



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



**DESIDRATAÇÃO DE RESÍDUO DE ACEROLA EM LEITO DE JORRO:
EFEITOS DE PRÉ-TRATAMENTOS E FLUIDODINÂMICA**

RENATA NEPOMUCENO DA CUNHA

Uberlândia – MG

2015



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Química
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DESIDRATAÇÃO DE RESÍDUO DE ACEROLA EM LEITO DE JORRO: EFEITOS DE PRÉ-TRATAMENTOS E FLUIDODINÂMICA

Renata Nepomuceno da Cunha

Orientadores:

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo

Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Química da Universidade Federal
de Uberlândia como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de Doutor em
Engenharia Química

Uberlândia – MG

2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

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

C972d Cunha, Renata Nepomuceno da, 1969-
2015 Desidratação de resíduo de acerola em leite de jorro: efeitos de pré-
tratamentos e fluidodinâmica / Renata Nepomuceno da Cunha. - 2015.
2015 f. : il.

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

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

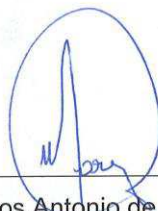
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Separação (Tecnologia) - Teses. 3. Acerola - Secagem - Teses. I. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. II. Duarte, Cláudio Roberto, 1975- III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

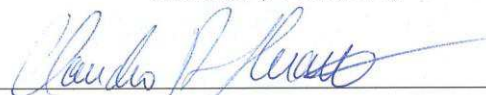
CDU: 66.0

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE DOUTOR EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 30 DE NOVEMBRO DE 2015.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte
PPGEQ/UFU



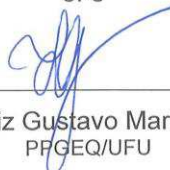
Prof. Dr. Manoel Marcelo do Prado
DEQ/UFS



Prof. Dr. José Luiz Vieira Neto
ICTE/UFTM



Dra. Glaucia de Fatima Moreira Vieira e Souza
UFU



Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira
PPGEQ/UFU

DEDICATÓRIA

Às minhas filhas Júlia e Daniela.

Ao meu esposo, Fernando.

À minha mãe, Teresinha (em memória) e à minha irmã Fabiana.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho não teria sido concluído sem a colaboração de algumas pessoas. Portanto, aproveito a oportunidade para agradecer àqueles que estiveram presentes nesta jornada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo pelo apoio, incentivo e conhecimentos repassados. Obrigada por tudo, principalmente pela confiança.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Cláudio Roberto Duarte que colaborou muito para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço de modo especial ao meu esposo Fernando Corrêa de Mello Júnior, que de todos os modos possíveis e impossíveis, contribuiu sempre com muito carinho e compreensão para o desenvolvimento deste trabalho.

Às minhas filhas Júlia e Daniela que souberam compreender as minhas ausências nos momentos de necessidade e que sempre estiveram ao meu lado, dando amor e carinho. À minha irmã Fabiana, pelo carinho e amizade.

Ao PPGEQ/UFU pela oportunidade de desenvolver este projeto, bem como a formação concedida nesses quatro anos. À secretaria do PPGEQ/UFU, principalmente à servidora Cecília que sempre foi muito educada e prestativa em todos os momentos necessários.

Ao Centro Universitário de Patos de Minas pela disponibilidade de uso do Laboratório de Bromatologia para desenvolvimento das análises de proteínas.

À Kássia Santos pela colaboração no desenvolvimento das simulações numéricas realizadas. Com você aprendi muito sobre essa área.

À técnica Franciele do Laboratório Multiusuário de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, que colaborou muito na realização das análises de microscopia.

Ao CNPq, à CAPES, à FAPEMIG e à FAPEMAT pelo apoio financeiro concedido durante a pós.

Aos alunos de iniciação científica: Renata, Ana Vitória, Taynara, Lucas e Otávio. Com vocês aprendi muito e espero ter contribuído um pouco para o sucesso de todos.

Aos meus amigos de laboratório desde o início do curso: Natasha, Angélica, Diogo, Priscila, Dyrney e Gláucia. Muito obrigada a todos vocês pela compreensão na escala de uso do laboratório e pelos conhecimentos compartilhados.

SUMÁRIO

<i>CAPÍTULO 1-INTRODUÇÃO</i>	1
<i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i>	5
2.1 A acerola	5
2.2 Compostos bioativos.....	7
2.2.1 O ácido ascórbico.....	7
2.2.2 O ácido cítrico	10
2.2.3 Os fenólicos totais	11
2.2.4 Os flavonoides	14
2.3 Composição nutricional	15
2.3.1 Cinzas	15
2.3.2. Proteínas.....	16
2.3.3 Extrato etéreo (lipídios)	16
2.3.4 Fibra.....	17
2.4 Os resíduos de acerola	18
2.5 A secagem de resíduos agroindustriais	21
2.6 A secagem precedida por pré-tratamentos.....	24
2.7. O leito de jorro e a secagem.....	28
2.7.1 Curva característica	29
2.8. Estudo fluidodinâmico	31
2.8.1.Parâmetros avaliados.....	31
2.8.2. A modelagem e a simulação computacional	35
2.8.2.1.Modelos de forças de contato	38
<i>CAPÍTULO 3-CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA E FÍSICA DOS MATERIAIS</i>	46
3.1 Material e métodos	46
3.1.1 Materiais.....	46
3.1.2 Umidade	47
3.1.3 Massa específica real	48
3.1.4 Massa específica aparente dos materiais.....	48
3.1.5 Diâmetro da partícula	48
3.1.6 Esfericidade	48
3.1.7 Ângulo de repouso estático (φ)	48
3.1.8 Ângulo de repouso dinâmico(ϕ)	49
3.1.9 Análise dos compostos.....	49

3.1.9.2 Determinação da acidez titulável total.....	50
3.1.9.2 Determinação de ácido ascórbico.....	50
3.1.9.3 Determinação de compostos fenólicos totais	50
3.1.9.4 Determinação de compostos flavonoides totais	51
3.1.10 Composição nutricional	51
3.1.10.1 Ccinzas	51
3.1.10.2 Proteínas.....	51
3.1.10.3 Extrato etéreo (lipídios).....	52
3.1.10.4 Fibras	52
3.1.11 Microscopia eletrônica de varredura (mev).....	52
3.2 Resultados e discussões	53
3.2.1 Caracterização química do resíduo de acerola	53
3.2.2 Composição química nutricional do resíduo de acerola	54
3.2.3 A caracterização física do resíduo de acerola e da soja.....	56
3.2.3.1 Avaliação experimental dos ângulos de repouso dinâmico do resíduo de acerola e da soja	57
3.2.3.2 Avaliação experimental do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola e da soja	60
 CAPÍTULO 4 -A SECAGEM DE RESÍDUO DE ACEROLA EM LEITO DE JORRO E OS PRÉ-TRATAMENTOS	63
4.1 Metodologias experimentais desenvolvidas	63
4.1.1 A unidade experimental.....	63
4.1.2 Avaliação experimental da porosidade do leito estático (empacotamento do leito).....	64
4.1.3 Segregação axial da mistura	65
4.1.4 A secagem em leito de jorro sem o pré-tratamento.....	65
4.1.5 Os pré-tratamentos	66
4.1.5.1 Pré-tratamento com ultrassom utilizando água como meio de imersão	66
4.1.5.2 Pré-tratamento com ultrassom utilizando etanol como meio de imersão	67
4.1.5.3 Pré-tratamento com pulverização de etanol	67
4.2 Resultados e discussões	68
4.2.1 A porosidade do leito.....	68
4.2.2 A secagem de resíduo de acerola em leito de jorro utilizando soja como material inerte	69
4.2.3 Avaliações de pré-tratamentos na secagem de resíduo de acerola.....	73
4.2.3.1Pré-tratamento ultrassônico em meio aquoso.....	73
4.2.3.2 Pré-tratamento ultrassônico em meio etanólico	80
4.2.3.3. Pré-tratamento com pulverização de etanol	89

4.2.4 Avaliação morfológica do resíduo de acerola por microscopia eletrônica de varredura.....	111
--	-----

CAPÍTULO 5-SIMULAÇÕES NUMÉRICAS PARA ESTUDO DE PARÂMETROS FLUIDODINÂMICOS.....	118
--	-----

5.1 Avaliações numéricas desenvolvidas.....	118
---	-----

5.1.1 Simulação computacional pelo método dos elementos discretos.....	118
--	-----

5.1.2. Simulações computacionais na análise do ângulo de repouso dinâmico	122
---	-----

5.1.3 Simulações computacionais na análise do ângulo de repouso estático.....	123
---	-----

5.1.4 Simulações computacionais na análise da porosidade do leito estático (empacotamento).....	123
---	-----

5.2 Resultados e discussões.....	123
----------------------------------	-----

5.2.1 Simulações numéricas adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola	123
--	-----

5.2.2 Simulação numérica adotada na análise do ângulo de repouso dinâmico da soja	128
---	-----

5.2.3 Simulação numérica adotada na análise do ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por soja e acerola a 50%.....	131
--	-----

5.2.4 Simulações na análise do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola.....	135
--	-----

5.2.5 Simulações numéricas adotadas na análise do ângulo de repouso estático da soja	139
--	-----

5.2.6 Avaliação numérica da porosidade do leito estático (empacotamento do leito) composto por resíduo de acerola.....	144
--	-----

5.2.7 Avaliação numérica da porosidade do leito estático (empacotamento do leito) composto por soja	147
---	-----

5.2.8 Avaliação numérica para a porosidade do leito estático constituído por mistura de soja e resíduo de acerola.....	149
--	-----

CONCLUSÕES.....	152
-----------------	-----

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	156
---------------------------------------	-----

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	157
---------------------------------	-----

APÊNDICES.....	175
----------------	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Imagem fotográfica da acerola	6
Figura 2.2 - Oxidação do ácido ascórbico em dehidroascórbico.....	9
Figura 2.3- Formas isoméricas do ácido ascórbico.	9
Figura 2.4 - Fórmula estrutural do ácido cítrico.....	10
Figura 2.5 - Estrutura química dos flavonoides.....	14
Figura 2.6- Estrutura das principais classes de flavonoides.	15
Figura 2.7- Representação esquemática das regiões no leito de jorro.....	29
Figura 2.8-Curva típica de queda de pressão em função da vazão de fluido, denominada de curva característica.	30
Figura 2.9-Processo de formação do jorro estável para a mistura constituída de 25% de resíduo de acerola e 75% de soja.	32
Figura 2.10-Medidas do ângulo de repouso (a. Ângulo de repouso, b. Ângulo de repouso drenado e c. Ângulo de repouso dinâmico).	34
Figura 2.11 - Esquema representativo de forças atuando sobre a partícula i.	38
Figura 2.12 - Representação esquemática do modelo de forças do tipo mola-amortecedor. ...	39
Figura 2.13 - Representação simplificada entre duas partículas esféricas.	44
Figura 2.14 - Esquema representativo do contato elástico entre duas partículas esféricas.	44
Figura 3.1 - Imagens dos materiais utilizados no presente estudo (a) resíduo de acerola (b) grãos de soja.	47
Figura 3.2 - Esquema ilustrativo do secador infravermelho.....	47
Figura 3.3 - Imagem ilustrativa do ângulo de repouso estático de sementes de acerola.	48
Figura 3.4 - Aparato experimental utilizado na determinação do ângulo de repouso dinâmico.	49
Figura 3.5 - Esquema ilustrativo para determinação do ângulo de repouso dinâmico.....	49
Figura 3.6 - Avaliação qualitativa do ângulo de repouso dinâmico (a) resíduo de acerola (b) mistura constituída a 50% e (c) soja.....	59
Figura 3.7 - Avaliação do efeito da (a) velocidade de rotação e da (b) fração de acerola sobre o ângulo de repouso dinâmico da mistura soja/resíduo de acerola.	59
Figura 3.8 - Avaliação qualitativa do ângulo de repouso estático (a) do resíduo de acerola e (b) da soja.	61

Figura 4.1 - 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.	64
Figura 4.2 - Avaliação fluidodinâmica da secagem em leito de jorro (sem pré-tratamento) por meio do índice de mistura.	72
Figura 4.3- Percentual de redução da umidade em função do tempo de sonicação parametrizado na potência aplicada.	73
Figura 4.4 -Desvio percentual da acidez em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.	75
Figura 4.5- Desvio percentual dos teores de ácido ascórbico em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.....	76
Figura 4.6 - Desvio percentual dos teores de fenólicos em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.	78
Figura 4.7 - Desvio percentual dos teores de flavonoides em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.	79
Figura 4.8- Índice de mistura em função da altura de leito estático, parametrizado na potência aplicada.....	80
Figura 4.9- Avaliação da redução da umidade proveniente da secagem precedida por ultrassom em meio etanólico.....	82
Figura 4.10 - Avaliação do desvio de acidez proveniente da secagem precedida por ultrassom em meio etanólico.	83
Figura 4.11- Avaliação dos desvios de ácido ascórbico provenientes das secagens precedidas por ultrassom em meio etanólico.	84
Figura 4.12 - Avaliação dos desvios de fenólicos totais provenientes das secagens precedidas por ultrassom em meio etanólico.	86
Figura 4.13-Avaliação dos desvios de flavonoides totais provenientes das secagens precedidas por ultrassom em meio etanólico.	87
Figura 4.14-Avaliação fluidodinâmica da mistura resíduo de acerola e soja em leito de jorro, submetida a tratamento prévio de sonicação em meio etanólico.	88
Figura 4.15 - Redução da umidade (%) para diferentes condições operacionais de temperatura e q/q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.	90
Figura 4.16 -Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre a umidade resultante da secagem precedida pela pulverização de etanol.	91

