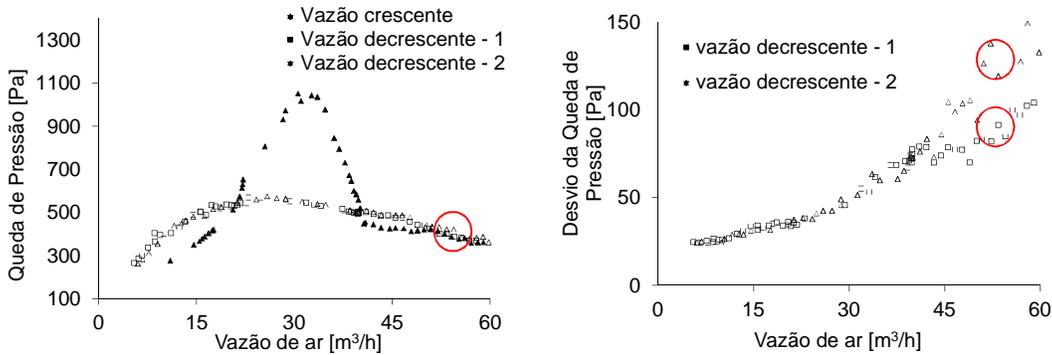


Figura 4.23- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,10$.

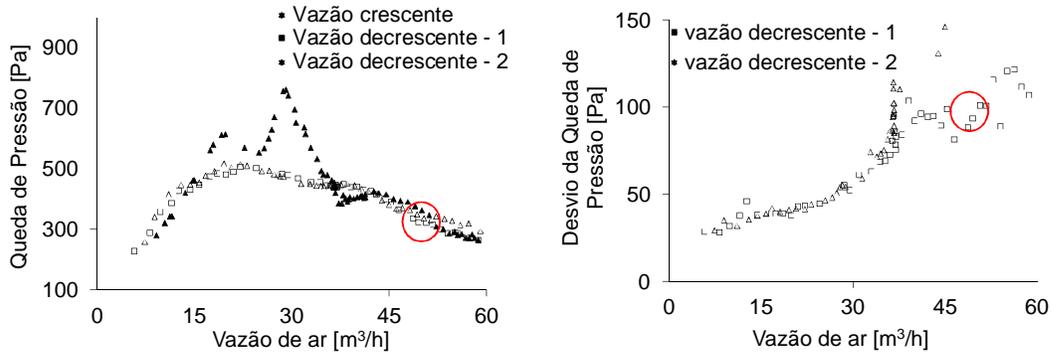


Figura 4.24- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,15$.

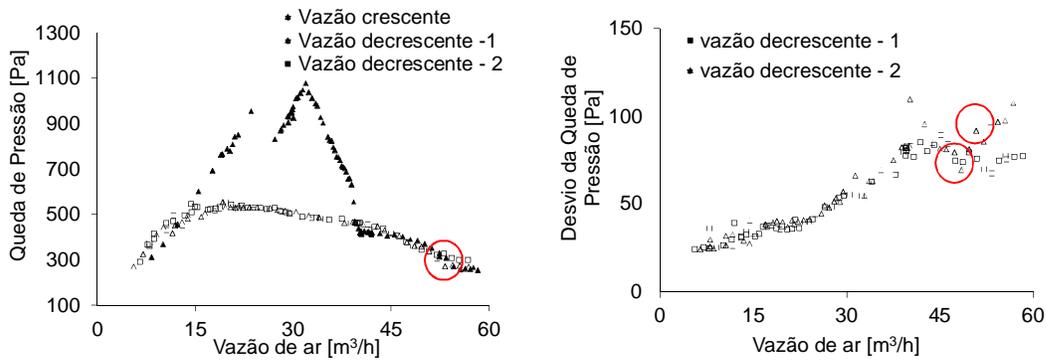


Figura 4.25- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,20$.

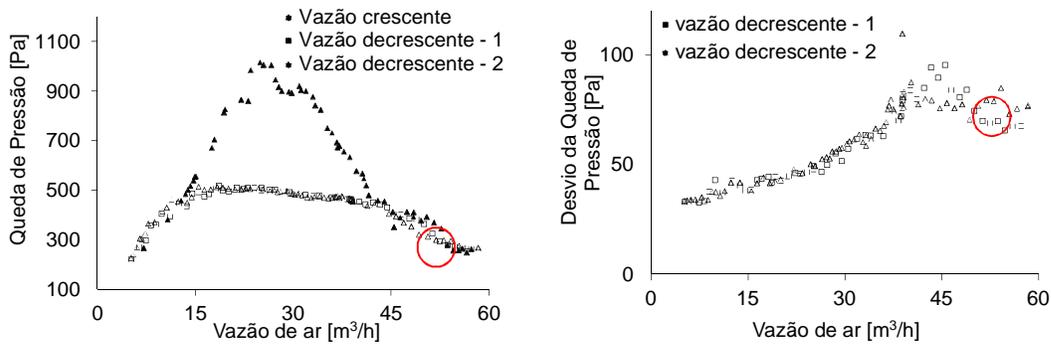


Figura 4.26- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,30$.

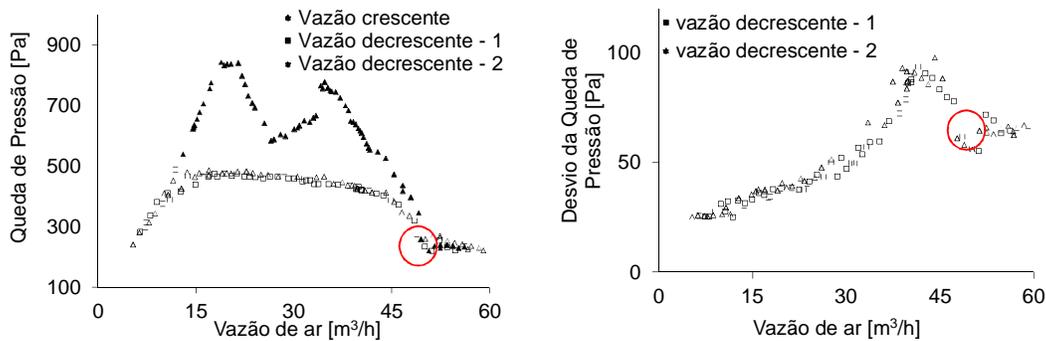


Figura 4.27- Curvas características da relação vazão de ar e queda de pressão e desvio da queda de pressão em um leito de jorro. $H_0=9$ cm $x_D=0,40$.

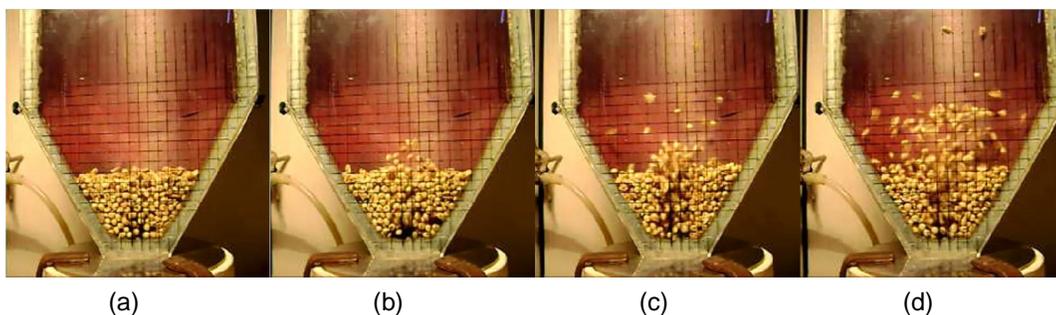


Figura 4.28- Processo de formação da condição de jorro estável em um meio leito, contendo mistura binária de soja e sementes de acerola ($x_D=0,25$ e $H_0=8$ cm).

Os eventos que ocorrem no leito com o aumento da vazão de ar podem ser descritos da seguinte forma:

- Inicialmente, observou-se que o ar somente percola o leito, o que corresponde a uma região em que a queda de pressão aumenta de forma quase linear (leito fixo) (Figura 4.28 a).
- Em seguida, ocorre a formação de uma cavidade na base do cone (Figura 4.28 b).
- Com o aumento da vazão de ar, as partículas menores, que possuem menor velocidade terminal, foram deslocadas para a parte superior do leito, onde começaram a movimentar (Figura 4.28 c).
- Em seguida, a cavidade foi rompida, dando origem a uma condição de jorro estável da mistura (Figura 4.28 d).

4.5.2 Efeito das variáveis x_D e H_0 sobre a condição de jorro mínimo

Para se quantificar o efeito das variáveis x_D (fração mássica do resíduo de acerola) e altura de leito estático (H_0) sobre a condição de jorro mínimo, fez-se uma análise de múltipla regressão, com um teste de hipótese, utilizando uma t de Student com nível de significância de 10 %, sendo desconsiderados os parâmetros com nível de significância maior que este valor para a determinação dos parâmetros significativos da regressão.

As Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 apresentam os valores de vazões de ar ($Q_{jm}[m/s]$) e quedas de pressão ($-\Delta P_{jm}[Pa]$) referentes ao jorro mínimo de cada composição de mistura estudada nas alturas de 6, 8 e 9 cm, respectivamente, os quais foram quantificados com base na análise visual ao longo dos experimentos, e na análise dos gráficos que correlacionam a vazão de ar com a queda de pressão e o desvio da queda de pressão (Figuras 4.9 a 4.27).

Tabela 4.7- Condições dos experimentos e respostas referentes à condição de jorro mínimo para a altura de 6 cm.

x_D	$Q_{jm}[m/s]$	$\Delta P_{jm}[Pa]$	ε
0,00	36,50	335,07	0,63
0,00	37,69	330,70	0,63
0,15	32,79	261,14	0,65
0,15	30,15	274,25	0,65
0,15	32,35	310,71	0,65
0,25	37,81	200,06	0,65
0,25	37,52	198,08	0,65
0,25	35,54	230,71	0,65
0,25	36,45	227,12	0,65
0,35	42,63	163,59	0,66
0,35	42,17	139,42	0,66
0,35	40,48	155,92	0,66
0,35	44,09	194,27	0,66
0,35	36,93	161,14	0,66
0,45	35,87	182,82	0,66
0,45	34,68	166,39	0,66
0,50	42,10	89,73	0,68
0,50	40,87	92,01	0,68

Tabela 4.8- Condições dos experimentos e respostas referentes à condição de jorro mínimo para a altura de 8 cm.

x_D	$Q_{jm} [m/s]$	$\Delta P_{jm} [Pa]$	ε
0,00	35,56	403,91	0,40
0,00	34,46	436,65	0,40
0,15	40,34	329,93	0,45
0,15	38,84	332,02	0,45
0,15	41,86	306,41	0,45
0,15	41,87	347,76	0,45
0,25	39,84	319,36	0,46
0,25	39,30	318,19	0,46
0,25	38,85	354,36	0,48
0,25	38,21	356,85	0,48
0,35	43,49	239,23	0,47
0,35	44,54	228,01	0,47
0,35	43,47	247,32	0,47
0,35	43,31	248,28	0,47
0,50	42,44	154,50	0,49
0,50	44,16	154,05	0,49
0,50	43,35	103,26	0,49
0,65	42,62	106,10	0,48
0,65	41,67	109,77	0,48
0,65	40,76	89,60	0,48
0,65	40,91	109,57	0,48