Figura 4.17 - Superfície de resposta ajustada à umidade em função da temperatura e da vazão de ar, para a pulverização de 0,520 ml de etanol/g resíduo.	93
Figura 4.18-Variações dos teores de acidez para diferentes condições operacionais de temperatura e q/q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.....	93
Figura 4. 19- Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de ácido cítrico resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.	94
Figura 4. 20- Superfície de resposta ajustada à acidez em função da temperatura e do volume de etanol, para uma vazão de entrada de ar fixa em 15% acima do jorro mínimo.	96
Figura 4.21 - Superfície de resposta ajusta à acidez em função do volume de etanol e da vazão de entrada de ar, à temperatura constante de 60°C.	96
Figura 4.22 - Variações dos teores de ácido ascórbico para diferentes condições operacionais de temperatura e q/q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.....	97
Figura 4.23- Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de ácido ascórbico resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.	98
Figura 4.24 - Superfície de resposta ajustada aos teores de ácido ascórbico em função da temperatura e do volume de etanol pulverizado, a uma vazão de ar 15% acima do jorro mínimo.	99
Figura 4.25 - Superfície de resposta ajustada aos teores de ácido ascórbico em função da temperatura e da vazão de entrada de ar, para um volume de fixo de etanol pulverizado (0,520 ml etanol/g resíduo).	100
Figura 4.26 - Variações dos teores de fenólicos totais para diferentes condições operacionais de temperatura e q/q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.....	101
Figura 4.27 - Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de fenólicos totais resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.	102
Figura 4.28 - Superfície de resposta ajustada aos teores de fenólicos totais em função da temperatura e do volume de etanol, a uma vazão de ar fixa em 15% acima do jorro mínimo.	103
Figura 4.29 - Variações dos teores de flavonoides para diferentes condições operacionais de temperatura e q/q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.....	103

Figura 4.30- Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de flavonoides totais resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.....	104
Figura 4.31-Superfície de resposta ajustada aos teores de flavonoides em função da temperatura e da vazão de entrada de ar, para o volume de etanol fixo em 0,520 ml/g resíduo	105
Figura 4.32 - Superfície de resposta ajustada aos teores de flavonoides em função do volume de etanol e da vazão de entrada de ar, para a temperatura fixa a 60°C.....	106
Figura 4.33 - Variações dos teores de proteínas para diferentes condições operacionais de temperatura e q/q _{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.....	107
Figura 4.34 - Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de proteínas resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol	108
Figura 4.35 - Superfície de resposta ajustada aos teores de proteínas em função da temperatura e do volume de etanol, para a vazão de entrada de ar fixa em 15% acima do jorro mínimo.	109
Figura 4.36 - Superfície de resposta ajustada aos teores de proteínas em função da vazão de entrada de ar e do volume de etanol, para a temperatura fixa em 60°C.....	109
Figura 4.37 - Avaliação da segregação para ensaios realizados com tratamento prévio de pulverização de etanol.....	110
Figura 4.38- Fotomicrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura para o resíduo de acerola <i>in natura</i> nas ampliações de (a) 36x, (b) 1000x, (c) 130x e (d) 1000x	111
Figura 4.39- Fotomicrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura para condições distintas de secagem em leito de jorro (a) e (b) 60°C, nas ampliações de 36 e 130x, respectivamente e (c) e (d) a 40°C, nas ampliações de 36x e 130x.	112
Figura 4.40-Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de amostras de sementes de acerola submetida à sonicação em meio aquoso por 10 min, à potência de 80 w, nas ampliações de (a) 1000x, (b) 130x, (c) 36x e (d) 130x.	113
Figura 4.41 - Fotomicrografias provenientes da secagem (a) 30 min de ultrassom e (b) 50 min de ultrassom em meio aquoso, na ampliação de 130x.....	114
Figura 4.42 - Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de resíduo de acerola submetido a ultrassonicação em meio etanólico, antes da secagem	

(condição experimental: tratamento 2) (a) 130x (b) 130x, (c) 130x e (d) 26x.	115
Figura 4.43 - Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de resíduo de acerola submetido a ultrassonicação em meio etanólico, após a secagem	116
Figura 4.44 - Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de resíduo de acerola imerso por 10 min em etanol comercial, nas ampliações de (a) 36x, (b)130x, (c) 1000x e (d) 1000x.	117
Figura 5.1 - Representação da partícula por meio de coleção de esferas.	119
Figura 5.2 - Fotomicrografias da semente de acerola e da soja obtidas pelo mev e respectivas imagens adotadas nas simulações.	119
Figura 5.3 - Ângulo de repouso dinâmico da semente de acerola (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.	125
Figura 5.4 - Superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico simulado para o resíduo de acerola em função dos atritos estático e rolamento, mantidos fixos no ponto central os demais parâmetros.	127
Figura 5.5 - Ângulo de repouso dinâmico da soja (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.	129
Figura 5.6 - Superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico simulado para a soja em função do atrito estático e de rolamento, mantidos fixos no ponto central os demais parâmetros.	130
Figura 5.7 - Ângulo de repouso dinâmico da mistura resíduo de acerola e soja (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.	133
Figura 5.8 - Superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico simulado para a mistura constituída por soja e resíduo de acerola.	134
Figura 5.9 - Ângulo de repouso estático para o resíduo de acerola (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.	137
Figura 5.10 - Superfície de resposta ajustadas ao ângulo de repouso estático simulado para o resíduo de acerola.	139

Figura 5.11 - Ângulo de repouso estático para a soja (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.....	141
Figura 5.12 - Superfícies de resposta ajustadas ao ângulo de repouso estático simulado para a soja.	143
Figura 5.13 - Superfície de resposta ajustada à porosidade do leito estático constituído por resíduo de acerola.	146
Figura 5.14 - Superfícies de respostas ajustadas à porosidade de leito estático constituído por soja.	149
Figura 5.15- Avaliação comparativa entre a porosidade de leito estático simulada e experimental, para diversas frações de acerola.....	150
Figura 5.16 - Avaliação do efeito da altura de leito estático sobre a porosidade do leito constituído por diversas frações de acerola.	151
Figura 5.17 - Avaliação qualitativa do comportamento da porosidade frente a distintas frações de acerola.	151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Valores médios de vitamina c de acerolas, segundo diferentes autores.....	7
Tabela 2.2 - Composição química da acerola.....	8
Tabela 2.3 - Classe de compostos fenólicos presentes nas plantas.	12
Tabela 2.4 - Composição química e valor nutricional da farinha de sementes de acerolas.	20
Tabela 2.5 - Composição de minerais em sementes de acerola obtidas por aguiar et al. (2010).	20
Tabela 2.6 - Parâmetros de entrada para os materiais da partícula e da parede.	42
Tabela 2.7 - Parâmetros de entrada para as interações entre partículas e partícula parede.	42
Tabela 2.8 - Parâmetros utilizados nos modelos dem em vários trabalhos da literatura (silvério, 2012).	43
Tabela 3.1 - Características químicas do resíduo de acerola <i>in natura</i>	53
Tabela 3.2 - Composição química nutricional do resíduo de acerola.....	55
Tabela 3.3 - Características físicas do resíduo de acerola e da soja.	57
Tabela 3.4- Ângulos de repouso dinâmico dos resíduos de acerola, da soja e da mistura de composição 50% em massa.....	58
Tabela 3.5 - Análise de variância (anova) para a variável resposta o ângulo de repouso dinâmico da mistura.	60
Tabela 3.6 - Medidas do ângulo de repouso estático para os resíduos de acerola e a soja.....	60
Tabela 3.7 - Comportamento de escoabilidade de sólidos.	61
Tabela 4.1 - Características dimensionais do leito de jorro.....	63
Tabela 4.2 - Variáveis codificadas aplicadas ao planejamento central composto.....	66
Tabela 4.3 - Descrição detalhada das características dos banhos ultrassônicos.....	67
Tabela 4.4 - Codificação das variáveis utilizadas no planejamento fatorial.	67
Tabela 4.5 - Codificação das variáveis adotadas no planejamento central composto aplicado aos ensaios com pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.....	68
Tabela 4.6 - Porosidade para difentes frações de acerola na altura de leito estático de 0,08 m.	69
Tabela 4.7 - Caracterização do resíduo <i>in natura</i>	70
Tabela 4.8 - Avaliação das variáveis operacionais e da qualidade nutricional da acerola após a secagem ($\alpha=1,287$).	70

Tabela 4.9 - Avaliação do ultrassom em meio etanólico sobre a desidratação do resíduo de acerola submetido à secagem	81
Tabela 4.10 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de ácido cítrico resultantes de secagens precedidas por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).....	83
Tabela 4.11 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de ácido ascórbico resultantes dos ensaios de secagem precedidos por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).	85
Tabela 4.12 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de fenólicos totais resultantes dos ensaios de secagem precedidos por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).	85
Tabela 4.13 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de flavonoides resultantes dos ensaios de secagem precedidos por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).	87
Tabela 4.14 - Estudo comparativo para validação do efeito ultrassônico.	88
Tabela 4.15 - Avaliação da secagem e da composição nutricional para os resíduos submetidos à pulverização de etanol após a secagem.	90
Tabela 4.16 - Análise de regressão para o modelo ajustado à umidade.	92
Tabela 4.17 - Análise de regressão para o modelo ajustado à acidez.....	95
Tabela 4.18 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de ácido ascórbico.	99
Tabela 4.19 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de fenólicos totais....	102
Tabela 4.21 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de proteínas.	108
Tabela 5.1- Parâmetros codificados adotados nas simulações do pcc do resíduo de acerola.	120
Tabela 5.2 - Parâmetros codificados adotados nas simulações do pcc da soja.	121
Tabela 5.3 - Parâmetros codificados adotados nas simulações do pcc da mistura constituída por sementes de acerola e grãos de soja (50% em massa).	121
Tabela 5.4 - Condições experimentais adotadas na determinação do ângulo de repouso dinâmico.	122
Tabela 5.5 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola. O valor experimental foi de 52,6°. ($\alpha = 1,607$)	124
Tabela 5.6 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola.	127

Tabela 5.7 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico da soja (valor experimental de $41,10 \pm 2,0$). ($\alpha=1,607$)	128
Tabela 5.8 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso dinâmico da soja.	131
Tabela 5.9 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por resíduo de acerola e soja a 50% (valor experimental de $44,96 \pm 2,5$). ($\alpha=1,607$)	132
Tabela 5.10 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por soja e resíduo de acerola.	134
Tabela 5.11- Estudo comparativo entre os parâmetros aplicados à soja e acerola puros e em mistura.	135
Tabela 5.12 - Estudo comparativo entre os valores simulados e os experimentais, para o ângulo de repouso dinâmico.	135
Tabela 5.13 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola (valor experimental de $39,20 \pm 1,4$).	136
Tabela 5.14 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso estático do resíduo de acerola.	138
Tabela 5.15 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso estático da soja (valor experimental de $21,40 \pm 0,9$).	140
Tabela 5.16 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso estático da soja.	142
Tabela 5.17 - Parâmetros dos modelos aplicados à soja e acerola que conduziram a menores desvios para o ângulo de repouso estático	143
Tabela 5.18 - Comparação entre os valores simulados e os experimentais, para o ângulo de repouso estático.	144
Tabela 5.19 - Simulações adotadas na análise da porosidade do leito estático constituído por resíduo de acerola (valor experimental de 0,548).	145
Tabela 5.20 - Análise de regressão para o modelo ajustado a porosidade do leito constituído por resíduo de acerola.	146
Tabela 5.21 - Simulações adotadas na análise da porosidade do leito estático constituído por soja (valor experimental de 0,402).	147
Tabela 5.22 - Análise de regressão para o modelo ajustado à porosidade do leito estático constituído por soja.	148

Tabela 5.23 - Estudo comparativo entre os parâmetros aplicados à soja e acerola para a porosidade do leito estático.	149
---	-----

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos latinos

a	Raio de contato entre partículas sobrepostas [mm]
a_0	Raio do círculo de contato [mm]
D_c	Diâmetro da coluna [m]
D_{eq}	Diâmetro equivalente [mm]
D_i	Diâmetro de entrada [m]
d_p	Diâmetro da partícula [mm]
e	Coeficiente de restituição [-]
F_{JKR}	Força normal dada pelo modelo JKR [N]
F_i^g	Força gravitacional [N]
F_{ij}^c	Força de contato que atua na partícula i pela partícula j [N]
F_{ik}^{nc}	Força de não contato [N]
F_n	Força normal [N]
F_n^d	Força de amortecimento normal [N]
F_t^d	Força de amortecimento tangencial [N]
G^*	Módulo de cisalhamento equivalente [Pa]
G	Módulo de cisalhamento [Pa]
H	Altura do leito [m]
H_c	Altura da região cônica do leito de jorro [m]
I_i	Momento de inércia da partícula i [kg.m ²]
K_i	Constante elástica das partícula i [N/m]
K_j	Constante elástica das partícula j [N/m]
m_i	Massa da partícula [kg]
m^*	Massa efetiva [kg]
M_i	Torque agindo na partícula i pela partícula j [N.m]
M_{di}	Massa de resíduo de acerola no compartimento i [g]
M_{fr}	Massa de resíduo de acerola no final [g]
M_{ft}	Massa total final [g]
M_{ti}	Massa total inicial [g]
Q	Vazão de ar de entrada [m ³ /s]
Q_{min}	Vazão de mínimo jorro [m ³ /s]