Tabela 4.9- Condições dos experimentos e respostas referentes à condição de jorro mínimo para a altura de 9 cm.

x_D	$Q_{jm} [m/s]$	$\Delta P_{jm} [Pa]$	ε
0,00	53,15	475,67	0,42
0,00	53,22	483,35	0,42
0,00	50,96	418,83	0,42
0,00	50,12	432,84	0,42
0,05	48,33	397,29	0,46
0,05	50,01	411,27	0,46
0,05	50,51	474,84	0,46
0,05	50,55	480,59	0,46
0,10	50,01	400,63	0,48
0,10	50,28	393,28	0,48
0,10	51,17	389,45	0,48
0,10	50,71	403,61	0,48
0,10	50,83	424,95	0,48
0,10	50,11	431,57	0,48
0,15	50,35	335,76	0,52
0,15	49,55	323,19	0,52
0,15	56,31	333,17	0,52
0,15	54,13	377,51	0,52
0,15	55,03	237,42	0,52
0,15	54,44	308,04	0,52
0,20	53,33	271,28	0,52
0,20	52,01	322,17	0,52
0,30	53,68	279,29	0,53
0,30	51,93	299,80	0,53
0,30	52,69	261,48	0,53
0,30	52,73	234,25	0,53
0,40	50,08	234,35	0,54
0,40	50,17	259,24	0,54
0,40	49,35	251,41	0,54
0,40	49,52	238,46	0,54

As Eq. 4.1 e 4.2 apresentam, respectivamente, as equações de codificação da altura de leito estático e da fração mássica de resíduo de acerola na mistura.

$$x_1 = \frac{H_0 - 0,075}{0,015} \quad (4.1)$$

$$x_2 = \frac{x_D - 0,33}{0,28} \quad (4.2)$$

A Tabela 4.10 apresenta os resultados obtidos pela regressão, contendo somente os termos que influenciaram significativamente a vazão de ar na condição de jorro mínimo ($p > 0,10$). É possível observar que além do efeito significativo das variáveis isoladas, fração mássica e altura de leito estático, há a presença de um termo quadrático, relativo à variável altura, e ainda a interação entre a altura e a fração mássica.

Tabela 4.10- Efeitos das variáveis x_D e H_0 sobre a vazão de alimentação de ar no jorro mínimo ($R^2 = 0,8624$).

Fator	Efeito	Desvio	Nível de Significância
Média	37,86	0,64	$<10^{-4}$
x_1	6,75	14,68	$<10^{-4}$
x_2	2,22	0,55	0,0001
x_1^2	7,13	0,81	$<10^{-4}$
x_1x_2	-1,64	0,74	0,0294

A Figura 4.29 refere-se à superfície de resposta para a vazão de ar no jorro mínimo obtida com base nos valores dos parâmetros da regressão, dispostos na Tabela 4.10.

Observa-se que, a medida que se aumenta a fração mássica de semente de acerola na mistura, o valor da vazão de ar no jorro mínimo aumenta. Assim, o leito rico semente de acerola, que apresenta maior porosidade, oferece uma menor resistência ao escoamento do gás, fazendo com que grande parte do ar que escoaria na região de jorro, responsável pela formação da cavidade central, agora percole a região anular. Logo, uma maior vazão de ar

será requerida para romper a cavidade na região de jorro e estabelecer a condição de jorro estável.

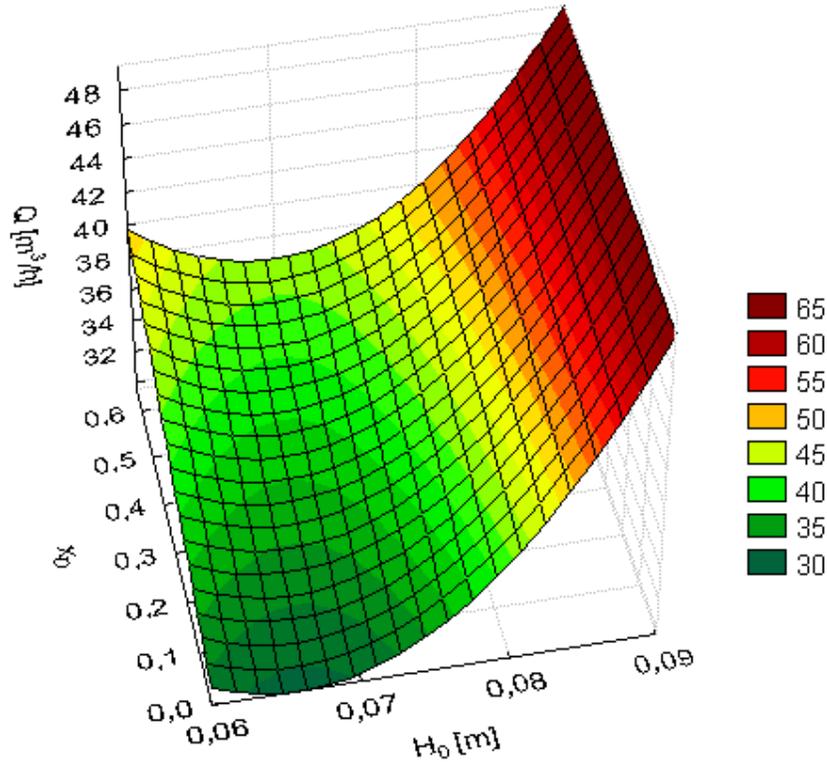


Figura 4.29- Superfície de resposta para a vazão de ar na condição de jorro mínimo (Q_{jm}) em função da fração mássica da maior partícula na mistura (x_D) e da altura de leito estático (H_0).

Com relação ao efeito da altura de leito estático, nota-se que, há primeiro um ligeiro decaimento, e depois um grande incremento no valor de jorro mínimo conjunto independentemente da composição da mistura. Comportamento similar foi observado quando comparadas as porosidades das misturas nas diferentes alturas de leito estático. Primeiramente há um decaimento e depois um incremento nos valores. Este fenômeno pode ser explicado pelo efeito de parede que é mais intenso nas menores alturas de leito estático (0,06 m), causando uma porosidade maior no leito que na altura de 0,08 m de leito estático.

A vazão de ar de jorro mínimo pode ser expressa em função das variáveis isoladas, termos quadráticos e interação segundo a Equação 4.3, que apresentou um valor de 0,8624 para o quadrado do coeficiente de correlação da regressão. Este valor indica que 86,24 % da variabilidade dos dados de vazão de ar no jorro mínimo é explicada pela Equação (4.3). Os resíduos da regressão foram aleatórios e normalmente distribuídos.

$$Q_{jm} = 39,86 + x'b + x'Bx \quad (4.3)$$

$$b = \begin{bmatrix} 6,75 \\ 2,22 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 7,13 & -0,82 \\ -0,82 & 0 \end{bmatrix}$$

Na Tabela 4.11 estão contidos os resultados obtidos pela regressão para a queda de pressão no jorro mínimo, considerando apenas os termos que influenciaram significativamente esta resposta.

Tabela 4.11- Efeitos das variáveis x_D e H_0 sobre a queda de pressão na condição de jorro mínimo ($R^2= 0,9253$).

Fator	Efeito	Desvio	Nível de Significância
Média	245,51	7,71	$<10^{-4}$
x_1	39,47	5,55	$<10^{-4}$
x_2	-140,71	6,65	$<10^{-4}$
x_1^2	-20,68	9,81	0,0390
$x_1 x_2$	-15,15	8,91	0,0938

É possível observar que além do efeito significativo das variáveis isoladas, fração mássica e altura de leito estático, há a presença de um termo quadrático, relativo à variável altura, e ainda a interação entre a altura e a fração mássica, assim como observado para a vazão de jorro mínimo. A Figura 4.30 mostra que a queda de pressão diminui diretamente com o aumento da fração de semente de acerola no leito. Assim, o leito rico em semente de

acerola apresenta maior porosidade e conseqüentemente oferece uma menor resistência ao escoamento do gás, resultando em uma menor queda de pressão.

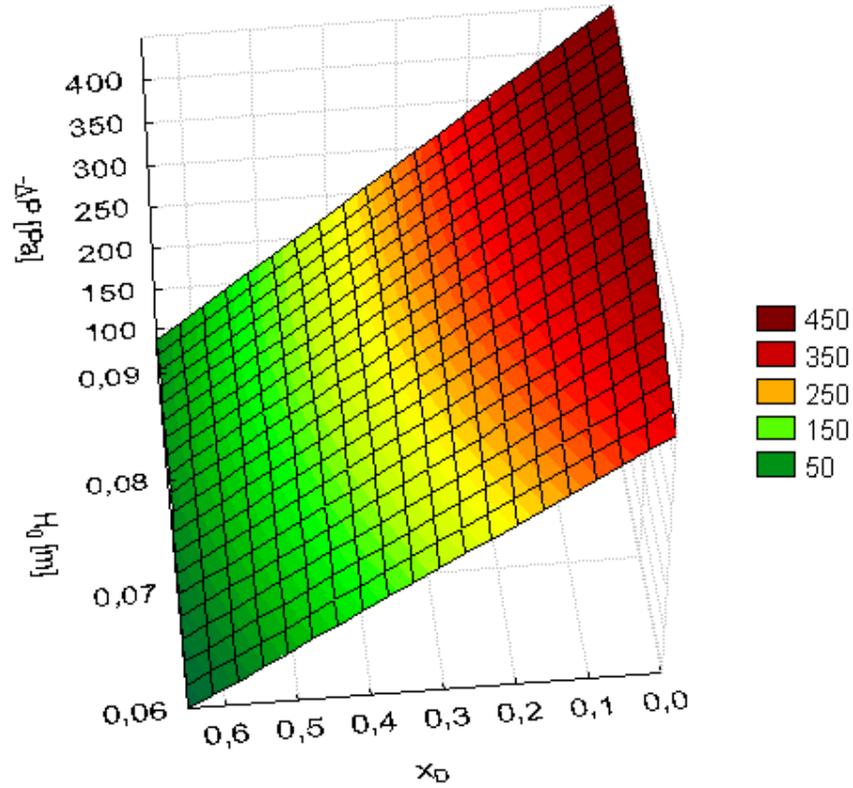


Figura 4.30- Superfície de resposta para a queda de pressão na condição de jorro mínimo em função da fração mássica da maior partícula na mistura e da altura de leito estático.

A queda de pressão no jorro mínimo pode ser expressa segundo a Eq. 4.4, que apresentou um valor de 0,9252 para o quadrado do coeficiente de correlação da regressão. Os resíduos da regressão foram aleatórios e normalmente distribuídos.

$$\Delta P_{jm} [Pa] = 245,51 + x'b + x'Bx \quad (4.4)$$

$$b = \begin{bmatrix} 39,47 \\ -140,71 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -20,68 & -7,58 \\ -7,58 & 0 \end{bmatrix}$$

4.5.3-Segregação axial de partículas em leito de jorro

As Figuras 4.31 a 4.33 apresentam o perfil axial da composição da mistura de partículas para as condições operacionais iniciais de $x_{D0}=0,15$; $x_{D0}=0,25$ e $x_{D0}=0,35$ nas alturas de 6 e 8 cm de leito estático. Em cada teste, a vazão utilizada foi de 1,2 vezes a vazão de jorro mínimo da mistura em questão previamente determinada e os testes foram realizados em triplicata. Através da análise do índice de mistura é possível verificar que as sementes de acerola concentram-se na parte superior do leito. Índices de mistura maiores do que 1, indicam uma concentração de semente de acerola superior a concentração inicial de semente de acerola no teste. A semente de acerola tem uma escoabilidade inferior a da soja, acumulando-se nas laterais do leito, distantes da região de jorro, ao contrário da soja que possui uma melhor escoabilidade no leito, por ser mais densa tem um movimento mais curto, caindo próxima à região de jorro.