R^*	Raio efetivo [mm]
R_i	Raio da partícula i [mm]
R_j	Raio da partícula j [mm]
S_n	Rigidez normal [N/m]
S_t	Rigidez tangencial [N/m]
t	Tempo [s]
T	Temperatura [°C]
T_R	Tempo de Rayleigh [s]
$v_n^{\overline{rel}}$	Velocidade normal relativa [m/s]
$v_t^{\overline{rel}}$	Velocidade tangencial relativa [m/s]
V	Volume total da mistura [m ³]
V_i	Volume inicial da mistura [m ³]
v_i	Velocidade translacional da partícula i [m/s]
x_{di}	Fração mássica de resíduo de acerola no compartimento i [-]
x_{dt}	Fração mássica total de resíduo de acerola [-]
X_d	Fração de acerola [-]
Y	Módulo de Young [Pa]
Y^*	Módulo de Young efetivo [Pa]
w_i	Velocidade angular da partícula i [rad/s]

Símbolos gregos

β	Ângulo da superfície cônica do leito de jorro [°]
ν	Coeficiente de Poisson [-]
β	Dureza normal [Pa.m]
τ	Energia de superfície [J/m ²]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
σ	Tensão de cisalhamento [Pa]
ε	Porosidade da mistura [-]
ε_{DEM}	Porosidade simulada pelo DEM [-]
\emptyset_{DEM}	Ângulo de repouso dinâmico simulado pelo DEM [°]
δ_n	Sobreposição normal [mm]
δ_t	Sobreposição tangencial [mm]
δc	Distância máxima entre partículas [mm]

μ_e	Coeficiente de atrito estático [-]
μ_r	Coeficiente de atrito de rolamento [-]
ρ_{ap}	Massa específica aparente [kg/m ³]
ρ_{real}	Massa específica real [kg/m ³]
Φ	Esfericidade [-]
γ	Energia de Superfície (Coesão) [J/m ²]
φ_{DEM}	Ângulo de repouso estático simulado pelo DEM [°]

RESUMO

Pesquisas revelam que no processamento de frutas cerca de 40% do volume total processado é descartado. Os resíduos de acerola se caracterizam pelo elevado valor nutricional atribuído à presença de ácido ascórbico e compostos bioativos, fenólicos e flavonoides. Análises químicas desse resíduo sugerem que o mesmo possui quantidades consideráveis de carboidratos, proteínas, lipídios e fibras, macro nutrientes essenciais ao organismo. Entraves como elevada umidade limita a vida útil de subprodutos (farinha por exemplo) provenientes deste resíduo. Entre os equipamentos de secagem, o leito de jorro possui elevado interesse econômico. Exposições a elevadas temperaturas e tempos longos de operação podem afetar a qualidade nutricional do produto. Testes preliminares com sementes de acerola em leitos de jorro revelaram dificuldade de escoamento desse material, fato esse contornado pela adição de soja como material inerte. Caracterizações físicas da soja comprovaram o seu auxílio na escoabilidade do resíduo de acerola. O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficácia de pré-tratamentos sobre a secagem de resíduo de acerola em leito de jorro, confrontando-se as características nutricionais do resíduo de acerola antes e após a secagem. Como pré-tratamentos foram avaliados: a aplicação de ultrassom (meio aquoso e etanólico) e a pulverização de etanol. A partir dos resultados obtidos verificou-se que desidratações (sem pré-tratamentos) de sementes de acerola realizadas a 60°C, com vazão de ar 5% acima do jorro mínimo e fração de acerola de 35% se mostraram favoráveis. O uso de ultrassom em meio aquoso contribuiu para a redução de umidade do resíduo de acerola, entretanto degradações dos teores de ácido ascórbico e de fenólicos foram verificadas. A troca do meio de imersão de água por etanol e o tratamento com pulverização de etanol se mostraram favoráveis, sendo possível a redução do tempo de secagem em 25%. O planejamento experimental adotado possibilitou avaliar os efeitos das variáveis (temperatura, volume de etanol e vazão de ar) sobre os teores nutricionais. O estudo por meio de simulações computacionais de propriedades físicas relativas ao movimento granular pode contribuir de modo satisfatório na determinação do comportamento fluidodinâmico das partículas no leito de jorro. Dentro desse contexto, faz ainda parte do escopo desse trabalho o estudo por meio de simulações numéricas de parâmetros fluidodinâmicos (ângulos de repouso estático e dinâmico e porosidade) que afetam o deslocamento das partículas no leito de jorro. Dentre os parâmetros estudados destacaram-se os efeitos dos coeficientes de atrito estático e de rolamento. As parametrizações adotadas se mostraram adequadas, sendo obtidos modelos preditivos capazes de determinar os efeitos dos parâmetros e de suas interações sobre as respostas.

ABSTRACT

Researches have shown that around 40% of the material produced in fruit processing is disposed off. Acerola residues have a high nutritional value due to the presence of ascorbic acid and bioactive, phenolic and flavonoid compounds. Chemical analyses have suggested that these residues have a considerable amount of carbohydrates, proteins, lipids and fibers, which are essential macronutrients to the human body. However, some issues, such as moisture, can diminish the shelf life of the flour produced from acerola residues. The exposition to high temperatures for a long time can affect the nutritional quality of the product. Among the drying methods, the spouted bed presents a high economic interest. Preliminary tests with acerola seeds in spouted bed revealed difficulties in the material flow material; however, this issue was solved by adding soy as inert material. The physical characterization of soy was found to be useful to understand the flowability of acerola residues. This research aimed to evaluate the efficacy of pretreatments in the drying of acerola residues in spouted bed by comparing the nutritional properties of the residues before and after drying. The pretreatment processes evaluated were the application of ultrasound (in aqueous and ethanolic mediums) and the ethanol spraying. The results obtained showed the dehydration of (non pretreated) seeds of acerola performed at 60 °C, air flow 5% higher than the minimum spout and percentage of acerola of 35% was satisfactory. The use of ultrasound in the aqueous medium reduced the moisture of acerola residues; however, it also degraded the ascorbic acid and phenolic contents. The immersion in ethanol and the ethanol spraying treatment presented good results and decreased the drying time in 25%. The experimental design adopted in this study allowed the analysis of the effects of variables (temperature, volume of ethanol and air flow) on the nutritional content. Computer simulations can satisfactorily contribute to predict the physical properties of the particle movement and determine the fluid dynamic behavior of particles in the spouted bed. In this context, this research also used numerical simulations to study the fluid dynamic parameters (dynamic and static angles of repose and porosity) that can affect the movement of particles in the spouted bed. The main parameters analyzed were the effects of the static and rolling friction coefficients. Parameterizations were adequate to predict models that determined the effects of parameters and their interactions with responses.

CAPÍTULO 1

Introdução

As diversidades no clima e no solo brasileiro têm contribuído de modo relevante na economia agrícola relacionada ao setor de fruticultura, onde o País ocupa uma posição de destaque na produção mundial. Dentre os países produtores em evidência no ramo da fruticultura encontram-se: China, Índia e Brasil. Em 2012, os três países colheram juntos 357,761 milhões de toneladas de frutas frescas, o equivalente a mais de 40% da produção mundial (Anuário Brasileiro de Fruticultura, 2013).

Dentro desse contexto, o Brasil ocupa a terceira colocação na produção mundial de frutas com recorde de produção em 2011 com 44,955 milhões de toneladas. No ano de 2012, de acordo com a FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura) o Brasil produziu cerca de 43,912 milhões de toneladas. Em 2013, a colheita foi de 40,253 milhões de toneladas de frutas (Anuário Brasileiro de Fruticultura, 2013). Dentre as colheitas de frutas destacam-se as de: laranja, banana, abacaxi, melancia, mamão, uva, maçã, manga e limão. Quanto ao destino produtivo, cerca de 712 mil toneladas são enviadas ao mercado externo, especialmente para a Holanda, Reino Unido e Espanha (IBRAF, 2014).

Frutas tropicais consideradas exóticas como cajá, umbu, acerola, seriguela, pitanga, cultivadas na região Nordeste do Brasil, são bastante ácidas e possui baixa razão polpa/caroço, o que favorece o consumo destas frutas na forma de sucos. Geralmente, os frutos contêm, além dos nutrientes essenciais e de micronutrientes como minerais, fibras e vitaminas, diversos compostos secundários de natureza fenólica, denominados polifenóis.

Dentre as frutas tropicais a acerola destaca-se devido ao elevado teor de vitamina C (em média de 1500 mg/100 g de polpa) o qual somente é superado pelo fruto camu-camu. O consumo de frutas ricas em vitamina C vem sendo incentivado, pois o organismo humano é capaz de absorver 100% da vitamina C quando a mesma apresenta-se na forma *in natura*, fato não evidenciado na ingestão de vitaminas sintéticas, com apenas 50% de absorção (ARAÚJO e MINANI, 1994). Ressalta-se que o ácido ascórbico é uma das vitaminas mais importantes por contribuir na prevenção do escorbuto.

A acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) caracteriza-se ainda pela presença de carotenoides, antocianinas (LIMA et al., 2000b) e fenólicos (CAETANO, 2009) que fornecem

ao fruto a característica antioxidante. Os carotenoides desempenham efeitos benéficos sobre a saúde na prevenção de câncer, doenças de coração e como reguladores de resposta do sistema imune (UENOJO et al., 2007). As antocianinas são flavonoides produzidos naturalmente pelos vegetais como mecanismo de proteção. São fontes importantes de antioxidantes e seu papel na prevenção de doenças cardiovasculares está relacionado à proteção contra o estresse oxidativo, à peroxidação lipídica e à redução no processo inflamatório. De acordo com Podsedex (2007) os compostos fenólicos contribuem de modo relevante com benefícios à saúde, sendo considerado um dos principais compostos bioativos. Os flavonoides, pertencentes à família dos fenólicos, possuem propriedades bioquímicas e farmacológicas; atividades antioxidantes, antivirais, anticarcinogênicas e anti-inflamatória.

Inúmeras são as aplicações práticas da acerola, sendo as alimentícias (fabricação de sucos, refrigerantes, bombons, geleias e compotas) as de maior importância. O uso de acerola nos setores de medicamentos e cosméticos são relatados por Souza et al. (2013). No entanto, no Brasil as formas comumente comercializadas da acerola são o fruto *in natura*, a polpa congelada e o suco engarrafado.

Segundo estatísticas do Anuário Brasileiro de Fruticultura de 2013, desconsiderando-se as perdas, cerca de 53% das frutas frescas produzidas por ano no Brasil são consumidas *in natura* pelos consumidores internos e o restante (47%) segue para a indústria de processamento, ou seja, para a produção de polpas e sucos. Dentro desse contexto, quantidade significativa de resíduos é gerada, constituídos principalmente por sementes e cascas.

De acordo com Aldrigue et al. (2002), são processadas anualmente 34,4 mil toneladas de acerola nas indústrias brasileiras, produzindo-se cerca de 18 mil toneladas de sucos e polpas. Entretanto, resíduos (bagaços, sementes e cascas) provenientes do processo fabril, entre 15% a 41% do volume total processado são simplesmente descartados ou adicionados em formulações de rações animais.

Pesquisas apontam que esses resíduos destacam-se pela presença de compostos bioativos (DUZZIONI et al., 2013) o que tem despertado interesse em seu aproveitamento, seja na forma de farinhas ou no enriquecimento de barra de cereais ou na formulação de cereais matinais. Teores elevados de umidade dos resíduos de acerola inviabilizam a produção de farinha a partir desse material. Desse modo, visando à conservação e evitando-se a deterioração do produto, a secagem evidencia-se entre os métodos de conservação, quando se leva em consideração aspectos econômicos e operacionais.

As técnicas de secagem em leitos agitado, fluidizado e de jorro têm se tornado populares e, aplicações com sucesso vêm sendo adotadas em todos os setores, especialmente

no alimentício (YOUNES, 2010; MEDEIROS et al., 2002; MORTOLA et al., 2003; NAGARAJU; BHATTACHARYA, 2010 e SOUZA, 2009). Os custos elevados de operação e de instalação do secador *spray dryer* contribuíram para a pesquisa de novas técnicas de secagem, dentre elas o uso de leitos de jorro. Os reduzidos investimentos iniciais e o custo operacional reiteram o interesse pelo uso do leito de jorro nesta e em diversas outras aplicações (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A secagem de alguns materiais representa um desafio para os pesquisadores, pois fatores como a natureza termossensível e a diversidade nas propriedades dos materiais tornam o processo ainda mais complexo, requerendo estudos mais aprofundados. Sendo assim, na prática, secadores distintos são utilizados dependendo do tipo de alimento e às demandas requeridas.

Estudos anteriores (Bortolotti, 2012) apontaram a reduzida escoabilidade dos resíduos de acerola em leito de jorro. Dentro desse contexto, soja foi adicionada como material inerte contribuindo para a fluidodinâmica do processo. Secagens de misturas constituídas por resíduos de acerola e grãos de soja, em leito de jorro, foram conduzidas em um estudo preliminar por Bortolotti (2012) no entanto, sem adoção de pré-tratamentos.

Pré-tratamentos como aplicação de ultrassom, micro-ondas, pulverização de etanol e osmose vêm sendo adotados com sucesso na esfera alimentícia (ROMERO J.; YÉPEZ V., 2015; LEONELLI; MASON, 2010; NUÑEZ-MANCILLA et al., 2013). Dentre as vantagens dos pré-tratamentos destaca-se o aumento das taxas de transferência de massa.

Diante do exposto e objetivando aumentar a eficiência de secagem, o presente estudo foi conduzido utilizando secagem em leito de jorro e adotando-se o ultrassom e a pulverização de etanol como formas de pré-tratamento. Desta forma, este estudo teve como objetivo geral avaliar os efeitos de pré-tratamentos sobre a secagem de resíduos de acerola em leito de jorro, visando à obtenção de um produto com reduzida umidade e elevado teor nutricional.

Como objetivos específicos destacam-se:

- Avaliar a eficácia de pré-tratamentos sobre a secagem de resíduo de acerola em leito de jorro, confrontando-se as características nutricionais do resíduo de acerola antes e após a secagem;
- Estudar a segregação axial da mistura no leito de jorro;
- Avaliar morfológicamente os efeitos dos pré-tratamentos adotados;
- Investigar os efeitos de parâmetros (potência do ultrassom, volume do meio de imersão, temperatura e vazão de ar) sobre a secagem e a qualidade nutricional;

- Realizar um estudo experimental e de simulação (DEM) sobre a fluidodinâmica da mistura de resíduo de acerola/soja em leito de jorro;
- Avaliar os efeitos dos parâmetros dos modelos de força sobre os ângulos de repouso estático e dinâmico.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 A acerola

A acerola ou cereja das Antilhas é originária da América tropical, sendo amplamente cultivada no oeste das Índias e na América do Sul, principalmente, nas regiões Nordeste e Sudeste do Brasil.

A história da produção de acerola data de 1955, onde mudas procedentes de Porto Rico foram introduzidas no Estado de Pernambuco pela Universidade Federal Rural de Pernambuco, através da variedade B-17. Fatores como qualidades nutricionais, facilidades de cultivo e adaptação edafoclimáticas contribuíram para a expansão da área cultivada desse fruto (EMBRAPA, 2009).

Segundo censo de 2004 realizado pelo IBGE a área plantada com acerola no Brasil ultrapassa a 10.000 ha e compreende os estados da Bahia, Pernambuco e Ceará, sendo esses os maiores produtores. Produções de acerola em torno de 33.000t de frutos, provenientes da Região Nordeste e do Estado de São Paulo foram estimadas pelo IBGE (2004).

Seu cultivo para fins comerciais vem se expandindo no Brasil, país considerado mundialmente o maior produtor, consumidor e exportador de acerola (CARVALHO et al., 2000). Expansões crescentes de plantios para fins comerciais vêm sendo realizadas em praticamente todos os estados brasileiros. Países como Estados Unidos, Alemanha, França e Japão, são os principais importadores deste fruto (EMBRAPA, 2009).

A acerola (Figura 2.1) apresenta formato arredondado, ovalado ou mesmo cônico possuindo casca de espessura fina. Com dimensões entre 1 e 2,5cm de diâmetro e peso de 2 a 12g, apresenta, normalmente, três sementes que podem corresponder a aproximadamente, 10% do peso total da fruta. As sementes possuem dimensões de 3 a 5 mm de comprimento, formato ovoide com dois cotilédones (ALMEIDA et al., 2002).

O fruto acerola possui coloração esverdeada quando ainda não se encontra pronta para o consumo e laranja ou vermelho escuro, quando madura. Coloração essa obtida em função da variedade, condições de solo e tipo de fertilizante. Segundo Lima et al. (2003) a cor vermelha da acerola, no estágio maduro, decorre da presença de antocianinas (3,81 a

47,36 mg/100 g) e a coloração amarela se deve à presença de carotenoides. Quanto maior o teor de antocianinas, melhor a aceitação do produto por parte do consumidor.

Estudos comparativos de teores de vitamina C apontam que os frutos totalmente maduros possuem teores inferiores quando comparados aos frutos em estado de prematuração. A acerola se constitui em média por 600 a 1.000 mg de vitamina C/100 g de amostra (CECÍLIO et al., 2009). De acordo com a Embrapa em algumas variedades é possível encontrar até 5.000 miligramas por 100 gramas de polpa. Este índice supera em cem vezes ao da laranja, dez vezes ao da goiaba, frutas com alto conteúdo dessa vitamina.



Figura 2.1 - Imagem fotográfica da acerola

Fonte: Ritzinger; Ritzinger (2011)

De acordo com Freitas et al. (2006) os teores médios de vitamina C encontrados por diversos autores possuem divergências (Tabela 2.1) obtendo-se na literatura valores entre 779 a 3094,43 mg/100 g de polpa. As discrepâncias se devem às variações como variedades, condições climáticas, tipos de solos e estágios de maturação.

Agostini-Costa et al. (2003) relatam que a significativa presença de ácido ascórbico (vitamina C) nessa fruta tem favorecido o seu processamento e comercialização, levando-se em consideração os benefícios à saúde. Segundo o mesmo autor a acerola é ainda uma rica fonte de carotenoides, em destaque o β -caroteno (7,1 μ g/g de polpa), a β -criptoxantina (1,7 μ g/g de polpa) e α -caroteno (0,2 μ g/g de polpa). No entanto, em decorrência da alta instabilidade destes compostos naturais, o teor dos mesmos pode ser alterado em função do processamento e estocagem da acerola.

A presença de vitamina C e de carotenoides como o licopeno e o β -caroteno contribuem na prevenção e redução de risco de desenvolvimento de doenças como o câncer.

De acordo com Krinsky (1991) os carotenoides funcionam como antioxidantes naturais e possuem capacidade de proteger membranas, DNA e outros constituintes celulares contra danos oxidativos.

Tabela 2.1 - Valores médios de vitamina C de acerolas, segundo diferentes autores.

Autores	Teores de vitamina C (mg 100 g ⁻¹)
GONZAGA NETO et al. (1999)	779 a 2444
GOMES et al. (2000)	853,51 a 1631,01
AGUIAR (2001)	843,03 a 2322
PIMENTEL et al. (2001)	1437,78
SOARES et al. (2001)	1620
LIMA et al. (2000a)	1066,66 a 1845,79
MOURA et al. (2002)	500,90 a 1854,92
NUNES et al. (2002)	1598,29 a 2053,26
SANTOS et al. (2002)	1089,22 a 3094,43
PAIVA et al. (2002)	1001 a 1600

Fonte: FREITAS et al. (2006)

Estudos realizados por Jacob e Burri (1996) confirmam a ação antioxidante da acerola, a qual se deve ainda à presença de compostos bioativos, como os polifenóis, que atuam minimizando os danos oxidativos causados pelas espécies reativas de oxigênio e nitrogênio, na prevenção de doenças crônicas não transmissíveis, como câncer e aterosclerose.

Dados de composição química da acerola são apresentados pela Nutrient Database for Standard Reference (2001) citada por Freitas (2006). Nota-se pela Tabela 2.2 apresentada que a acerola se caracteriza não somente pelo elevado teor de vitamina C, mas pela presença de teores consideráveis de vitamina A, bem como a presença de minerais importantes como o potássio.

2.2 Compostos Bioativos

2.2.1 O ácido ascórbico

As vitaminas, compostos orgânicos, se classificam em grupos levando-se em consideração à solubilidade em água, lipídios e solventes orgânicos. Dentro desse contexto existem as lipossolúveis, que são as vitaminas A, D, E e K e as hidrossolúveis, dentre as quais

destacam-se: ácido fólico, cobalamina, ácido ascórbico, piridoxina, tiamina, niacina, riboflavina, biotina e ácido pantotênico (PENTEADO, 2003). A necessidade de suprimento diário das vitaminas hidrossolúveis se deve à reduzida capacidade de armazenamento dessas pelo organismo.

Tabela 2.2 - Composição química da acerola.

Nutrientes	Valor por 100 g
Água	91,41 g
Calorias	32 kcal
Proteínas	0,4 g
Lípides totais (gordura)	0,3 g
Carboidratos (por diferença)	7,69 g
Fibra total dietética	1,1 g
Cinzas	0,2 g
Cálcio, Ca	12 mg
Ferro, Fe	0,2 mg
Magnésio, Mg	18 mg
Fósforo, P	11 mg
Potássio, K	146 mg
Sódio, Na	7 mg
Zinco, Zn	0,1 mg
Cobre, Cu	0,086 mg
Manganês, Mn	0 mg
Selênio, Se	0,6 mcg
Vitamina C, ácido ascórbico total	1677,59 mg
Tiamina	0,02 mg
Riboflavina	0,06 mg
Niacina	0,4 mg
Ácido pantotênico	0,309 mg
Vitamina B6	0,009 mg
Folato total	14 mcg
Vitamina B12	0 mcg
Vitamina A	231 mg
Ácidos graxos, total saturados	0,068 g
Ácidos graxos, total mono-insaturados	0,082 g
Ácidos graxos, total poli-insaturados	0,09 g
Colesterol	0 mg

Fonte: USDA Nutrient Database for Standard Reference, Release 14 (Julho 2001)

Compostos que apresentam quantitativamente a atividade biológica do ácido ascórbico são denominados genericamente por vitamina C. A vitamina C é solúvel em água (33% m/v a 35°C) e pouco solúvel em etanol (2%) e ácido acético (0,2%). O composto natural principal com a atividade da vitamina C é o ácido L-ascórbico, nome trivial dado ao L-treo-2-hexenona-1,4-lactona (PENTEADO, 2003).

A vitamina C ocorre naturalmente em alimentos na forma reduzida do ácido L-ascórbico, sendo seu produto de oxidação inicial o ácido dehidroascórbico, ambos apresentando atividade vitamínica (Figura 2.2). No entanto, os isômeros do ácido L-ascórbico (Figura 2.3) praticamente não exercem efeitos vitamínicos (DAVIES et al., 1991).

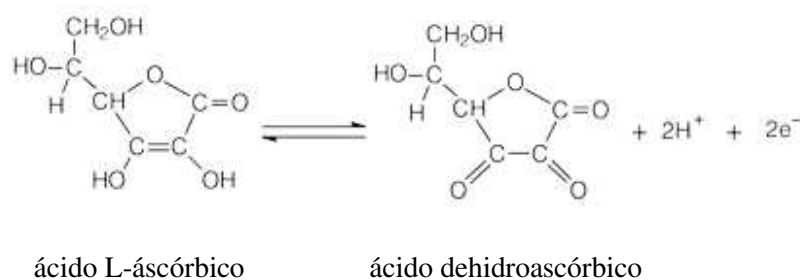


Figura 2.2 - Oxidação do ácido ascórbico em dehidroascórbico.

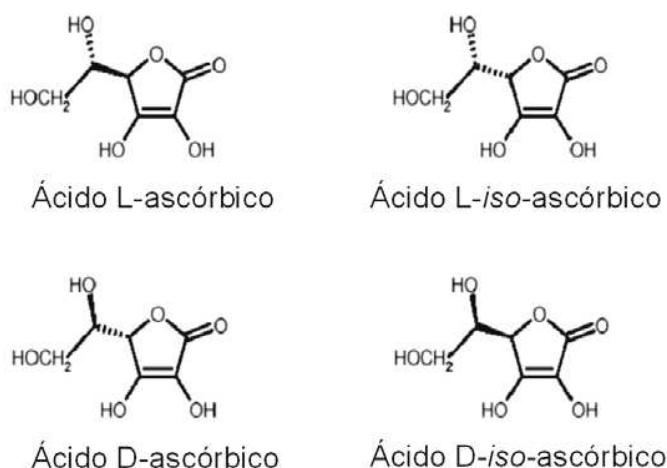


Figura 2.3- Formas isoméricas do ácido ascórbico.

Fonte: DAVIES et al., 1991

O ácido L-ascórbico apresenta elevada importância em sistemas bioquímicos, farmacológicos, eletroquímicos e processamento de alimentos (ROIG et al, 1993). Pela incapacidade de sintetização, a aquisição dessa vitamina pelo ser humano ocorre por meio da ingestão. O ácido ascórbico é absorvido no intestino humano por um mecanismo ativo e provavelmente transportado para o sangue por difusão. Armazenado até certa quantidade em tecidos como o fígado e o baço, quantidades em excesso são excretadas pela urina na forma dos ácidos oxálicos, treônico e dehidroascórbico (PENTEADO, 2003).

Segundo Fornaro e Coichev (1998) o ácido ascórbico apresenta funções importantes no corpo, estando envolvido no metabolismo de vários tecidos e em múltiplos processos bioquímicos.