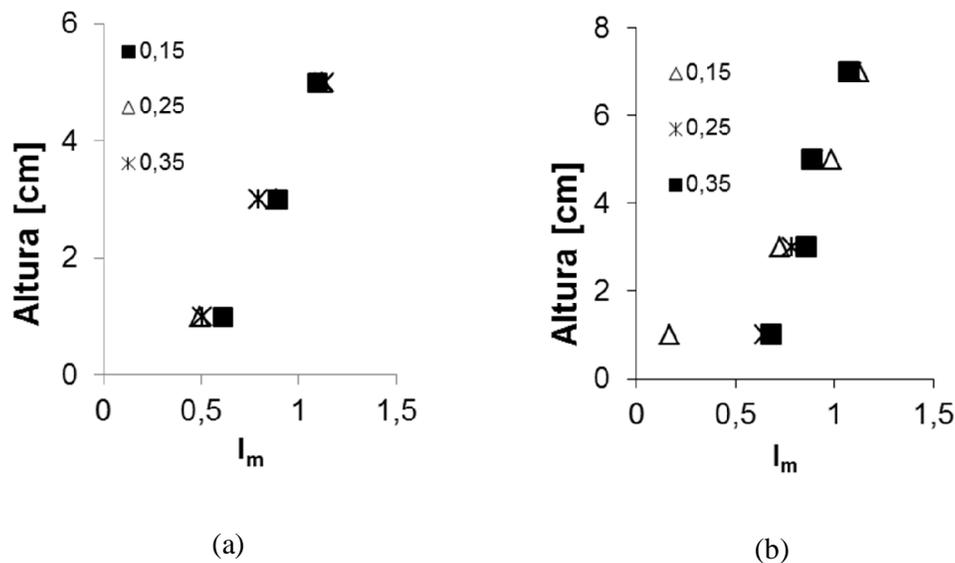


Figura 4.31- Índice de mistura para as diferentes condições iniciais. a) altura de leito estático de 6 cm b) altura de leito estático de 8 cm.

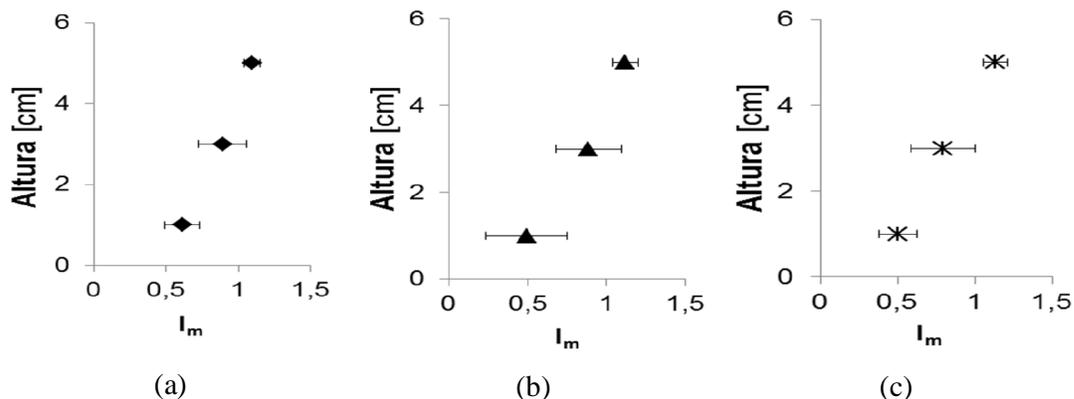


Figura 4.32- Perfil axial da composição da mistura de partículas com desvio padrão para a altura de 6 cm de leito estático a) fração mássica de 0,15 b) fração mássica de 0,25 e c) fração mássica de 0,35

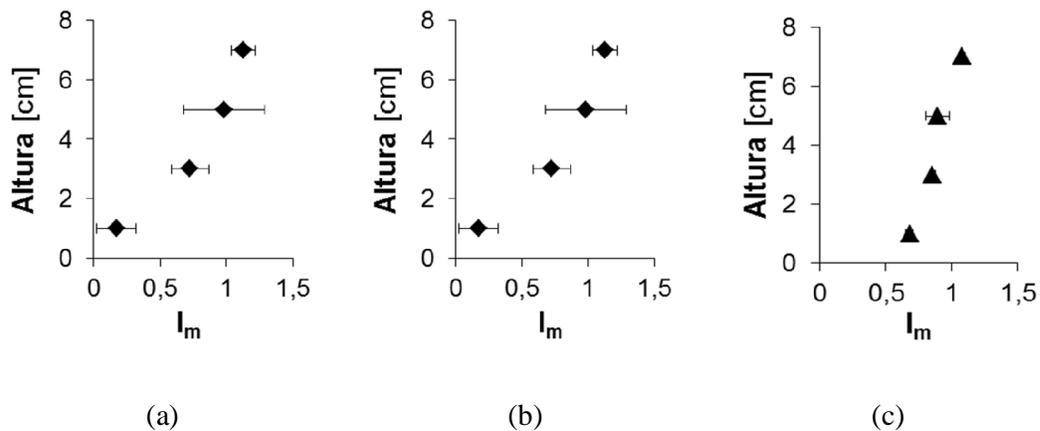


Figura 4.33- Perfil axial da composição da mistura de partículas com desvio padrão para a altura de 8 cm de leito estático a) fração mássica de 0,15 b) fração mássica de 0,25 e c) fração mássica de 0,35.

Foram também realizados experimentos com o intuito de verificar a variação do Índice de Mistura ao longo do tempo de secagem. Foi escolhida a fração de 0,25 de sementes de acerola na altura de leito estático de 8 cm, por ser uma mistura que jorrava facilmente, mesmo quando ainda úmida. Foram realizados experimentos com os seguintes tempos de secagem: 2,

5, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 80, 100 e 120 minutos a temperatura ambiente. Ao final foram avaliados o Índice de Mistura e a umidade final do material.

Na Figura 4.34 pode-se observar a variação do índice de Mistura com o tempo de secagem e verificar uma tendência em aumentar a segregação com o aumento do tempo de secagem. Tal comportamento pode ser explicado pela diferença de densidade da semente úmida e seca. Quanto mais seca, maior a diferença entre a densidade da semente de acerola e da soja, e, portanto uma maior segregação deve ocorrer no leito.

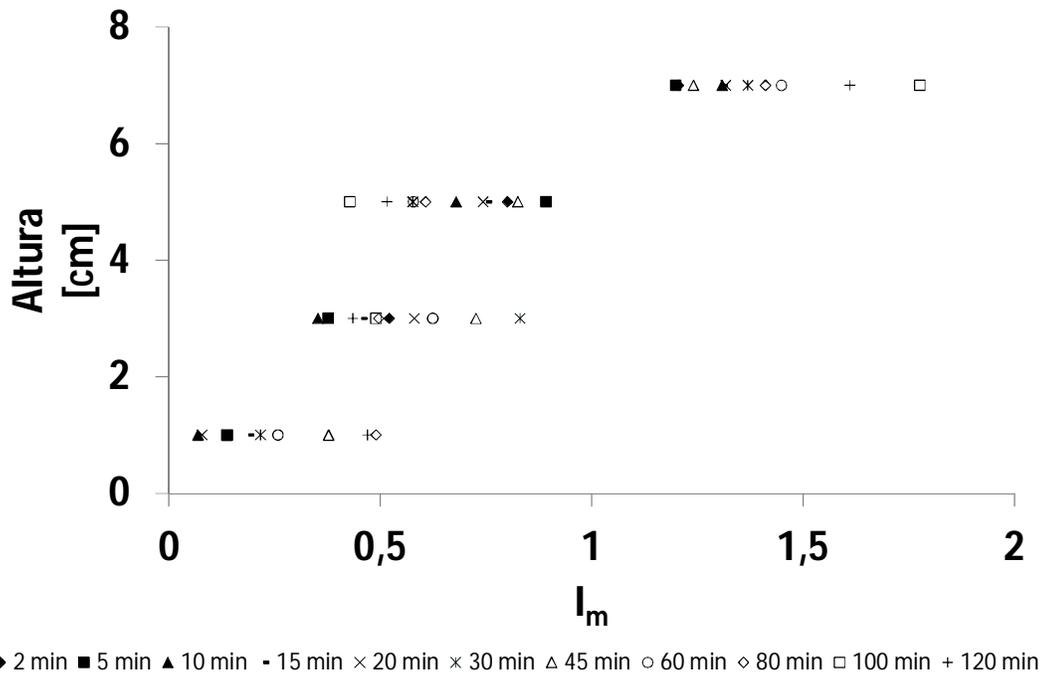


Figura 4.34- Índice de mistura de uma mistura de resíduo de acerola e soja $x_D=0,25$ e $H_0=8$ cm em leito de jorro e temperatura ambiente ao longo do tempo de secagem.

4.5.4 Cinética de secagem

Foram realizados experimentos a temperatura ambiente com o intuito de verificar a cinética de secagem da mistura de resíduo de acerola e soja no leito de jorro. Foi escolhida a fração de 0,25 de sementes de acerola na altura de leito estático de 8 cm, por ser uma mistura que jorrava facilmente mesmo quando ainda úmida.

Cada ponto da curva de cinética foi um experimento diferente, de modo a não se alterar as condições do experimento com a retirada de amostras de material do interior do leito, lembrando que a condição inicial do material em cada experimento foi a mesma.

Foram testados os 5 modelos de cinética de secagem apresentados pela Tabela 4.12 para verificar qual aquele que melhor se ajustava aos dados experimentais. Na Tabela 4.13 pode-se observar o valor do coeficiente quadrático de correlação obtido para cada modelo e concluir que os modelos que melhor se ajustaram aos dados foram os modelos de Overhults e o de Page.

Tabela 4.12 - Modelos de cinética de secagem.

Equação	Referência
$MR = \exp(-Kt)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	LEWIS
$MR = C \exp(-Kt)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	BROOKER <i>et al.</i>
$MR = C \left(\exp(-Kt) + \frac{1}{9} \exp(-9Kt) \right)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	HENDERSON e HENDERSON
$MR = \exp(-Kt^n)$ onde: $K = A \exp\left(-\frac{B}{T_f}\right)$	PAGE
$MR = \exp(-(Kt)^n)$ onde: $K = \exp\left(A + \frac{B}{T_f}\right)$	OVERHULTS <i>et al.</i>

Tabela 4.13- Coeficiente quadrático de correlação dos modelos de cinética de secagem para a mistura resíduo de acerola - soja.

Modelo	R ²
Overhults	0,9954
Page	0,9954
Lewis	0,9769
Henderson	0,9701
Brooker	0,9818

Na Figura 4.35 podem-se observar os dados experimentais de umidade adimensionalizados (MR) obtidos na secagem da mistura de resíduo de acerola e soja e a predição dos modelos de Page e Overhults.

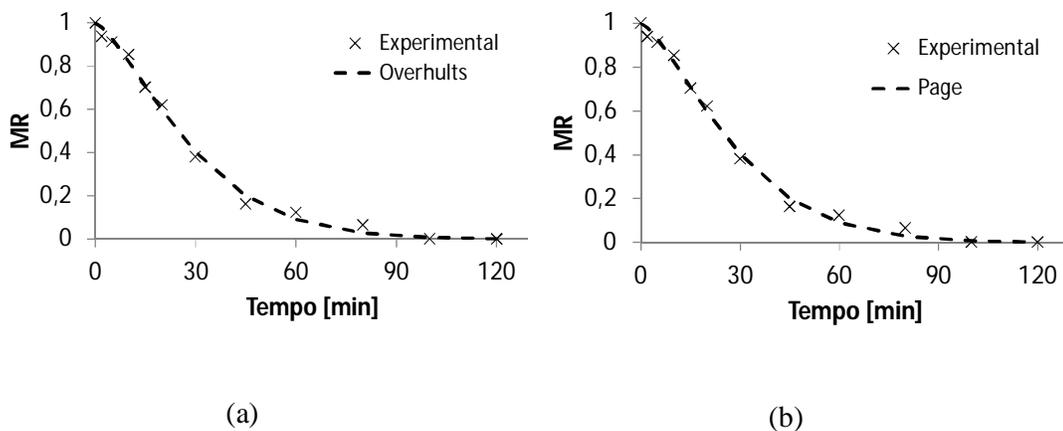


Figura 4.35- Dados experimentais de cinética de secagem da semente de acerola.

a) ajustado pelo modelo de Overhults b) ajustado pelo modelo de Page.

4.5.5 Cinética de variação dos compostos bioativos ao longo do tempo de secagem

Foram realizados experimentos variando-se apenas o tempo de secagem com o intuito de verificar a cinética de degradação dos compostos fenólicos, flavonoides e ácido cítrico, bem como o índice de mistura e a umidade do resíduo de acerola.

A condição experimental utilizada foi: 1,5Q_{jm}, T=70°C, H₀=8cm e x_D=0,40 e os tempos de secagem utilizados foram de: 2, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50 e 60 minutos.

Lembrando que cada para cada tempo de secagem, um experimento diferente foi realizado, de modo a não se alterar as condições do experimento com a retirada de amostras de material do interior do leito, lembrando que a condição inicial do material em cada experimento foi a mesma.

A Figura 4.36 apresenta o comportamento cinético da secagem, enquanto as Figuras 4.37 a 4.40 apresentam o comportamento ao longo do tempo do índice de mistura e da variação da vitamina C, dos compostos fenólicos e flavonoides, respectivamente.

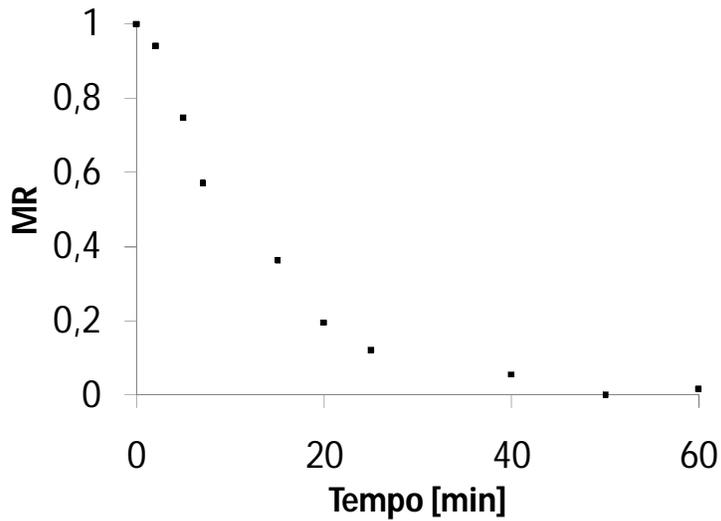


Figura 4.36 - Cinética de secagem do resíduo de acerola .

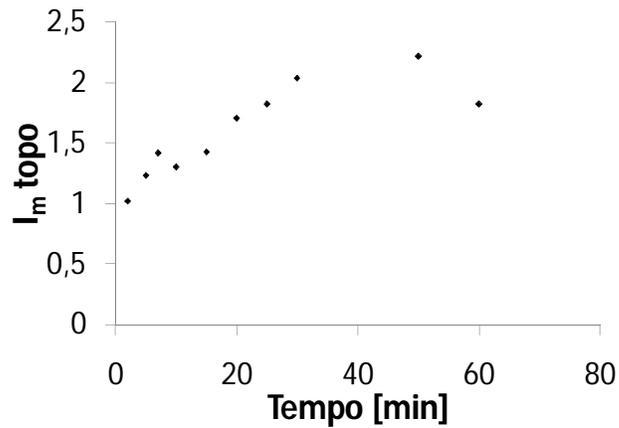


Figura 4.37 - Índice de Mistura no topo da mistura de resíduo de acerola e soja ao longo do tempo em um leito de jorro.

Com relação à quantificação do Índice de Mistura no topo do leite, pode-se observar que o mesmo aumenta ao longo do tempo de secagem. Tal fenômeno ocorre devido ao pronunciamento da diferença das densidades dos materiais, visto que o resíduo de acerola ao perder água durante o processo tem sua densidade reduzida. Materiais mais leves são mais facilmente arrastados pelo jorro, e caem mais próximos a parede do leite, formando algumas zonas de não-homogeneidade no equipamento.

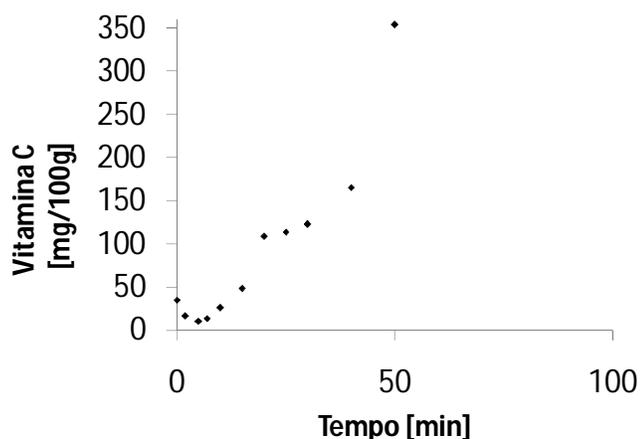


Figura 4.38 - Variação da vitamina C no resíduo de acerola em função do tempo.

Em geral analisando o teor dos compostos bioativos no resíduo de acerola com diferentes tempos de secagem, verificou-se um aumento inicial nesse teor e depois uma diminuição. O que ocorre é que durante a secagem, há um enrijecimento das fibras da semente, facilitando a extração dos compostos bioativos presentes no material, seja por meio metanólico (fenólicos e flavonoides) ou aquoso (ácido ascórbico). Tal fenômeno foi observado também por Ozgur *et al.* (2011), que ao secar pimentas, verificou um teor de ácido ascórbico superior nas pimentas secas que no material *in natura*. Dorta *et al.*, 2012 explica esse fenômeno pela desativação de algumas enzimas a temperaturas médias, que atuam na degradação dos compostos bioativos.

Foi observado que o teor de ácido ascórbico aumentou significativamente ao longo da secagem. Visualmente enquanto realizadas a análise, foi nítida a diferença das soluções

obtidas a partir da semente de acerola, sendo muito mais escuras as soluções obtidas dos resíduos mais secos.

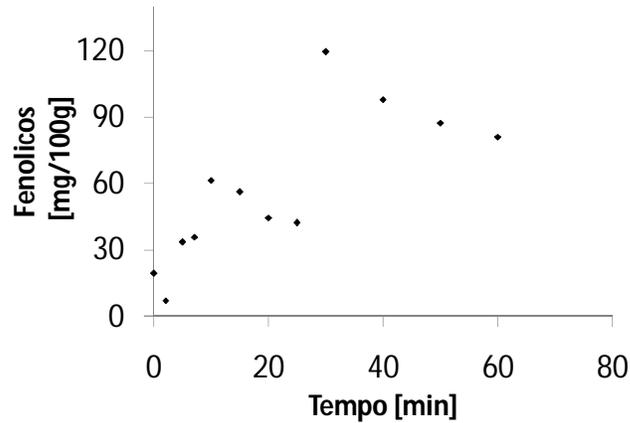


Figura 4.39 - Variação dos compostos fenólicos do resíduo de acerola em função do tempo.

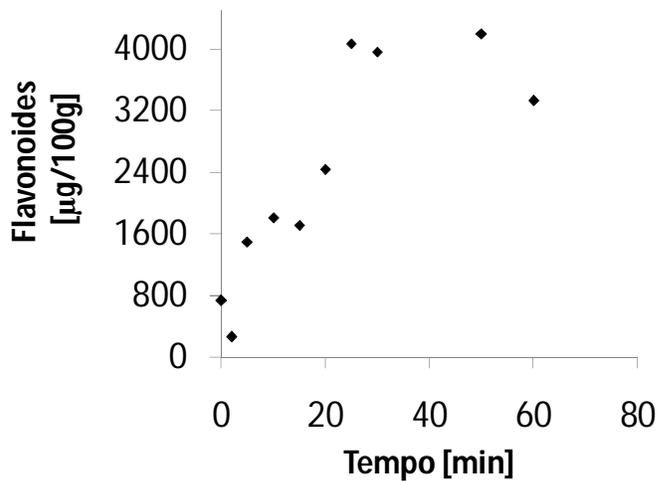


Figura 4.40 - Variação dos compostos flavonoides do resíduo de acerola em função do tempo.

Com relação ao teor de fenólicos totais, observou-se uma tendência em aumentar os teores, e após um determinado tempo de secagem uma redução em tais teores. Pode-se inferir que a mudança no comportamento das fibras possibilitou uma maior extração dos compostos fenólicos, e a partir de certo tempo, foi possível realmente quantificar a redução nos compostos. Chism e Haard (1996) relatam que os compostos fenólicos nas plantas, agem

como intermediários metabólicos e acumulam nos vacúolos, sendo liberados durante a secagem com a quebra de tais vacúolos.

Observando a Figura 4.40, que apresenta os teores dos compostos flavonoides no resíduo de acerola ao longo da secagem, observa-se o mesmo comportamento encontrado nos compostos fenólicos. Um aumento, seguido de uma redução nos teores.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Visando estudos futuros de secagem em leito de jorro para o reaproveitamento de resíduos de acerola, nesta dissertação foram estudados aspectos fundamentais, como a caracterização e a fluidodinâmica da mistura (com soja) e teores de compostos bioativos (fenólicos totais, flavonoides, ácido ascórbico e acidez).

Com relação aos teores dos compostos bioativos, pôde-se concluir que os teores presentes na acerola *in natura* são superiores aos encontrados na polpa vendida comercialmente e aos encontrados no resíduo agroindustrial de acerola. Ressalta-se ainda que a borra apresentou teores consideráveis de compostos fenólicos e flavonoides, o que justifica estudos para viabilizarem sua utilização.

No estudo da porosidade das misturas a diferentes alturas de leito estático ($H_0 = 6, 8$ e 9 cm), pôde-se concluir que em todas as alturas estudadas a porosidade aumenta com o aumento da fração mássica de resíduo de acerola.

Dentre os modelos de predição de porosidade para misturas estudadas, aqueles que melhor predisseram a porosidade experimental observada para a mistura de resíduo de acerola e soja, foram os modelos de Yu *et al.* (1996) e Yu *et al.* (1993). Tais modelos consideram a porosidade individual de cada componente da mistura e a interação entre as partículas.