O ácido ascórbico possui ação inibitória na síntese química de nitrosaminas, importante fator de risco para câncer do estômago. Estudos epidemiológicos sugerem que uma ingestão de vitamina C acima do recomendado (60 a 90 mg por dia) pode reduzir o risco de doenças crônicas como problemas cardíacos e câncer, especialmente quando combinados com alta ingestão de vitamina E (HATHCOCK, 1997). No entanto, a recomendação norte-americana diária para consumo de vitamina C foi elevada para 75 mg para mulheres e 90 mg para homens (INSTITUTE OF MEDICINE)

De acordo com Pellegrini et. al (2007) os carotenoides, as vitaminas C e E e fitoquímicos (fenólicos e flavonoides) são considerados antioxidantes naturais. Entende-se por antioxidantes os compostos químicos que contribuem na prevenção ou redução dos danos oxidativos de lipídios, proteínas e ácidos nucleicos causados por espécies de oxigênio reativo, os radicais livres. Ou seja, os agentes antioxidantes reagem com os radicais livres reduzindo os danos. Como resultados destacam-se a diminuição de incidência de doenças degenerativas como o câncer e doenças cardiovasculares, inflamações e disfunções cerebrais e ainda o retardamento do envelhecimento precoce (PIMENTEL et, al. 2005).

Segundo Kaur e Kapoor (2001) a vitamina C é um dos antioxidantes hidrossolúveis de maior importância pois, na maioria dos sistemas biológicos, o ácido ascórbico protege os compostos intra e extracelulares e reduz os radicais tocoferol de volta à sua forma ativa.

2.2.2 O ácido cítrico

O ácido cítrico ou citrato de hidrogênio (ácido 2-hidroxi-1,2,3-propano tricarboxílico) é um ácido orgânico fraco (Figura 2.4). Encontra-se presente na maioria das frutas, essencialmente nas cítricas como limão e laranja. É um sólido cristalino branco, inodoro, de sabor levemente ácido. Possui massa molar 192,13 kg/kmol, ponto de fusão de 153°C e temperatura de decomposição térmica de 175°C.

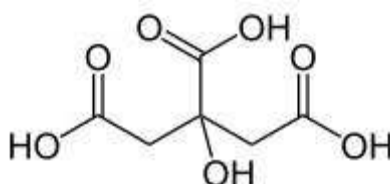


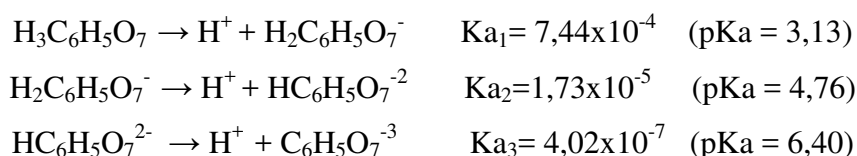
Figura 2.4 - Fórmula estrutural do ácido cítrico.

Estudos realizados por Oliveira (2009) sobre a solubilidade do ácido cítrico em misturas hidro-alcóolicas, apontam que o mesmo é solúvel em água na temperatura de

293,7 K, com solubilidade de 59,78 g de produto anidro por 100 g de solução saturada. Em etanol, a 294,2 K, a solubilidade obtida foi de 57,93 g de produto anidro por 100 g de solução saturada. Efeitos da temperatura foram avaliados pelos autores indicando que a solubilidade deste ácido, em água, é função direta da temperatura.

A acidez do ácido cítrico se deve à presença de três grupos carboxilas (-COOH) que podem perder um próton em soluções, formando-se o íon citrato.

As equações abaixo representam os processos de ionização do ácido cítrico:



Os íons citratos formam com cálcio o citrato de cálcio, sal utilizado na preservação e condimentação dos alimentos.

O ácido cítrico possui vasta aplicação industrial pois, o mesmo possui diversas propriedades favoráveis tais como: acidulante, palatabilidade, atoxicidade, facilidade de assimilação pelo organismo humano, tamponamento e sequestro de íons. Sendo assim cerca de 70% da produção deste ácido é utilizada pela indústria de alimentos, 12% pela indústria farmacêutica e 18% destinado a outras indústrias (ADITIVOS e INGREDIENTES, 2011).

Na indústria alimentícia o ácido cítrico é utilizado como aditivo na fabricação de refrigerantes, sobremesas, conservas de frutas e vinhos. No processamento de frutas e vegetais, utiliza-se ácido cítrico na estabilidade de alimentos congelados através da inibição de reações enzimáticas. Sendo assim, devido à sua capacidade de aumentar a eficácia de conservantes antimicrobianos, prolongar a estabilidade da vitamina C, reduzir as alterações de cor, realçar os aromas e tamponar o meio, o ácido cítrico possui vasta aplicabilidade.

2.2.3 Os fenólicos totais

De acordo com Moreira e Mancini-Filho (2004) os compostos antioxidantes podem ser divididos em duas classes considerando-se a presença ou não de atividade enzimática. Os compostos capazes de bloquear a iniciação da oxidação, ou seja, as enzimas que removem as espécies reativas ao oxigênio pertencem à classe dos que possuem atividade enzimática. Na segunda classe, estão moléculas que interagem com as espécies radicalares e são consumidas

durante a reação. Nesta classificação, estão presentes os antioxidantes naturais e sintéticos como os polifenóis.

Os polifenóis são compostos que possuem anel aromático com um ou mais substituintes hidroxílicos, incluindo seus grupos funcionais (SHAHIDI e NACZK, 1995). Estes fitoquímicos se classificam em diferentes grupos pelo esqueleto carbônico apresentado, ou seja, em função do número de anéis fenol que contêm e dos elementos estruturais que ligam estes anéis (SOARES et al., 2008). Sendo assim, os polifenóis se dividem em: A) ácidos fenólicos com subclasses, derivados de ácidos hidroxibenzoicos, como ácido gálico e ácido hidroxicinâmico; B) flavonoides, os quais incluem flavonóis, flavonas, isoflavonas, flavanonas e antocianidinas; C) estilbenos, cujo representante mais conhecido é o resveratrol; D) taninos, que são divididos em dois grupos: galotaninos, elagitaninos ou taninos hidrolisáveis (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 - Classe de compostos fenólicos presentes nas plantas.

Classe	Estrutura
Fenólicos simples, benzoquinonas	C_6
Ácidos hidroxibenzoicos	C_6-C_1
Acetofenol, ácidos fenilacéticos	C_6-C_2
Ácidos hidroxicinâmicos, fenilpropanóides	C_6-C_3
Nafitoquinonas	C_6-C_4
Xantonas	$C_6-C_1-C_6$
Estilbenos, antoquinonas	$C_6-C_2-C_6$
Flavonóides, isoflavonóides	$C_6-C_3-C_6$
Lignanas, neolignanas	$(C_6-C_3)_2$
Biflavonóides	$(C_6-C_3-C_6)_2$
Ligninas	$(C_6-C_3)_n$
Taninos condensados	$(C_6-C_3-C_6)_n$

Fonte: ANGELO; JORGE (2007)

Naczk e Shahidi (2004) afirmam que existem mais de cinco mil tipos de fenóis e que a variabilidade de estruturas existentes nestes compostos os tornam multifuncionais. Os compostos fenólicos são originados do metabolismo secundário das plantas, sendo essenciais para o seu crescimento e reprodução. Formam-se em condições de estresse como, infecções, ferimentos, radiações UV, dentre outros (NACZK; SHAHIDI, 2004). São considerados agentes antipatogênicos e contribuem na pigmentação. Em alimentos, são responsáveis pela

cor, adstringência, aroma e estabilidade oxidativa. Dentre os compostos fenólicos mais abundantes nos alimentos destacam-se: os flavonoides, os ácidos fenólicos e as lignanas.

As frutas, especialmente as que apresentam a coloração vermelha/azul (como uvas, ameixas, jamelão, cereja e acerola) são as mais importantes fontes de compostos fenólicos na dieta, especialmente os derivados do ácido hidroxibenzoico e do ácido hidroxicinâmico. Muitos destes apresentam uma grande gama de efeitos biológicos, incluindo ações antioxidantes, antimicrobiana, antiplaquetária, anti-inflamatória e vasodilatadora (DEGASPARI; WASZCZYNSKY, 2004).

Melo (2008) relata que a eficácia de sua ação antioxidante depende da estrutura química e da concentração destes fitoquímicos. A capacidade dessas substâncias em sequestrar radicais livres e metais pró-oxidantes explica, em parte, esta associação. Evidências recentes sugerem que estes compostos possam atuar por meio de outros mecanismos além da capacidade antioxidante, como: a modulação da atividade de diferentes enzimas (telomerase, lipoxigenase e cicloxigenase), as interações com receptores e vias de transdução de sinais e a regulação do ciclo celular, processos essenciais para a manutenção da homeostase dos organismos vivos (D'ARCHIVIO et al., 2007).

As ações fisiológicas dos compostos fenólicos despertam grande interesse devido aos seus efeitos antiaterogênicos, neuroprotetores, anti-inflamatórios, anticarcinogênicos e antioxidantes (AJILA et al., 2008).

Rice-Evans et al. (1997) explica que a capacidade antioxidante dos polifenóis se deve, principalmente, às suas propriedades redutoras, cuja intensidade da ação antioxidante exibida por estes fitoquímicos é diferenciada uma vez que depende, fundamentalmente, do número e da posição de hidroxilas presentes na molécula.

Este mecanismo de ação dos antioxidantes, presente em extratos de plantas, possui um papel importante na redução da oxidação lipídica em tecidos, vegetal e animal, pois não conserva apenas a qualidade do alimento, mas também reduz o risco de desenvolvimento de patologias, como arteriosclerose e câncer (RAMARATHNAM et al., 1995)

A atividade anticarcinogênica dos fenólicos tem sido relacionada à inibição dos cânceres de cólon, esôfago, pulmão, fígado, mama e pele. Os compostos fenólicos que possuem este potencial são resveratrol, quercetina, ácido caféico e flavonóis (PIMENTEL et al., 2005).

2.2.4 Os flavonoides

Os flavonoides, fitoquímicos amplamente distribuídos no reino vegetal, estão presentes em frutas, folhas, sementes e em outras partes da planta na forma de glicosídeos ou agliconas. Os flavonoides possuem em comum a estrutura carbônica $C_6-C_3-C_6$, consistindo de dois anéis aromáticos ligados por um heterocíclico oxigenado (HARBORNE et al., 1999).

Os anéis aromáticos são denominados A e B, os quais estão unidos pelo anel heterocíclico, denominado C (Figura 2.5). O anel aromático A é derivado do ciclo acetato/malonato, enquanto o anel B é derivado da fenilalanina (MERKEN; BEECHER, 2000).

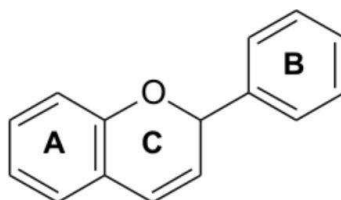


Figura 2.5 - Estrutura química dos flavonoides.

Variações em substituição do anel C padrão resultam em importantes classes de flavonoides, como flavonóis, flavonas, flavanonas, flavanóis (ou catequinas), isoflavonas e antocianidinas (Figura 2.6). Nestas classes ocorrem grandes variações estruturais, dependendo do nível de oxigenação, alquilação, glicosilação, acilação e sulfação que ocorrem nas moléculas dos anéis A e B (HOLLMAN; KATAN, 1999). Dentre os aproximados 4000 flavonoides conhecidos as maiores classes são flavonóis, catequinas ou flavonas, antocianidinas e isoflavonas.

Os flavonoides englobam um numeroso grupo de pigmentos e são os principais responsáveis pelas cores e tons de azul, vermelho e amarelo em flores, frutos e folhas de diferentes espécies vegetais. As antocianinas pertencem ao grupo de pigmentos responsáveis pelas cores azuis e vermelhos, e as antoxantinas são as responsáveis por cores e tons de amarelo. Um terceiro grupo, as leucoantocianidinas, formado por compostos incolores, é resultante da condensação de duas ou mais moléculas de agliconas das antocianinas (BOBBIO; BOBBIO, 1992).

Os flavonoides, como procianidina, proantocianidina, quercetina e catequina, são polifenóis que, assim como o resveratrol, são capazes de inibir a oxidação da lipoproteína de baixa densidade (LDL-colesterol), que está intimamente correlacionada com as complicações da aterosclerose, como a doença arterial coronária (DAC), o acidente vascular cerebral e/ou

doença vascular periférica e alguns tipos de câncer (MAMEDE; PASTORE, 2004; OPIE; LECOUR, 2007).

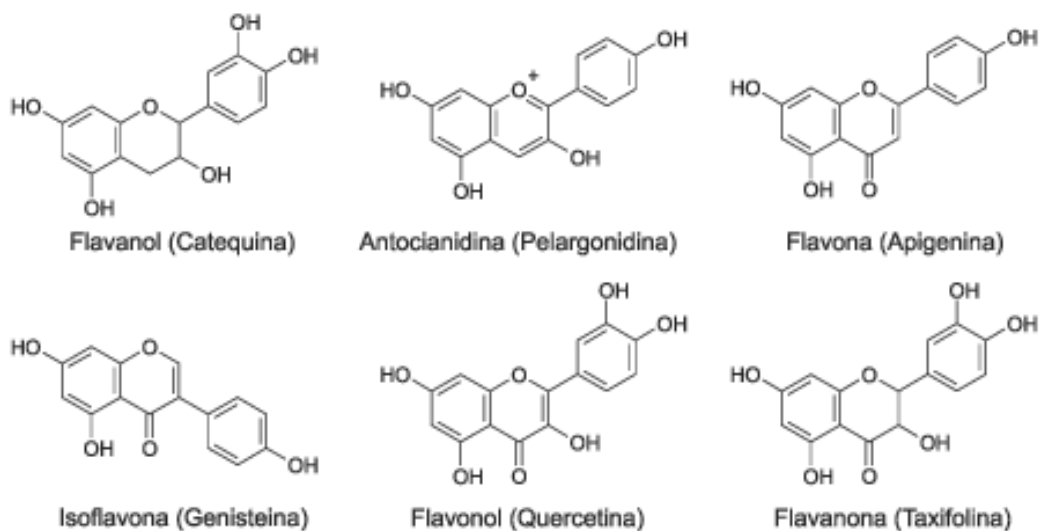


Figura 2.6- Estrutura das principais classes de flavonoides.

Fonte: CERQUEIRA; MEDEIROS; AUGUSTO (2007)

2.3 Composição nutricional

2.3.1 Cinzas

O teor de cinzas em alimentos refere-se ao resíduo inorgânico, ou resíduo mineral fixo (sódio, potássio, magnésio, cálcio, ferro, fósforo, cobre, cloreto, alumínio, zinco, manganês e outros compostos minerais) remanescente da queima da matéria orgânica em mufla a altas temperaturas (500-600°C) (ZAMBIAZI, 2007).

O conteúdo em cinzas em uma amostra alimentícia representa a quantidade total de minerais podendo, portanto, ser utilizado como medida geral da qualidade, e frequentemente é utilizado como critério na identificação de alimentos. O conteúdo de cinzas se torna importante para os alimentos ricos em certos minerais, o que implica em seu valor nutricional (ZAMBIAZI, 2007).

Segundo Aguiar et al. (2010) a farinha de semente de acerola não apresenta conteúdo expressivo de minerais, sendo o seu resíduo mineral fixo de apenas 0,44%. Entretanto as sementes possuem quantidades superiores de certos minerais quando comparada à polpa.

2.3.2. Proteínas

Segundo Gava (1978) os tecidos vegetais são sistemas aquosos compostos por proteínas, hidratos de carbono e gorduras. Dissolvidas na fase aquosa encontram-se as substâncias solúveis em água, como hidratos de carbono, alguns ácidos graxos, sais minerais, vitaminas e pigmentos. Destaca-se que a composição nutricional de um alimento depende de suas condições conservacionais.

As proteínas, macromoléculas formadas pela ligação peptídica entre os aminoácidos, podem ser encontradas no estado coloidal (vegetais) ou no estado de emulsão (PHILIPP, 2008; NETO, 2003).

Segundo Philipp (2008) e Neto (2003) as proteínas desempenham diversas funções no organismo. Destacam-se as proteínas estruturais (colágeno, elastina, queratina), as motoras (actina, miosina), as do sistema imune (anticorpos, peptídeos de superfície celular), as de transporte (albumina, hemoglobina) e as nucleoproteínas (proteínas associadas ao DNA).

Gava (1978) complementa afirmando que os nutrientes capazes de fornecer energia para o homem e animais são os carboidratos, gorduras e as proteínas. Os carboidratos e as gorduras possuem combustão bioquímica completa. No entanto, as proteínas não sofrem oxidação completa no organismo, uma vez que diferentes compostos nitrogenados são excretados na urina como produto final do metabolismo das proteínas, a citar: uréia, ácido úrico e ácido hipúrico.

A necessidade média de proteína para um adulto gira em torno de 0,8 g de proteína por kg peso/dia. Sendo assim, estima-se que de 10% a 15 % da ingestão total de energia diária devem ser provenientes das proteínas. Entre os alimentos ricos em proteínas estão carnes, ovos, leites e derivados. Já os alimentos de origem vegetal são considerados pobres nesse nutriente, exceto as leguminosas e os feijões (KRAUSE et al, 2005).

Para Philipp (2008) as frutas, legumes e verduras fornecem pequenas quantidades de proteína. Segundo Salinas (2002) é possível encontrar de 1% a 3% de proteínas como reserva em hortaliças e frutas.

2.3.3 Extrato etéreo (Lipídios)

Os lipídios constituem uma classe de compostos com estrutura variada, e se caracterizam pela sua alta solubilidade em solventes orgânicos e por serem, praticamente, insolúveis em água. Exercem diversas funções biológicas, como componentes de membranas, isolantes térmicos e reservas de energia. Muitos lipídios são compostos anfipáticos, ou seja,

apresentam na molécula uma porção polar (hidrofílica) e uma porção apolar (hidrofóbica) (MARZZOCO; TORRES, 2007).

Dentre os lipídios destacam-se os ácidos graxos, que são ácidos monocarboxílicos, geralmente, de cadeia longa, constituído por número par de átomos de carbono e sem presença de ramificações, podendo a cadeia ser saturada ou conter insaturações (MARZZOCO E TORRES, 2007).

Os nomes triviais dos ácidos graxos, em geral, derivam-se das fontes onde são encontrados em abundância. Assim, o ácido palmítico do óleo de palma, ácido oleico do óleo de oliva, linoleico e linolênico do óleo de linhaça. Segundo Aguiar et al. (2010) as sementes de acerola possuem cerca de 62,4% de ácidos graxos insaturados, composto exclusivamente pelos ácidos graxos oleico, linoleico e linolênico. Já os saturados correspondem a 35,6% do total e estão representados apenas pelos ácidos palmítico e esteárico.

2.3.4 Fibra

Segundo Mertens (1992) o termo fibra possui sua definição vinculada ao método analítico empregado na sua determinação. Por exemplo, fibra bruta (FB), fibra insolúvel em detergente ácido (FDA), fibra insolúvel em detergente neutro (FDN) ou fibra alimentar total (FAT). Quimicamente a fibra é um agregado de compostos e não uma entidade química distinta, portanto, a composição química da fibra é dependente da sua fonte e da forma como foi medida.

A determinação de fibra bruta envolve o uso de ácidos e bases fortes para sua extração, cuja extração ácida remove amidos, açúcares e parte da pectina e hemicelulose dos alimentos. Já a básica retira proteínas, pectinas e hemicelulose remanescentes e parte da lignina (MERTENS, 1992). A fibra bruta consiste principalmente de celulose com pequenas quantidades de lignina e hemicelulose.

De acordo com Cerqueira et al. (2008) define-se fibra alimentar como o conjunto composto por polissacarídeos, oligossacarídeos, lignina e substâncias associadas. Presentes em alimentos vegetais as fibras alimentares podem ser classificadas como solúveis (pectinas, gomas e mucilagens) ou insolúveis (celulose, hemicelulose e lignina). As solúveis, um terço das fibras alimentares, são facilmente fermentadas por bactérias no cólon e as, incompletamente ou não fermentadas, são chamadas de fibras insolúveis. Vale destacar que as fibras insolúveis são as responsáveis pela proteção e pelo bom funcionamento do intestino, devido à capacidade de retenção de água (TATE; LYLE, 2008).

Benefícios à saúde dentre eles, o efeito laxante, a redução do colesterol e da glicose no sangue (AOAC, 2001), a intervenção no metabolismo dos lipídios e carboidratos e na fisiologia do trato gastrointestinal levaram a fibra à categoria de alimento funcional.

A prevenção de doenças como diabetes *mellitus* e *dislipidemias* vem sendo associadas à ingestão de fibra alimentar (MENDES, 2013). Sendo assim, para suprir o déficit do consumo de fibra, o enriquecimento de produtos com fibra alimentar, seja esse realizado por meio de resíduos de frutas ou vegetais é uma das formas de contribuir com a saúde humana e ainda reduzir o desperdício.

2.4 Os resíduos de acerola

As indústrias processadoras de frutas tropicais processam, no Brasil, cerca de 34,40 mil toneladas de acerolas por ano, o equivalente a 7,16% do total de frutas processadas. As acerolas submetidas ao processo fabril geram, aproximadamente, 18 mil toneladas de sucos e polpas por ano, concentrando-se esta produção na região nordeste (ASTN & APEX, 2001).

Em contrapartida, o processamento de frutas nas indústrias alimentícias tem contribuído de modo significativo para a geração de resíduos, principalmente, o bagaço e as sementes. Santos et al. (2010) em estudos de caracterização de farinha de resíduo de acerola afirma que esses resíduos representam 40% do volume de produção. Vasconcelos (2002) afirma que o uso de subprodutos da acerola (semente triturada e polpa após a retirada do suco) exige o aprofundamento de pesquisas no sentido de se conhecer o valor nutritivo dos mesmos, já que esses representam entre 15 a 41% do volume total de acerola produzido.

Estudos científicos apontam que os resíduos de frutas podem servir como fontes alternativas de nutrientes de novos produtos, dentre eles destacam-se: Abud e Narain (2009) em estudos de enriquecimento de biscoitos com resíduos oriundos do processamento das frutas umbu, acerola, goiaba e maracujá; Santos et al. (2010) na obtenção de farinha proveniente de resíduos de acerola e Aguiar et al. (2010) e na caracterização de sementes de acerola.

Cabe ressaltar que esses resíduos são, geralmente, desprezados ou usados como ração animal (JÚNIOR et al., 2006; SENA e NUNES, 2007) ao passo que 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. Ou ainda no enriquecimento nutricional de produtos alimentares como pães, biscoitos ou iogurtes.

Portanto, a pesquisa e a implementação de um sistema de reciclagem de resíduos sólidos provenientes de indústrias de processamento de acerola possui extrema relevância, por

contribuir de modo significativo na mitigação dos impactos ambientais, ou mesmo na agregação de valor econômico produzindo-se uma farinha, que poderia ser adicionada em outros produtos como fonte de enriquecimento nutricional. Deste modo, o processamento desse resíduo configura-se uma forma dinâmica de destinação deste material, promovendo a geração de empregos, colaborando nos âmbitos social e ambiental.

Segundo Giuntini et al. (2003) os estudos sobre o potencial dos resíduos industriais de frutas como fontes significativas de fibra alimentar, ainda são escassos e merecem aplicações industriais no desenvolvimento de novos alimentos. Santos et al.(2010) aponta a falta de estudos relacionados às fontes nutricionais deste resíduo e conclui através da caracterização físico-química da farinha de acerola, que esse resíduo possui elevados teores de fibra e reduzida percentagem de gordura, quando comparado ao da fruta *in natura*.

De acordo com Giuntini et al. (2003) a fibra alimentar pode ser utilizada no enriquecimento de produtos ou como ingrediente, pois se constituem de polissacarídeos, lignina, oligossacarídeos e amido resistentes. Segundo estudos desse autor resíduos de abacaxi e maracujá possuem teores de fibras alimentares superiores ao de soja e aveia.

Braga et al. (2011) realizaram estudos sobre caracterização físico-química de resíduos industriais de acerola com a finalidade de avaliar o seu potencial de aproveitamento na alimentação humana. Avaliando-se resíduos provenientes de acerolas verdes e maduras, verificaram que os mesmos possuem elevados teores de ácido ascórbico e, significativa presença de fibras brutas, sendo que, os valores obtidos para resíduos de frutos maduros foram ligeiramente superiores aos da fruta imatura. O que indica a sua possível aplicação como fonte de enriquecimento de nutrientes na elaboração de produtos alimentícios.

Avaliações de composição química e mineralógica de sementes de acerola realizadas por Aguiar et al. (2010) apontam que este resíduo possui potencial para a suplementação de dietas, principalmente em termos de carboidratos, fibra alimentar e proteína (Tabelas 2.4 e 2.5).

Aguiar et al. (2010) afirma ainda que a farinha de semente de acerola contém quantidade significativa de vitamina C e que, embora o teor de lipídio seja reduzido, essa quantidade é nutricionalmente importante em função do seu grau de insaturação representado principalmente pelos ácidos graxos oleico e linoleico. Do ponto de vista mineralógico, Aguiar et al. (2010) destaca que o resíduo de acerola possui apenas 0,44% de mineral fixo, no entanto, a mesma pode ser considerada mais importante em relação ao conteúdo de minerais do que a polpa do fruto, em termos de cálcio, magnésio, zinco, manganês e cobre.

Tabela 2.4 - Composição química e valor nutricional da farinha de sementes de acerolas.

Determinações	Resultados (g/100g)
Valor energético total (kcal) ²	332,00 ± 13,18
Umidade ¹	9,40 ± 0,32
Cinzas ¹	0,44 ± 0,01
Proteína bruta ¹	16,94 ± 0,81
Lipídios ¹	3,92 ± 0,02
Carboidratos totais ³	57,24 ± 2,44
Fibras ¹	26,54 ± 1,33
Açúcares redutores ¹	9,20 ± 0,4
Vitamina C (mg/100 g) ¹	66,00 ± 1,19

¹média de 6 repetições, ² valor teórico, ³calculado por diferença
Fonte Aguiar et al. (2010)

Tabela 2.5 - Composição de minerais em sementes de acerola obtidas por Aguiar et al. (2010).