Com relação ao ângulo de repouso estático e dinâmico das partículas, o ângulo de repouso da soja foi bem inferior quando comparado ao ângulo de repouso do resíduo de acerola, o que pode auxiliar a explicar a diferença na fluidodinâmica dos dois materiais. No estudo do ângulo de repouso do resíduo de acerola para diferentes umidades foi observado que a umidade não influenciou no valor obtido.

A fração mássica de resíduo de acerola, a altura de leito estático, o termo quadrático referente a altura de leito estático e a interação entre a altura e a fração mássica foram as variáveis significativas na análise estatística dos efeitos de variáveis sobre a vazão de mínimo jorro e a queda de pressão no mínimo jorro. Pode-se observar que à medida que se aumenta a fração mássica de semente de acerola na mistura, o valor da vazão de ar no jorro mínimo aumenta e a queda de pressão diminui diretamente com o aumento da fração de semente de acerola no leito.

Foi verificado experimentalmente que houve concentração de resíduo de acerola no topo do leite, sendo que tal concentração aumenta com o aumento do tempo de secagem devido às alterações da densidade do resíduo. Materiais menos densos, caem mais próximos à região de fonte.

Durante a secagem de uma mistura contendo 25% de resíduo de acerola numa altura de leite estático de 8 cm, os modelos de Page e de Overhults foram os que melhor predisseram a cinética de secagem.

Observando os teores dos compostos bioativos após a secagem de uma mistura com fração mássica de 0,40 de resíduo de acerola, numa altura de leite estático de 8 cm, foi possível observar um aumento no teor de ácido ascórbico. Com relação aos compostos fenólicos e flavonoides, foi observado um aumento até certo tempo de secagem, seguido de uma redução nos teores.

Mediante aos resultados obtidos neste trabalho, fica como sugestão para trabalhos futuros a investigação da fluidodinâmica e segregação da mistura para diferentes alturas de leite estático e frações mássicas e investigar a influência das variáveis de processo nos teores dos compostos bioativos através de um planejamento composto central.

Pode-se realizar um estudo semelhante para outras variedades de resíduo de frutas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOSTINI-COSTA, T. S., ABREU, L. N., ROSSETI, A. G. Efeito do congelamento e do tempo de estocagem da polpa de acerola sobre o teor de carotenóides, *Revista Brasileira de Fruticultura de Jaboticabal* v. 25, n. 1, p. 56-58, 2003.
- AGUADO, R.; OLAZAR, M.; SAN JOSE, M. J.; AGUIRRE, G.; BILBAO, J., Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor yields and product composition, *Industrial Engineering Chemistry Res.*, v. 39 n.6, p. 1925-1933, 2000.
- AHERNE, S.A., O'BRIEN, N.M. Dietary flavonols: chemistry, food content, and metabolism. *Nutrition* 18, 75–81, 2002.
- ALVES, P. S. P., ATAIDE, C. H. Caracterização física de resíduos de frutas oriundas da região do triângulo mineiro. IX Encontro interno e VIII Seminário de Iniciação Científica da Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- ALVES, R. E. Características das frutas para exportação. In: GORGATTI NETTO, A.; ARDITO, E. F. G.; GASRCIA, E. E. (Eds.) *Acerola para exportação: procedimentos de colheita e pós colheita*. Brasília: EMBRAPA-SPI, p. 9-12, Série Publicações técnicas FRUPEX, 21, 1996.
- ALVES, R. E.; MENEZES, J.B.; SILVA, S. de M. Colheita e pós-colheita da acerola. In: JOSÉ, A. R. S. & ALVES, R. R. (ed.). *Acerola no Brasil*. Vitória da Conquista: UESB, p.77 –89, 1995.
- ANDRADE, J. S.; GALEAZZI, M. A. M.; ARAGÃO, C. G.; CHAVES – FLORES, W. B. Valor nutricional do camu-camu [*Myrciariadubia* (H.B.K.) McVaugh] cultivado em terra firme da Amazônia central. *Revista Brasileira de Fruticultura, Cruz das Almas*, v. 13, n. 3, p. 307 – 311, 1991.
- ARAUJO, P. S. R. de; MINAMI, K. *Acerola*. Campinas: Fundação Cargill, 81p, 1994.
- ASENJO, C. F. *Acerola*. In: NAGY, S.; SHAW, P. E. *Tropical and subtropical fruits: composition, properties and uses*. Westport: AVI, p. 341 – 374, 1980.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. *Official methods of analysis*. 16.ed. AOAC, Washington, DC, 1995.
- BACELOS, M. S. Análise do comportamento da fluidodinâmica do leite de jorro com misturas de tamanho de partículas, Tese de Doutorado, PPGEQ/UFSCAR – São Carlos/SP, 113p, 2006.

- BARROZO, M. A. de S. Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamento, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1995.
- BEHLING, E.; SENDÃO, M.; FRANCESCATO, H. ANTINES, L.; BIANCHI, M. Flavonoide quercetina: Aspectos gerais e ações biológicas. Alimento e Nutrição. Araraquera, v. 15, n. 3, p. 285-292, 2004.
- BOBBIO, F.; BOBBIO P. introdução a química de alimentos. 2ed. São Paulo: Livrarias Varela, 1992.
- BOCCO, A.; CUVELIER, M. E.; RICHARD, H.; BERSET, C. Antioxidant activity and phenolic composition of citrus peel and seed extracts. Journal of Agricultural and Food Chemistry, Washington, v. 46, n. 6, p. 2123-2129, 1998.
- BROOKER, D. V.; BAKKER-ARKEMA. F. W.; HALL, C. W. Drying cereal grains. Westport: The Avi Publishing Company, 1974.
- CAETANO, A. A. S.; MELO, E. A.; LIMA, V. L. A. G.; MACIEL, M. I. S.; ARAUJO, C. R. Extração de antioxidantes de resíduos agroindustriais de acerola. Brazilian Journal of Food Technology, v. 12, n. 2, p. 155-160, abr/jun, 2009.
- CARPENTIERI-PÍPOLO, V.; PRETE, C.; G. A.; GONZALEZ, M. G. N.; POPPER, I. O., Novas cultivares de acerola (*Malpighia emarginata* dc). Revista Brasileira Fruticultura, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 124-126, 2002.
- CARRATU, E.; SANZINI, E. Sostanze biologicamente attive presenti negli alimenti di origine vegetable. Ann. Ist. Super Sanità, 41 (1), p.7-16, 2005.
- CARVALHO, R. I. N. de; MANICA, I. Influência de estágios de maturação e condições de armazenamento na concervação da acerola (*Malpighia glabra* L.). Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 29, n. 5, p. 677-680, 1994.
- CHAVES, M. da C.V; GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F. de A.C.; LEITE, J.C.A.; SILVA, F.L.H. Caracterização físico-química do suco de acerola. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 4, n. 2, 2º semestre 2004.
- CHISM, G. W., HAARD, N. F. Characteristics of edible plant tissues. In O. R. Fennema (Ed.), Food chemistry, 943–1011. New York: Marcel Dekker, Inc, 1996.
- CONCEIÇÃO FILHO, R. S. Recobrimento de sementes de soja com fertilizantes em leito de jorro. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, MG, 1997.

- CUNHA, F. G., Estudo da extração mecânica de bixina das sementes de urucum em leito de jorro. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.
- CUNHA, R.L.;MAIALLE, K.G. e MENEGALLI,F.C. Evaluation of the drying process in spouted bed and spout fluidized bed of xanthan gum: focus on product quality. PowderTecnology, v.107, n.3, p.234-242, 2000.
- DE STEFANI, E.,BOFFETTA, P., DENEOPELLEGRINI, H., MENDILAHARSU, M., CARZOGLIO, J.C., RONCO, A., OLIVERA, L. Dietary antioxidants and lung cancer risk: a case control study in Uruguay. Nutrition and Cancer 34, 100–110. *oplasms*. American Journal of Epidemiology 146, 223–230, 1999.
- DIAS, R. P., TEIXEIRA, J. A., MOTA, M. G., YELSHIN, A. I., particulate binary mixtures: dependence of packing porosity on particle size ratio, Industrial Engineering Chemistry Research, v. 43, p. 7912–7919, 2004.
- DORTA, E., LOBO, M. G.; GONZÁLEZ, M. Using drying treatments to stabilise mango peel and seed: Effect on antioxidant activity. LWT- Food Science and Technology, 45, 261-268, 2012.
- DUARTE, C.R. estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro, Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia– MG, 2006.
- DUZZIONI, A. G., FRANCO, A. G., DUZZIONI, M., SYLOS, C. M. Determinação da atividade e de constituintes bioativos em frutas cítricas. V. 21, n.4, p. 643-649, 2010.
- ERENTURK, S.; GULABOGLU, M.S.; GULTEKIN, S. The effects of cutting and drying medium on the vitamin C content of rosehips during drying. Journal of Food Engineering, 68, 513–518, 2005.
- FERREIRA, J. A.; ANDRADE, T. C. M.; MANCINI, M. C.; SCHEID, C. M. obtenção do concentrado de feijão em pó em leito de jorro bidimensional. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra, V. 22, 105-112, 2002.
- FINKERS, H. J., HOFFMANN, A. C., structural ratio for predicting the voidage of binary particle mixtures, AIChE Journal, v. 44, p. 495–498, 1998.
- FORTALEZA, J. M.; PEIXOTO, J. R.; JUNQUIERA, N. T. V.; OLIVEIRA, A. T.; RANGEL, L. E. P. Características físicas e químicas em nove genótipos de maracujá-azedo cultivado sob três níveis de adubação potássica. Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 124-127, 2005.

- FRIAS, J.M.; OLIVEIRA, J.C. Kinetic models of ascorbic acid thermal degradation during hot air drying of maltodextrin solutions. *Journal of Food Engineering*, 47, 255–262, 2001.
- GARCIA-CLOSAS, R., GONZALEZ, C.A., AGUDO, A., RIBOLI, E. Intake of specific carotenoids and flavonoids and the risk of gastric cancer in Spain. *Cancer Causes and Control* 10, 71–75, 1999.
- GHALAVAND, Y.; HATAMIPOUR, M. S.; RAHIMI, A. experimental and parametric study on drying of green peas in spouted bed. *International Journal of Food Science and Technology*, 2546-2552, 2010.
- GIESE, J. Developments in beverage additives. *Food Technology*, v. 49, n. 9, p. 64 – 72, 1995.
- GIOVANELLI, G.; PARADISO, A. Stability of dried and intermediate moisture tomato pulp during storage. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 7277–7281, 2002.
- GO, A., DAS, S. K.; SRZEDNICKI, G.; DRISCOLL, R. H. modeling of moisture and temperature changes of wheat during drying in a triangular spouted bed dryer. *Drying Technology*, 575-580, 2007.
- GOULA, A.M.; ADAMOPOULOS, K.G. Retention of ascorbic acid during drying of tomato halves and tomato pulp. *Drying Technology*, 24 (1), 57–64, 2006.
- GRACE, J.R., KUTLUOGLU, E., MURCHIE, K.W., CAVANAGH, P.H. Particle segregation in spouted beds, *Can. J. Chem. Eng.*, Vol. 61, p. 308–316, 1983.
- HANSULD, M. K., BRIANT, A. M. The effect of citric acid on selected edible starches and flours. *Journal of Food Science*, v. 19, p. 581-589, 1954.
- HATAMIPOUR, M. S.; MOWLA, D. experimental and theoretical investigation of drying of carrots in a fluidized bed with energy carrier. *Drying Technology*, Vol. 21, No. 1, pp. 83–101, 2003
- HERTOG, M.G., KROMHOUT, D., ARAVANIS, C., BLACKBURN, H., BUZINA, R., FIDANZA, F., GIAMPAOLI, S., JANSEN, A., MENOTTI, A., NEDELJKOVIC, S., PEKKARINEN, M., SIMIC, B.S., TOSHIMA, H., FESKENS, E.J.M., HOLLMAN, P.C.H., KATAN, M.B. Flavonoid intake and long-term risk of coronary heart disease and cancer in the seven countries study. *Archives of Internal Medicine* 155, 381–386, 1995.