Minerais	Teores (mg/100 mg)	
	Farinha de sementes	Acerola <i>in natura</i> ¹
Cálcio	41,76 ± 2,38	12,00
Magnésio	22,24 ± 1,50	18,00
Potássio	41,39 ± 2,01	146,00
Zinco	0,09 ± 0,02	0,01
Ferro	37,23 ± 1,73	0,20
Manganês	0,74 ± 0,32	0,02
Cobre (µg)	0,15	0,08
Fósforo	0,08	11,00

¹ Fonte: USDA (2003)

A escassez de dados sobre a capacidade antioxidante dos resíduos de frutas (acerola, goiaba, cupuaçu, abacaxi, graviola e bacuri) motivou Sousa et al. (2011b) a investigar as propriedades antioxidantes desses resíduos com o objetivo evitar desperdícios e eventualmente fornecer às indústrias de alimentos e à população carente um suplemento nutricional com custo reduzido. Após estudo comparativo Sousa et al. (2011b) verificaram que dentre os resíduos de frutas avaliados, os de acerola se destacam pelo seu elevado teor de fenólicos totais.

O alto teor de fenólicos, antioxidante natural encontrado na acerola, sugere que os resíduos em pó provenientes desta fruta podem fornecer benefícios à saúde quando usados em produtos alimentares funcionais. O baixo custo dos resíduos de frutas (geralmente descartados como lixo no meio ambiente) e a sua composição nutricional sugerem o seu uso como recurso em potencial sendo capazes de oferecer suplementos nutricionais às comunidades de baixa renda.

Diante do exposto e partindo-se da premissa de que os resíduos provenientes do processamento de acerola possuem elevado grau nutricional visa-se neste estudo o aproveitamento desse resíduo, constituído por sementes, seja no formato de farinha ou na formulação de um novo produto.

2.5 A secagem de resíduos agroindustriais

Pesquisas e avanços tecnológicos na esfera agroindustrial têm contribuído com o crescente aumento da produção da fruticultura brasileira. Em detrimento a esse fato resíduos provenientes desse setor são frequentes e, comumente, gerados em elevados volumes.

Entende-se por resíduo agroindustrial frutas refugadas, cascas, sementes, caroços e bagaços. O aproveitamento desses resíduos no processamento de novos alimentos tem representado um segmento importante para as indústrias, principalmente no tocante à demanda por produtos enriquecidos a serem adotados em dietas especiais (SANTANA, 2005). Vale destacar que as farinhas de frutas, em relação às farinhas de cereais, apresentam como vantagens: maior conservação e concentração dos valores nutricionais; menor tempo de secagem; diferenciadas propriedades físicas e químicas, o que permite uma ampla gama de aplicações e diferenciadas aplicações no enriquecimento de produtos alimentares.

A elevada umidade dos resíduos agroindustriais pode ocasionar a deterioração por microrganismos. Dentro desse contexto, para a produção de farinha constituída por resíduos agroindustriais, deve-se primeiramente reduzir o teor de água, o qual pode ser realizado submetendo-os à secagem.

A secagem é uma das operações mais estudadas pelos pesquisadores no setor alimentício por se constituir na remoção da água, inibindo o crescimento de microrganismos e evitando a ocorrência de reações químicas. Possui elevada aplicação comercial na preservação de alimentos devido à simplicidade e ao baixo custo operacional, quando comparado a outros métodos preservativos como a centrifugação, o enlatamento, os tratamentos químicos e a irradiação.

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção da umidade contida no interior do material por meio de evaporação. A secagem pode ocorrer via convecção forçada de ar previamente aquecido, de modo que o aumento da temperatura do material a ser desidratado promove a evaporação da água, enquanto que a circulação do ar remove a umidade evaporada.

Dentre os parâmetros que promovem alterações na transferência de calor citam-se: as condições operacionais (temperatura, umidade, fluxo e direção de ar), as variáveis do leito (pressão) e as relacionadas à partícula (área de exposição do sólido e forma física). Fatores como natureza física da partícula, temperatura e conteúdo de umidade influenciam o movimento interno da umidade no material sólido e consequentemente a transferência de massa.

Segundo Pallai-Varsányi et al. (2007) o processo de secagem é uma tecnologia que afeta significativamente a qualidade do produto final e possui elevado consumo energético. A seleção adequada do método de secagem depende ainda da umidade requerida no produto final. Segundo o autor, aspectos econômicos e de projeto são relevantes no processo de secagem, pois afetam os custos de operação.

Estudos e pesquisas sobre caracterização e secagem de resíduos agroindustriais, em especial, os de fruticultura, tem sido realizados e de modo expressivo têm contribuído na minimização de impactos ambientais.

Os resíduos do processamento de sucos de maracujá amarelo constituídos de cascas, sementes e bagaços, por apresentarem um elevado teor de açúcares são muito susceptíveis ao desencadeamento de processos fermentativos. Dentro desse contexto, Ferreira e Pena (2010) realizaram a desidratação desses resíduos em estufa de bandejas com recirculação de ar. Após caracterização da farinha resultante, obtiveram-se elevados teores de fibras brutas totais e devido à isenção de toxidade microbiológica, a mesma pôde ser empregada na complementação nutricional requerente de fibras.

A presença de substâncias como fibras, vitaminas ou polissacarídeos tem contribuído no desenvolvimento de diversas pesquisas com resíduos agroindustriais. Monteiro et al. (2010) realizaram estudos de secagem do mesocarpo de maracujá por apresentar considerável teor de pectina e fibra solúvel, a qual atua na redução das taxas de glicose e colesterol.

A secagem em leito de jorro tem sido utilizada como objeto de estudo de diversos trabalhos devido ao seu elevado potencial de aplicação. Dentre os estudos destaca-se o realizado por Silva (2010) com resíduos de limão siciliano, que confrontou a secagem em

leitos fixo e de jorro, obtendo-se valores de difusividade efetiva a citar: 4,72 a $14,6 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ em leito fixo e 26,4 a $42,6 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ para a secagem realizada em leito de jorro.

Pesquisas envolvendo resíduos de acerola vêm sendo desenvolvidas com objetivo de aproveitar bagaços e sementes, uma vez que os mesmos possuem elevados teores nutricionais de vitamina C e de compostos bioativos. Moreira (2007) na tentativa de reduzir a degradação de ácido ascórbico e antocianinas promoveu o encapsulamento do bagaço de acerola por atomização, para uso futuro na indústria como ingrediente funcional com propriedades antioxidantes. Resultados semelhantes foram obtidos por Tanaka (2007) em estudos de desidratação de suco de acerola microencapsulado realizados por meio de atomização, onde obteve uma redução na degradação de 80,65% no teor ácido ascórbico. Estudos de secagem de acerola foram também realizados por Almeida et al. (2009) através da avaliação da cinética de secagem desta fruta em leito fixo. Após análise dos efeitos da temperatura e da velocidade do ar de secagem concluiu-se que apenas a temperatura exerceu, nas condições aplicadas (40 a 60°C), significativo efeito na cinética de secagem da acerola.

A secagem e consequente obtenção de passas de acerola em secadores de bandeja precedidas por desidratação osmótica foi conduzida por Jesus et al. (2003), sendo que os resultados indicaram que a secagem se mostrou mais rápida em condições de temperatura alta (80°C), no entanto, nestas condições obteve-se elevada degradação de vitamina C, com perdas superiores a 60 %.

Pesquisas envolvendo a secagem de bagaços de acerola em leito de jorro também foram realizadas por Borges (2011) que constatou a presença expressiva de compostos fenólicos totais e antocianinas, em teores da ordem de (2399,5 a 3074,6 mg/100 g) e (104,2 a 270,4 mg/100 g), respectivamente, em função do extrato utilizado. Tais resultados indicam que esse resíduo pode ser considerado uma valiosa fonte de compostos bioativos. Presenças significativas de ácido ascórbico 2748,03 mg/100 g foram detectadas no bagaço desidratado, com perdas de apenas 11% durante a secagem.

Borges (2011) verificou ainda a capacidade antioxidante e antienzimática do bagaço seco obtendo-se, respectivamente, valores entre as faixas (30,08 a 35,37)% e (29,86 a 44,93)%, variações essas ocasionadas pelo uso de extratos distintos. Os resultados obtidos apontam a capacidade antioxidante do resíduo seco. Os bagaços desidratados apresentaram também elevados teores de fibras e proteínas e baixos teores de gordura.

Desidratações de resíduos de acerola, constituídos apenas pelas sementes foram realizadas por Bortolotti (2012) em leito de jorro utilizando grãos de soja como material

inerte, visando melhorias na escoabilidade do material. Em condições de fração mássica de acerola de 40% e altura de leito estático de 8 cm, a secagem promoveu acréscimos dos teores de ácido ascórbico. Já para os compostos bioativos, fenólicos e flavonoides, foram obtidos aumentos seguidos por decréscimos, dependendo do tempo de secagem adotado.

2.6 A secagem precedida por pré-tratamentos

A secagem precedida por pré-tratamentos tem sido, recentemente, avaliada por vários autores obtendo-se resultados favoráveis no estudo da desidratação de frutas (FERNANDES; RODRIGUES, 2007; NUÑEZ-MANCILLA et al., 2013; AADIL et al., 2013; GAMBOA-SANTOS et al., 2013 e RODRÍGUEZ et al., 2014). Dentre os pré-tratamentos aplicados à secagem destacam-se o ultrassom, a desidratação osmótica, e a desidratação mecânica. Técnicas essas aplicadas visando a redução do conteúdo de água inicial, a modificação da estrutura do tecido das frutas, ou a redução do tempo total de secagem.

Ultrassons são ondas mecânicas que se propagam através de qualquer meio material e que possuem frequências maiores que 18 kHz. A propagação se faz por meio de ciclos sucessivos de compressão e rarefação (CHEN et al., 2011).

Neste âmbito, o ultrassom representa uma nova forma de exploração de energia limpa, que pode ser utilizada pelas indústrias de diferentes segmentos, dentre os quais, o alimentício. Esta tecnologia vem sendo empregada na melhoria do processamento direto de alimentos, tais como limpeza de superfícies; aumento da desidratação; filtração; inativação de microrganismos e enzimas; extração de enzimas, proteínas e compostos antioxidantes; ruptura de células; desgaseificação de alimentos líquidos e aceleração da transferência de calor (KNORR et al., 2004).

O pré-tratamento ultrassônico se baseia na imersão do alimento em água ou solução hipertônica, na qual se realiza a sonicação. Segundo Chen et al. (2011) o aumento de perda de umidade do fruto sujeito ao processo de pré-tratamento por ondas ultrassônicas se deve à ocorrência de uma série rápida de formação, crescimento e colapso de bolhas de dimensões micrométricas, fenômeno esse denominado por cavitação.

A cavitação acústica pode promover alterações físicas e químicas no meio irradiado. Com os colapsos das bolhas de cavitação ocorre a liberação de grande quantidade de energia para o meio, proporcionando na microzona onde ocorreu o colapso, o aumento da temperatura

da ordem de alguns milhares de graus centígrados e da pressão para centenas de atmosferas (SUSLICK, 2003).

No entanto o colapso cavitacional em sistemas heterogêneos, constituídos por sólido-líquido ocorre de modo assimétrico. Se a cavitação acústica ocorre prolongadamente e próxima à superfície sólida, o colapso cavitacional é não esférico dando-se na forma de jatos de líquido de alta velocidade sobre a superfície sólida. A associação entre os jatos e as ondas de choque pode danificar substancialmente a superfície expondo-a e causando mudanças em sua morfologia, composição e reatividade (SUSLICK, 2003).

Chen et al (2011) acrescenta que a aplicação de ondas ultrassônicas em sistemas heterogêneos promove a criação de canais microscópicos que reduzem a camada limite difusiva e aumenta a transferência convectiva de massa, conduzindo a um processo de secagem mais rápido.

Costa et al. (2013) em estudos sobre os efeitos da intensidade e do tempo de sonicação avaliaram as características físico-químicas de suco de abacaxi sonicado. Os efeitos foram avaliados por análise de superfície de resposta para as variáveis: atividade enzimática, teor de proteína, conteúdo fenólico, viscosidade do suco e aumento da temperatura. Concluíram que períodos de processamento de 4 a 5 min resultaram em atividade residual enzimática máxima. Verificaram ainda que o aumento da intensidade de sonicação altera de modo significativo os níveis de atividade enzimática. A intensidade ultrassônica mostrou efeito negativo quadrático sobre a concentração de proteína, ou seja aumento da intensidade do ultrassom resultou em perdas proteicas. Entretanto, os efeitos do tempo e da intensidade de sonicação não promoveram efeitos significativos sobre os teores de compostos fenólicos do suco de abacaxi.

Trabalhos realizados por Nascimento et al. (2008) e por Rudolf e Resurreccion (2007) destacam que o uso de ultrassom como pré-tratamento de café despulpado e de amendoins, respectivamente, causou o aumento do conteúdo de compostos fenólicos desses produtos. De modo similar, Comarela et al. (2012) no estudo com uvas visando a correlação entre a dosagem ultrassônica e os teores de polifenóis, verificou que a aplicação de ultrassom ao fruto acarretou em aumento no teor de polifenóis totais dos sucos, para todos os tratamentos testados. Concluíram ainda que o grau de resposta ao ultrassom foi influenciado pela dosagem, sendo o tratamento com densidade de potência de 113 W.cm^{-2} e 5 min de exposição, o mais eficiente na promoção da síntese de compostos fenólicos.