- HERTOG, M.G.L., FESKENS, E.J.M., HOLLMANN, P.C.H., KATAN, M.B., KROMHOUT, D., Dietary antioxidant flavonoids and risk of coronary heart disease: the Zutphen Elderly Study. *Lancet* 342, 1007–1011, 1993.
- HERTOG, M.G.L., FESKENS, E.J.M., KROMHOUT, D., Antioxidant flavonols and coronary heart disease risk. *Lancet* 349, 699, 1997.
- HOLLMAN, P.C.H., Evidence for health benefits of plant phenols: local or systemic effects? *Journal of the Science of Food and Agriculture* 81, 842–852, 2001.
- ISHIKURA, T., NAGASHIMA, H., IDE, M., hydrodynamics of a spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles, *Powder Technology*, v. 131, p. 56–65, 2003.
- JING, S.; HU, Q. Y.; WANG, J. F.; JIN, Y., fluidization of coarse particles in gas-solid conical beds, *Chem. Eng. Process.*, vol. 39, p. 379-387, 2000.
- JOSLYN, M.A.; MILLER, J. Effect of sugars on oxidation of ascorbic acid: I. Kinetics of auto-oxidation of ascorbic acid. *Food Research*, 14, 325–339, 1949
- KERKHOFS, N.S.; LISTER, C.E.; SAVAGE, G.P. Change in colour and antioxidant content of tomato cultivars following forced-air drying. *Plant Foods for Human Nutrition*, 60, 117–121, 2005.
- KHRAISHEH, M.A.M.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Research International*, 37, 497–503, 2004.
- KIM, S.; LEE, K.W.; PARK, J.; LEE, H.J.; HWANG, I.K. Effect of drying in antioxidant activity and changes of ascorbic acid and colour by different drying and storage in Korean red pepper (*Capsicum annuum*, L.). *International Journal of Food Science and Technology*, 41 (Suppl. 1), 90–95, 2006.
- KNEKT, P., JÄRVINEN, R., SEPPÄNEN, R., HELLINVAARA, M., TEPPÖ, L., PUKKALA, E., AROMAA, A., Dietary flavonoids and risk of lung cancer and other malignant neoplasms. *American Journal of Epidemiology* 146, 223–230, 1997.
- KNEKT, P., JÄRVINEN, R., REUNANEN, A., MAATELA, J. Flavonoid intake and coronary mortality in Finland: a cohort study. *British Medical Journal* 312, 478–481, 1996.
- KRIS-ETHERTON, P.M., HECKER, K.D., BONANOME, A., COVAL, S.M., BINKOSKI, A.E., HILPERT, K.F., GRIEL, A.E., ETHERTON, T.D. Bioactive compounds in foods:

- their role in the prevention of cardiovascular disease and cancer. *The American Journal of Medicine* 113, 71S–88S, 2002.
- KUCHARSKI, J.; KMIĘC, A., hydrodynamics, heat and mass transfer during coating of tablets in a spouted bed, *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 61(3), p. 435-439, 1983.
- LAVELLI, V.; HIPPELI, S.; PERI, C.; ELSTNER, E.F. Evaluation of radical scavenging activity of fresh and air-dried tomatoes by three model reactions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 1999, 47, 3826–3831.
- LEE, H. S.; CHEN, C. S. Rates of vitamin C loss and discoloration in clear orange juice concentrate during storage at temperature of 4-24°C. *J. Agric. Food Chem.*, v. 46, p. 4723-4727, 1998.
- LEE, H. S.; COATES, G. A. Vitamin C in frozen, fresh squeezed, unpasteurized, polyethylene-bottled, orange juice: a storage study. *Food Chem.*, v. 65, p. 165-168, 1999.
- LEE, S. K., KADER, A. A. Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology* v. 20, P. 207–220, 2000.
- LIN, S.H.; AGALLOCO, J. Degradation kinetics of ascorbic acid. *Process Biochemistry*, 32, 22–24, 1979.
- LOURENÇO, R. O. Identificação e monitoramento de regimes em leite de jorro convencional. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, MG, 125 p., 2006.
- LUXIMON-RAMMA, A.; BAHORUN, T.; CROZIER, A. Antioxidant actions and phenolic and vitamin C contents of common Mauritian exotic fruits. *J. Sci. Food Agric.*, v. 83, n. 5, p. 496-502, 2003.
- MADHIYANON, T., SOPONRONNARIT, S. high temperature spouted bed paddy drying with varied downcomer air flows and moisture contents: effects on drying kinetics, critical moisture content, and milling quality. *Drying Technology*, 23, 473–495, 2005.
- MAKRIS, D. P., BOSKOU, G., & ANDRIKOPOULOS, N. K. Recovery of antioxidant phenolics from white vinification solid by-products employing water/ethanol mixtures. *Bioresource Technology*, 98, 2963–2967, 2007.
- MANICA, I.; CARVALHO, R. I. N. Acerola, pesquisa e extensão no Rio Grande do Sul. In: JOSÉ, A. R. S. & ALVES, R. R. (ed.). *Acerola no Brasil*. Vitória da Conquista: UESB, p.133 – 141, 1995.

- MAPSON, L. W. Vitamins in fruits. In: HULME, A. C. The biochemistry of fruits and their products. v. 1. Academic Press. P. 369-383. 1970.
- MARFIL, P.H.M.; SANTOS, E.M.; TELIS, V.R.N. Ascorbic acid degradation kinetics in tomatoes at different drying conditions. LWT – Food Science and Technology 2008.
- MARKOWSKI, A.; KAMINSKI, W., Hidrodinamic Characteristics of Jet-spouted Beds, Can. J. Chem. Eng., vol. 61, p. 377-381, 1983.
- MARMO, L. Low temperature drying of pomace in spout and spout-fluid beds Journal of Food Engineering 79, 1179–1190, 2007.
- MARNASIDOU, K. G.; VOUTETAKIS, S. S.; TJATJOPOULOS, G. J.; VASALOS, I. A., Catalytic partial oxidation of methane to synthesis gas in a pilot-plant-scale spouted bed reactor, Chem. Eng. Sci., vol. 54(15-16), p. 3691-3699, 1999.
- MARTINEZ-VALVERDE, I.; PERIAGO, M. J.; ROS, G. Significado nutricional de los compuestos fenólicos de la dieta. Archivos Latinoamericanos de Nutricion, v. 50, n. 1, p. 5 – 18, 2000.
- MASSARANI, G.; PASSOS, M. L.; BARRETO, D. W. Production of Annatto Concentrates in Spouted Beds. Canadian Journal of Chemical Engineering, 70, 954–959, 1992.
- MATHUR, K. B., GISHLER, N., A technique for contacting gases with coarse solid particles, A.I.Ch.E. Journal, v. 1, p. 157–164, 1955.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N., Spouted Beds, Academic Press Inc. LTD., New York, 304p., 1974.
- MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. Quality and physical structure of dehydrated starch-based system. Drying Technology, 15 (6–8), 1961–1971, 1997.
- MEDEIROS, M. F. D., SOUZA JR, F. E., DANTAS, T. N. P., ROCHA, S. C. S., SOUZA, J. S. Efeito das Condições de Processo na Secagem de Mistura de Polpas de Frutas Utilizando um Planejamento Fatorial Completo. Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, 2009.
- MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C. S.; ALSINA, O. L. S. ; JERONIMO, C. E. M.; MEDEIROS, U. K. L.; MATA, A. L. M. drying of pulps of tropical fruits in spouted bed effect o composition on dryer performance. Drying Technology, 20, 855–881 2002.
- MENEZES, M. L.; KUNZ, C. C.; PERINE, P. T. A.; BARROS, S. T. D. estudo da cinética de secagem do bagaço do maracujá. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009.

- MIELNIK, M. B.; OLSEN, E.; VOGT, G.; ADELIN, D.; SKREDE, G. Grape seed extract as antioxidant in cooked, cold stored turkey meat. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, London, v. 39, n. 3, p. 191-198, 2006.
- MILLER, C. D.; WENKAM, N. S.; FITTING, K. O. *Acerola: nutritive value and home use*. Hawaii Agricultural Experiment Station, Honolulu, 18 p, 1961.
- MOREIRA, M.F.P. *Secagem de gel Agar*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 104p, 2000.
- MORTOLA, V. B.; MEILI, L.; PINTO, L. A. A. análise das condições de secagem de cebola em pasta e gelatina em leito de jorro. XVII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica, 2003.
- MOTA, M., TEIXEIRA, J. A., BOWEN, W. R., YELSHIN, A., Binary spherical particle mixed beds: porosity and permeability relationship measurement. *Trans. Filtration Society*, v. 1, p. 101–106, 2001.
- NAGARAJU, V. D.; BHATTACHARYA, S. roasting green coffee beans using spouted bed roaster changes in physical characteristics. *Journal of Food Science and Technology*, v 47, 674-677, 2010.
- NEUHOUSER, M.L., Dietary flavonoids and cancer risk: evidence from human population studies. *Nutrition and Cancer* 50, 1–7, 2004.
- NICOLETI, J.F.; SILVEIRA JR. V.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V.R.N.T. Influence of drying conditions on ascorbic acid during convective drying of whole persimmons. *Drying Technology*, 25 (5), 891–899, 2007.
- OLAZAR, M.; SAN JOSE, M. J.; AGUAYO, A. T.; ARANTES, J. M.; BILBAO, J., stable operation conditions for gas-solid contact regimes in conical spouted beds, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 31, p. 1784-1793, 1992.
- OLIVEIRA, A. C.; VALENTIM, I. B.; SILVA, C. A.; BECHARA, E. J. H.; BARROS, M. P.; MANO, C. M.; GOULART, M. O. F. Total phenolic content and free radical scavenging activities of methanolic extract powders of tropical fruit residues. *Food Chemistry* 115 469–475, 2009.
- ORIKASA, T.; WU, L.; SHIINA, T.; TAGAWA, A. Drying characteristics of kiwi fruit during hot air drying. *Journal of Food Engineering*, 85, 303–308, 2008.

- OZGUR, M., OZCAN, T., AKPINAR-BAYIZIT, A. & YILMAZ-ERSAN, L. Functional compounds and antioxidant properties of dried green and red peppers. *African Journal of Agricultural Research*, 6 (25), 5638-5644, 2011.
- PASSOS, M. L.; OLIVEIRA, L. S.; FRANCA, A. S.; FREITAS, M. E. A.; MASSARANI, G.; BARROZO, M. A. S., Spouted Bed Units for Anatto Powder Production, *Inter-American Drying Conference*, Itu-SP, Brazil, vol. A, p. 181-1888, 1997.
- PASSOS, M. L.; TRINDADE, A. L. G.; ANGELO, J. V. H.; CARDOSO, M. Drying of Black Liquor in Spouted Bed of Inert Particles. *Drying Technology*, V. 22, No. 5, pp. 1041–1067, 2004.
- PASSOS, M.L.; MUJUMDAR, A.S. effect of cohesive forces on fluidized and spouted beds of wet particles, *Powder Technology*, v. 110, p. 222-238, 2000.
- PERAZZINI, H. SECAGEM DE RESÍDUOS CÍTRICOS EM SECADOR ROTATIVO. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, SP, 2011.
- PESCHEL, W.; SÁNCHEZ-RABANEDA, F.; DIEKMANN, W.; PLESCHER, A.; GARTZÍA, I.; JIMÉNEZ, D.; LAMUELA-RAVENTÓS, R.; BUXADERAS, S.; CODINA, C. An industrial approach in the search of natural antioxidants from vegetable and fruit wastes. *Food Chemistry*, v. 97, p. 137-150, 2005.
- PIETTA, P. G. Flavonoids as antioxidants, *Journal of Natural Products*, v. 63, p.1035-1042, 2000.
- PIRONE, B.N.; OCHOA, M.R.; KESSELER, A.G.; DE MICHELIS, A. Chemical characterization and evolution of ascorbic acid concentration during dehydration of rosehip (*Rosa eglanteria*) fruits. *American Journal of Food Technology*, 2 (5), 377–387, 2007.
- POZITANO, M.; ROCHA, S. C. S. Caracterização física e germinação de sementes de *Senna macranthera*. *Revista Brasileira de Sementes*, vol. 33, n. 4, p. 777-784, 2011.
- RAMALLO, L.A.; MASCHERONI, R.H. Prediction and determination of ascorbic acid content during pineapple drying. In *Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, Campinas- SP, Brazil, 22–25 August 2004; 1984–1991.
- RIBEIRO, E. A.; SERAVALLI, E. A. G. *Química de Alimentos*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. P.179-181, 2004.
- ROBARDS, K., ANTOLOVICH, M. Analytical chemistry of fruit bioflavonoids. *Analyst* 122, 11R–34R, 1997.

- ROBARDS, K.; PRENZLER, P. D.; TUCKER, G.; SWATSITANG, P.; GLOVER, W. Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits. *Food Chemistry*, v. 66, p. 401 – 436, 1999.
- ROBBINS, P. T., FRYER, P. J. The spouted-bed roasting of barley: development of a predictive model for moisture and temperature. *Journal of Food Engineering* v. 59, p. 199–208, 2003.
- ROSA, G.S.; MORAES, M.A.; OLIVEIRA, E.G.; PINTO, L.A.A. Secagem de *Spirulina Platensis*: viabilidade da técnica da técnica em leito de jorro VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2005.
- SANJINEZ-ARGANDONA, E.J.; CUNHA, R.L.; MENEGALLI, F.C.; HUBINGER, M.D. Evaluation of total carotenoids and ascorbic acid in osmotic pretreated guavas during convective drying. *Italian Journal of Food Science*, 17 (3), 305–314, 2005.
- SANTOS, D. A. “Contribuições ao estudo da fluidodinâmica em leito de jorro – estudos experimentais e de simulação via CFD” Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- SANTOS, K. G. aspectos fundamentais da pirólise de biomassa em leito de jorro: fluidodinâmica e cinética do processo. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- SANTOS, K. O., NETO, B. A. M., OLIVEIRA, S., RAMOS, M. E. C., AZEVEDO, L. C. Obtenção de farinha com o resíduo da acerola (*Maplpighia Glabra L.*). Congresso de pesquisa e Inovação da rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, 2010.
- SANTOS, P.H.S., SILVA, M. A., Retention of vitamin C in drying processes of fruits and vegetable – A Review. *Drying Technology*, v. 26, p. 1421-1437, 2008.
- SCALBERT, A., MANACH, C., MORAND, C., REMESY, C., JIMENEZ, L., Dietary polyphenols and the prevention of diseases. *Critical Review of Food Science and Nutrition* 45, 287–306, 2005.
- SEBRAE, 2009. Disponível em: <http://www.abanorte.com.br/noticias/noticias-principal/brasil-e-o-terceiro-maior-produtor-de-frutas-do-mundo/> acessado em 09 de novembro de 2012.
- SIGGE, G.O.; HANSMANN, C.; JOUBERT, E. Optimizing the dehydration conditions of green bell peppers (*Capsicum annum L.*): quality criteria. *Journal of Food Quality*, 22, 1999.

- SILVA, J.S.; CORRÊA, P.C. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: SILVA, J.S. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, p.21-37, 2000.
- SILVA, V. M. Estudo da secagem em leito fixo e de jorro do resíduo industrial do processamento de suco de frutas cítricas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.
- SOUZA, C. R. F. Estudo comparativo da produção de extrato seco de *bauhiniaforficata*. link pelos processos spray dryer e leito de jorro. Dissertação de Mestrado, 2003.
- SOUZA, J. S. “secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leito de jorro”. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2009.
- STANISTAWSKI, J. Drying of diced carrot in a combined microwave-fluidized bed dryer *Drying Technology*.v. 23: 1711 1721. 2005
- TORRES, E. R. Desenvolvimento de barra de cereais formuladas com ingredientes regionais. Universidade Tiradentes, Aracaju-SE, 2009.
- UEMAKI, O.; TSUJI, T., Gasification of a Sub-bituminous Coal in a Two-stage, Jetspouted Bed Reactor, in *Fluidization V: Proceedings of the Fifth Engineering*
- ULRICH, R. Organic acids. In: HULME, A. C. *The biochemistry of fruits and their products*. v. 1. Academic Press. p. 89 - 118. 1970.
- VENDRAMINI, A. L.; TRUGO, L. C. Chemical composition of acerola fruit (*Malpighia punicifolia* L.) at three stages of maturity. *Food Chemistry*, v. 71, p. 195 – 198, 2000.
- VIEIRA, G. N. A.; ALMEIDA, A. R. F.; FREIRE, J. T. planejamento fatorial 2² sobre parâmetros fluidodinâmicos de um leito de jorro em meia coluna. VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009.
- WOLFE, K.; WU, X.; LIU, R. H. Antioxidant activity of apple peels. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, Washington, v. 51, n. 3, p. 609-614, 2003.
- YAMASHITA, F., BENASSE, M. T., TONZAR, A. C. Produtos de acerola: estudos da estabilidade da vitamina C. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. Campinas, v. 23, n. 1, p. 92-94, 2003.
- YANG, C.S., LANDAU, J.M., HUANG, M., NEWMARK, H.L., Inhibition of carcinogenesis by dietary polyphenolic compounds. *Annual Review of Nutrition* 21, 381– 406, 2001.

- YOCHUM, L., KUSHI, L.H., MEYER, K., FOLSON, A.R., Dietary flavonoid intake and risk of cardiovascular disease in postmenopausal women. *American Journal of Epidemiology* 149, 943–949, 1999.
- YU, A. B., ZOU, R. P. & STANDISH, N. Modifying the linear packing model for predicting the porosity of non-spherical particle mixtures. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 35, 3730-3741, 1996.
- YU, A.B., STANDISH N., An analytical-parametric theory of the random packing of particles, *Powder Technology*, v. 55, p. 171–186, 1988.
- YU, D.; DAHEGREN, R.A. Evaluation of methods for measuring polyphenol in conifer foliage. *J. Chem. Ecology*, 26, 2119-2140, 2000.
- ZANONI, B.; PERI, C.; NANI, R.; LAVELLI, V. Oxidative heat damage of tomato halves as affected by drying. *Food Research International*, 31 (5), 395–401, 1999.
- ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. *Food Chem.*, v.64, p.555-559, 1999.
- ZOU, R., YU, A., Porosity calculation of mixtures of fibrous particles, *China Particuology*, v. 1, p. 27–32, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - AVALIAÇÃO DOS COMPOSTOS BIOATIVOS PARA O CAMU CAMU

O camu camu (*Myrciaria dubia*) é um fruto da região amazônica que vem despertando interesse na comunidade científica devido a sua elevada concentração de vitamina C.

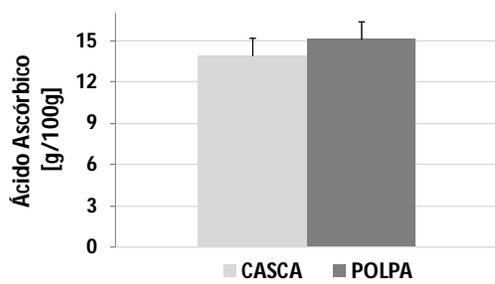
A polpa do camu-camu não é consumida *in natura*, devido à sua elevada acidez. O processamento do camu camu para obtenção do suco de frutas é uma alternativa para aumentar a sua conservação e o consumo. Em todos os casos, a casca deve ser acrescentada juntamente com a polpa succulenta da fruta, pois, esta concentra a maior parte de seus teores nutritivos e carrega sua atraente aparência de coloração vermelho-arroxeadada.

As amostras do camu-camu utilizadas nos experimentos foram colhidas em um sítio localizado no município de Panamá, Goiás. As análises foram realizadas com a polpa e casca das mesmas.

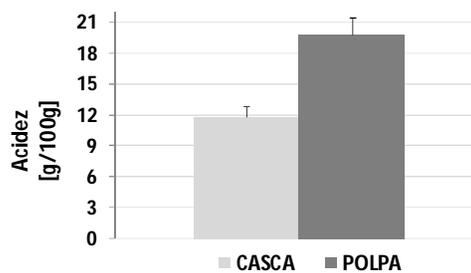
Os teores observados na polpa do camu camu foram: $171,01 \pm 17,09$ mg de fenólicos/100g, $0,98 \pm 0,09$ mg de flavonoides/100g, $15,09 \pm 1,28$ g de ácido ascórbico/100g e $19,80 \pm 1,63$ g de ácido cítrico/100g. Já os teores observados na casca foram: $210,77 \pm 7,85$ mg de fenólicos totais/100g, $2,27 \pm 2,27$ mg de flavonoides/100g, $19,8 \pm 1,63$ g de ácido ascórbico/100g e $11,77 \pm 1,10$ g de ácido cítrico/100g.

No que diz respeito aos compostos fenólicos e flavonoides, a casca é mais rica que a polpa da fruta, enquanto que nos teores de ácido ascórbico e acidez, a polpa é mais rica que a casca, apesar de que os teores encontrados na casca são muito atrativos, justificando o reuso desse resíduo que normalmente é descartado.

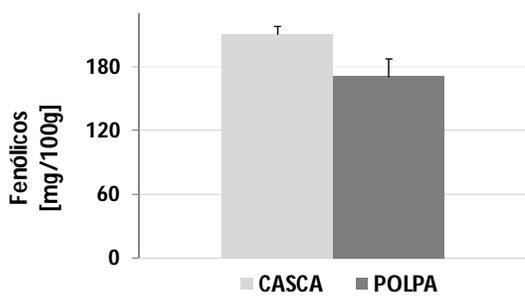
Pode-se melhor visualizar esses valores na Figura A1.1.



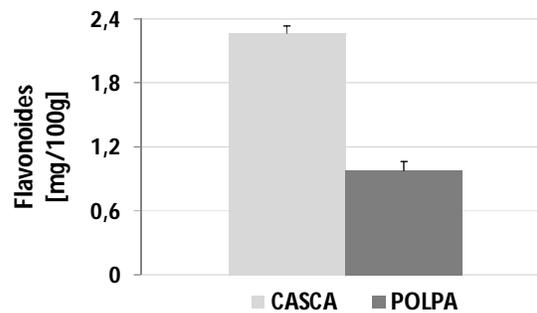
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura A1.1 Teores da casca e polpa do camu camu a) ácido ascórbico b) acidez c) fenólicos totais d) flavonoides.

APÊNDICE 2 – ANÁLISES DO RESÍDUO DE ACEROLA REALIZADAS PELO ITAL

Seguem as análises realizadas pelo ITAL (Instituto de Tecnologia de Alimentos) para o resíduo de acerola.

Determinação		Resultado	
Umidade e Voláteis (g/100g)		93,24 (0,05) a	
Cinzas (g/100g)		0,33 (0,01) a	
Lipídeos Totais (g/100g)		0,19 (0,00) a	
Proteínas (N*5,75) (g/100g)		0,65 (0,03) a	
Carboidratos (g/100g)		4,42 b	
Calorias (kcal/100g)		22 c	
Beta-caroteno (ug/100g)		1919 (71) a	
Vitamina A (UI/100g)		1066	
Fibra Alimentar Total (g/100g)		1,17 (0,04) a	
Sódio (g/100g)		2,5 (0,2) a	
Ácidos Graxos (g/100g)			
Saturados		0,07	
Monoinsaturados		0,04	
Poliinsaturados		0,03	
Ômega 3		0,01	
Ômega 6		0,02	
Trans-isômeros totais		<0,01	
N.I.		0,01	
Composição em Ácidos Graxos		% de Área	(g/100g) d
C12:0	láurico	0,72	<0,01
C14:0	mirístico	2,46	<0,01
N.I.		0,45	<0,01
C15:0	pentadecanóico	0,6	<0,01
C16:0	palmitico	33,28	0,06
N.I.		3,24	0,01
C17:0	margárico	0,85	<0,01
C18:0	esteárico	7,65	0,01
N.I.		2,07	<0,01
C18:1 ômega 9	oléico	24,35	0,04
C18:2 ômega 6	linoléico	13,14	0,02
C20:0	araquídico	0,88	<0,01
C18:3 ômega 3	alfa linolênico	6,48	0,01
C22:0	behênico	0,71	<0,01
N.I.		0,29	<0,01
C24:0	lignocérico	1,1	<0,01
N.I.		1,73	<0,01

UI = Unidade Internacional;

N.I. Não identificado

a – Média e estimativa de desvio padrão

b- Calculado por diferença

c – O valor calórico da amostra foi calculado pela soma das porcentagens de proteína e carboidratos multiplicados pelo fator 4(kcal/g) somado ao teor de lipídios totais multiplicados pelo fator 9 (kcal/g)

d- $\frac{\text{área}\% \text{lipídeos}}{100} \times F$ de conversão (F=0,956). Limite de detecção do método = 0,01g/100g

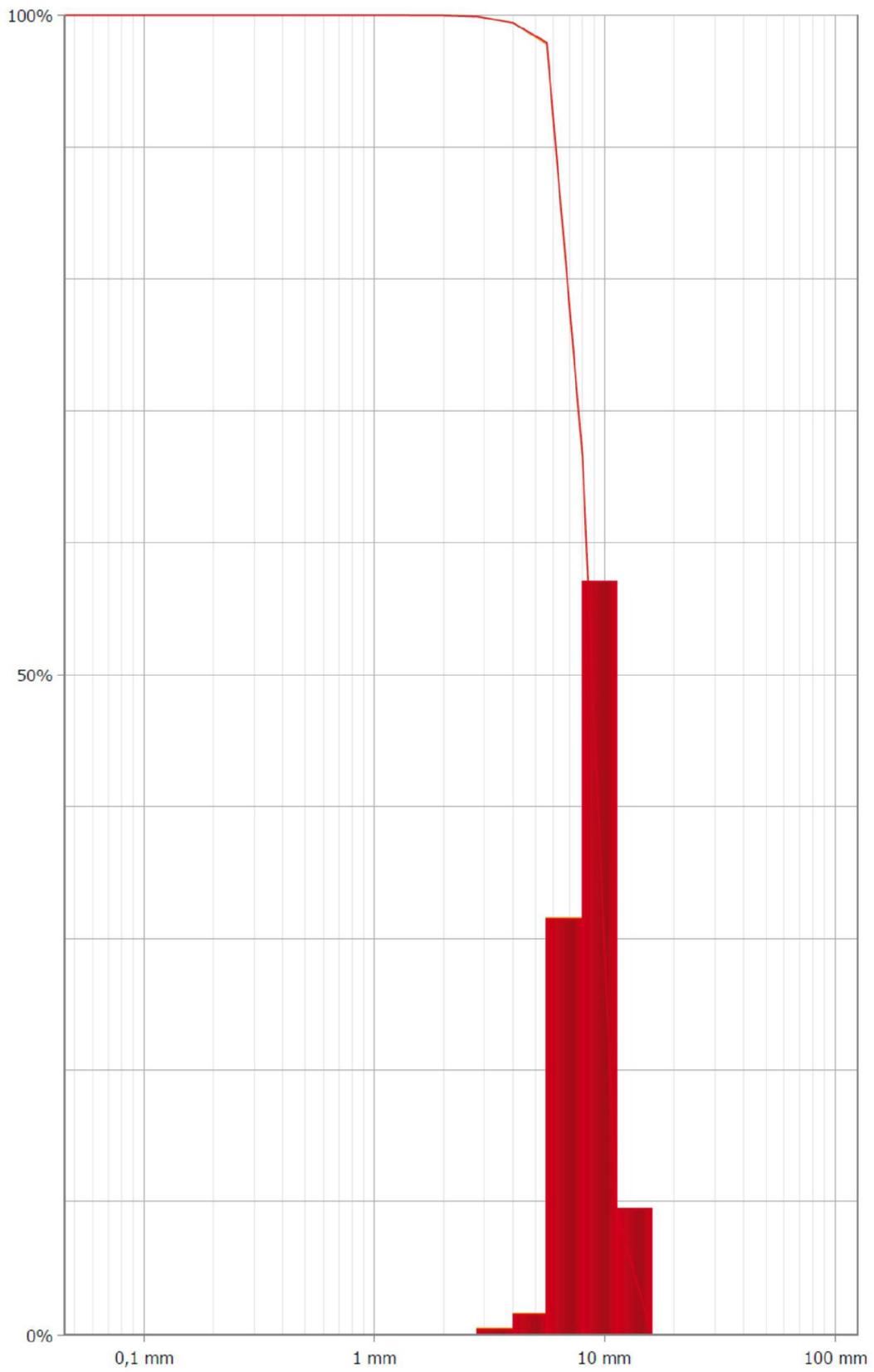
APÊNDICE 3 – CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE ACEROLA

Seguem as análises realizadas através de um analisador foto-optico de partículas (HAVER-CPA- 2-1), realizadas pela HAVER&BOECKER.

Análises referentes à uma hora de estufa:

	Bagaço Acerola 1H_teste3.han	Bagaço Acerola 1H_teste1.han
Filename	Bagaço Acerola 1H_teste3.han	Bagaço Acerola 1H_teste1.han
Start of measure	22/12/2011 11:43:48	22/12/2011 11:37:39
Description	Bagaço Acerola - 1h	Bagaço Acerola - 1H de Estufa
Particle count (total)	889	904
d5 [mm]	6,195	6,241
d50 [mm]	8,722	8,762
d95 [mm]	13,235	11,962
Uniformity index	56,4	56,2
Size guide number	872,2	876,2
Dispersion number	3,006	3,006
Specific surface [cm ² /cm ³]	7,066	7,096
Mean circularity	0,684	0,682
Mean symmetry	0,757	0,744
Asymmetric Fraction [%]	0	0
Symmetry min.		
Symmetry max.		

x [mm]	Bagaço Acerola 1H_teste3.han		Bagaço Acerola 1H_teste1.han	
	1-Q ₃ [V%]	ΔQ ₃ [V%]	1-Q ₃ [V%]	ΔQ ₃ [V%]
125				
90	0		0	
63	0	0	0	0
45	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0
22,4	0	0	0	0
16	0	0	0	0
11,2	9,49	9,49	9,26	9,26
8	66,51	57,03	66,32	57,05
5,6	97,95	31,44	97,83	31,52
4	99,43	1,48	99,42	1,59
2,8	99,89	0,45	99,92	0,5
2	99,99	0,1	99,98	0,06
1,4	100	0,01	100	0,02
1	100	0	100	0
0,71	100	0	100	0
0,5	100	0	100	0
0,355	100	0	100	0
0,25	100	0	100	0
0,18	100	0	100	0
0,125	100	0	100	0
0,09	100	0	100	0
0,063	100	0	100	0
0,045	100	0	100	0
< 0,045		0		0



Análises referentes a duas horas de estufa:

	Bagaço Acerola 2H_teste2.han	Bagaço Acerola 2H_teste4.han	Bagaço Acerola 2H_teste5.han
Filename	Bagaço Acerola 2H_teste2.han	Bagaço Acerola 2H_teste4.han	Bagaço Acerola 2H_teste5.han
Start of measure	22/12/2011 11:06:33	22/12/2011 11:21:10	22/12/2011 11:24:18
Description	Bagaço Acerola - 2h	Bagaço Acerola - 2h	Bagaço Acerola - 2h
Particle count (total)	802	956	981
d5 [mm]	5,602	5,607	5,531
d50 [mm]	8,409	8,393	8,481
d95 [mm]	11,371	12,331	13,594
Uniformity index	51,9	51,5	46,7
Size guide number	840,9	839,3	848,1
Dispersion number	3,016	3,019	3,021
Specific surface [cm ² /cm ³]	7,467	7,451	7,4
Mean circularity	0,664	0,683	0,686
Mean symmetry	0,726	0,736	0,734
Asymmetric Fraction [%]	0	0	0
Symmetry min.			
Symmetry max.			

x [mm]	Bagaço Acerola 2H_teste2.han		Bagaço Acerola 2H_teste4.han		Bagaço Acerola 2H_teste5.han	
	1-Q ₃ [V%]	ΔQ ₃ [V%]	1-Q ₃ [V%]	ΔQ ₃ [V%]	1-Q ₃ [V%]	ΔQ ₃ [V%]
125						
90	0		0		0	
63	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0
31,5	0	0	0	0	0	0
22,4	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0
11,2	6,19	6,19	7,68	7,68	10,91	10,91
8	59,61	53,42	58,57	50,9	63,83	52,92
5,6	95,12	35,51	95,06	36,49	94,79	30,96
4	98,58	3,46	98,37	3,3	98,42	3,62
2,8	99,78	1,2	99,59	1,22	99,6	1,18
2	99,94	0,16	99,9	0,31	99,93	0,33
1,4	99,99	0,05	99,98	0,07	99,98	0,05
1	100	0,01	99,99	0,02	99,99	0,01
0,71	100	0	100	0,01	100	0
0,5	100	0	100	0	100	0
0,355	100	0	100	0	100	0
0,25	100	0	100	0	100	0
0,18	100	0	100	0	100	0
0,125	100	0	100	0	100	0
0,09	100	0	100	0	100	0
0,063	100	0	100	0	100	0
0,045	100	0	100	0	100	0
< 0,045		0		0		0