Em contrapartida, estudos microscópicos realizados por Rodrigues et al. (2009) com tempo de sonicação de 20 min apontaram que após a sonicação as células de maçãs tornaram-

se severamente distorcidas em algumas regiões densas, apresentando um maior grau de colapso. Verificaram ainda o alongamento das células, bem como a formação de canais e a perda de conteúdo fenólico, fato esse confirmado por microscopia de imunofluorescência. Segundo esses autores, o pré-tratamento induziu a formação de canais microscópicos na estrutura do tecido dos frutos. A formação destes canais microscópicos ocorreu, principalmente, através da destruição das células densas, o que aumentou significativamente quando a solução osmótica foi empregada. A formação de canais microscópicos reduziu também a resistência à difusão de água, e um aumento da difusividade efetiva foi observado durante o processo de secagem com ar.

Com o objetivo de obter um produto seco com baixos teores de açúcar Fernandes et al. (2008) e Oliveira e Rodrigues (2008) averiguaram o uso do pré-tratamento por ultrassom, na desidratação de mamão papaya. O processo envolveu imersão da fruta em pedaços em água onde o ultrassom foi aplicado. Segundo os autores supracitados, o processo ultrassônico oferece a vantagem de ser realizado à temperatura ambiente, reduzindo o potencial de degradação térmica. Neste trabalho, após pré-tratamento, as amostras passaram por processo de secagem. Foram investigadas as variáveis: perda de água, perda de açúcar e difusividade. Realizara-se ainda um estudo comparativo entre a aplicação de ultrassom e sua associação com desidratação osmótica como forma de pré-tratamento, utilizando solução de sacarose a 35°brix. A utilização de ultrassom como um pré-tratamento causou perdas significativas nos teores de açúcar e aumento na difusividade efetiva levando à secagem mais rápida do fruto. De acordo com os autores o aumento da difusividade efetiva faz com que o uso de ultrassom como pré-tratamento seja uma metodologia interessante complementar à secagem clássica.

Resultados similares foram obtidos por Fernandes e Rodrigues (2007) em estudos com secagem de bananas onde verificaram que a aplicação de ultrassom aumentou em 14,4% a difusividade no fruto durante o processo de secagem com ar. Aumentos relevantes também foram obtidos por Fernandes e Rodrigues (2012) em estudos com genipapo em presença de ultrassom, sendo que na condição operacional de 10 min de ultrassom obteve-se um aumento da difusividade efetiva de 42,7% e para o tempo de 20 min, uma elevação de 57,3%.

Nos experimentos realizados com banana, Fernandes e Rodrigues (2007) verificaram que a condição ótima de pré-tratamento encontrada foi a exposição a ultrassom por 22 min, que promoveu uma remoção de 95% do teor de água, e uma redução de 748 min no tempo de processamento total. Em 2012, em estudos com genipapo os mesmos autores encontraram que as melhores condições de operação foram obtidas com o pré-tratamento de ultrassom durante

20 min, obtendo-se a redução de 68 min no tempo total de processamento, para a remoção de 95% de água.

A desidratação por osmose, também tem sido adotada como uma das formas de pré-tratamentos utilizadas na secagem, gerando produtos com maiores teores de açúcares. O processo consiste na imersão dos alimentos sólidos em soluções aquosas concentradas adicionando-se açúcares ou sais. Durante a desidratação osmótica tem-se o fluxo de água do alimento para a solução devido à diferença na pressão osmótica e ainda a transferência simultânea de soluto da solução para o alimento, promovida pelos gradientes de concentração (TORREGGIANI, 1993).

Nos últimos anos a desidratação osmótica tem recebido uma considerável atenção como pré-tratamento porque reduz o consumo de energia e melhora a qualidade do alimento, além de reduzir o tempo de secagem, reter a cor natural e reter aromas temporários durante secagem subsequente (POKHARKAR et al., 1997 citado por FERNANDES et al., 2008).

Experimentos associando a desidratação osmótica e o uso de ultrassom com maçãs foram realizados por Oliveira et al. (2011), onde foram obtidos aumentos da difusividade nos processos de secagem precedidos por tratamentos prévios com ultrassom, tratamentos esses conduzidos tanto na presença de água destilada como em solução osmótica (25°Brix). O uso de ultrassons como pré-tratamento, utilizando água destilada, provocou ainda uma perda de sólidos solúveis do fruto para o meio líquido, reduzindo a quantidade de sólidos solúveis, em especial de açúcar, acarretando em frutas secas com baixos teores de açúcar.

O uso de etanol no auxílio da secagem vem sendo adotado na desidratação de alimentos por se tratar de um composto orgânico o qual é aceito na indústria alimentícia. A aplicação de etanol também foi testada por Lurie et al. (2006) como tratamento alternativo à proliferação de fungos, a fim de impedir a deterioração de uvas durante o armazenamento, mantendo a qualidade do fruto. Pesquisas envolvendo a pulverização de etanol ou o uso de atmosfera modificada resultaram em maiores evaporações de água e na retenção de compostos voláteis (BRAGA, 2007).

Estudos realizados por Braga (2007) utilizando a pulverização de etanol para a secagem de abacaxi resultaram em aumentos da taxa de secagem e menor degradação da cor acompanhada por maior retenção de vitamina C. Resultados similares foram obtidos por Tosato (2012) em pesquisas com a secagem de maçãs pulverizadas por etanol, que obteve redução de cerca de 4% a 35% no tempo de secagem.

A influência do etanol sobre a secagem de bananas foi tema de estudo de Corrêa et al. (2012) que avaliaram os efeitos tanto da pulverização como da atmosfera atomizada de

etanol sobre a difusividade, a coloração e o encolhimento desse fruto. Corrêa et al (2012) relatam que a mistura etanol/água apresenta maior pressão de vapor quando comparada à água, tendo como consequência a redução do tempo de secagem. Os resultados obtidos por Corrêa et al. (2012) indicam que o uso de pulverização de etanol se mostrou mais eficaz do que a atmosfera atomizada, obtendo-se maiores reduções no tempo de secagem e requerendo menores volumes de etanol. Resultados satisfatórios foram também obtidos por Silva (2014) que estudou a pulverização de etanol como pré-tratamento na secagem de sementes de acerola.

2.7. O leito de jorro e a secagem

A secagem, uma das operações unitárias mais utilizadas na indústria alimentícia, vem sendo adotada com êxito na redução da umidade de sólidos, utilizando para tanto secadores do tipo rotatório, leito fluidizado, leito fixo e leito de jorro.

Aplicações práticas do leito de jorro no âmbito alimentício são vastas na literatura: Medeiros (2002) com polpa de frutas tropicais; Mortola et al. (2003) em pesquisas com cebola em pasta e gelatina; Souza (2009) com polpa de frutas; Younes (2010) na secagem de ervilhas verdes e Naracaju (2010) em pesquisas com grãos de café.

Neste âmbito, o leito de jorro tem se mostrado promissor e vem sendo aplicado a processos como secagem, mistura de sólidos, granulação, pirólise, combustão e revestimento de partículas (MATHUR E EPSTEIN, 1974; FREITAS e FREIRE, 2001). O vasto uso desta técnica em pesquisas científicas se deve ao elevado grau de mistura e ao efetivo contato sólido-fluido, resultando em altos coeficientes convectivos de transferência de calor e massa entre as fases.

As elevadas taxas de secagem em leitos de jorro são ainda creditadas aos movimentos cíclicos ocorridos durante o processo. O eficiente contato sólido-fluido se deve a fatores como o movimento concorrente (região central) e contracorrente (região anular), ou seja, é pelo elevado grau de circulação das partículas. Dentro desse contexto, o leito de jorro se caracteriza pela formação de regiões distintas as quais são descritas a seguir e visualizadas na Figura 2.7.

O ar é injetado no leito de jorro por um orifício de entrada localizado na base inferior do tronco de cone, o qual permeia as partículas. A região de jorro se caracteriza pela elevada porosidade no leito onde ocorre o transporte pneumático das partículas com movimento concorrente do material. Na região de fonte, as partículas perdem sua energia cinética, caindo

na região anular. Para colunas cilíndricas, a altura da fonte aumenta com o aumento da velocidade superficial do gás, diminuindo as dimensões do orifício de entrada de ar e diminuindo o diâmetro das partículas.

Na região anular, as partículas que caem da região da fonte se deslizam até a base do leito num movimento contracorrente ao escoamento do gás. Segundo Santos (2011) essa região possui porosidade próxima à do leito estático.



Figura 2.7 - Representação esquemática das regiões no leito de jorro.

Fonte: MATHUR e EPSTEIN (1974)

Devido à alta velocidade das partículas no jorro a secagem em leito de jorro se caracteriza ainda pela promoção do atrito entre partícula/partícula e partícula/parede.

Estudos de secagem de resíduo de acerola em leito de jorro apontam que a sua fluidodinâmica pode ser melhorada pela adição de materiais inertes como: esferas de vidro ou de polietileno. No entanto, a adição desses materiais em processamentos de alimentos não é viável tendo em vista a toxicidade deles, pois um possível desgaste durante o processo poderia contaminar o material processado, o qual se destina ao consumo humano.

Sólidos de caráter alimentício, como grãos de soja, foram utilizados como materiais inertes por Bortolotti (2012) na secagem de sementes de acerola. Características como elevada esfericidade e baixa densidade contribuem para a escoabilidade dessas partículas.

2.7.1 Curva Característica

O jorro, fenômeno visualmente observável, depende da combinação de parâmetros, tais como: velocidade do ar, tipo de sólidos e configuração do leito. A caracterização

fluidodinâmica de um leito de jorro pode ser descrita pela curva característica, ou seja, plotando-se a queda de pressão no leito em função da velocidade/vazão de gás injetado na entrada do leito. A curva característica representa a transição entre leito estático e leito de jorro, onde as etapas descritas a seguir ocorrem à medida que a vazão de ar é aumentada (MATHUR e EPSTEIN, 1974).

A condição de leito estático ocorre quando o gás, em velocidades baixas, atravessa o leito, passando pelos espaços vazios existentes em seu interior, sem promover alterações no arranjo de partículas sólidas. Nessa fase, segmento A-B, a queda de pressão aumenta linearmente com o acréscimo da vazão (Figura 2.8).

Com o aumento da vazão, a queda de pressão no leito continua a crescer, no entanto possui um comportamento não linear. Desse modo, a velocidade do fluido é elevada o suficiente para empurrar as partículas que se encontram nas proximidades do bocal de injeção, formando uma cavidade no leito (segmento B-C da Figura 2.8).

Aumentos de vazões acima do ponto crítico (ponto C) promovem o alongamento da cavidade formada, de modo que o jorro interno passa a oferecer uma menor resistência ao escoamento do fluido no interior da coluna, iniciando-se a fase de decréscimos da queda de pressão no leito, representada pelo segmento C-D da Figura 2.8.

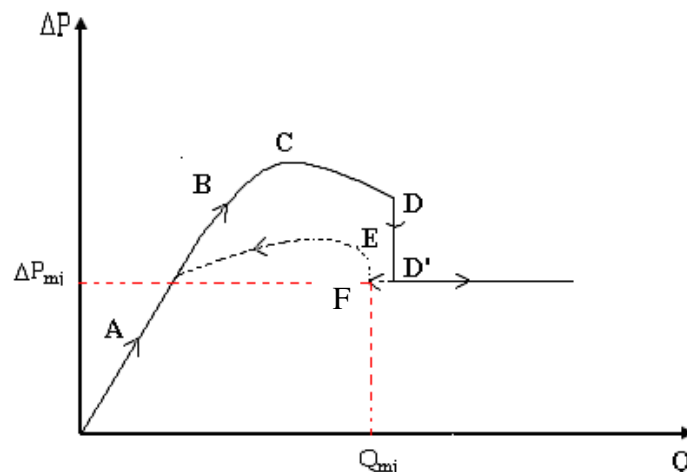


Figura 2.8 Curva típica de queda de pressão em função da vazão de fluido, denominada de Curva característica.

No ponto D, região denominada de jorro incipiente, tem-se a expansão do leito provocada pelo deslocamento de muitas partículas do núcleo central. Oscilações acentuadas de pressão podem ocorrer, devido ao surgimento ocasional do jorro no topo do leito.

Com o acréscimo da vazão acima do ponto D, o jorro interno rompe a superfície do leito, tendo-se como consequência o decréscimo súbito da concentração de sólidos na região

diretamente acima do jorro interno. Tal fenômeno se reflete sobre a queda de pressão e sobre o leito, onde o jorro contínuo é estabelecido.

A partir desse ponto, um novo aumento da vazão do fluido não acarreta mudanças na queda de pressão, uma vez que a quantidade adicional de fluido injetado na coluna tem seu caminho de escoamento na região de jorro, onde é oferecida a menor resistência ao escoamento. A fonte se desenvolve e a circulação de partículas é uniforme, caracterizando o regime de jorro estável.

Realizando-se o processo inverso, ou seja, reduzindo-se o fluxo de gás, o jorro mantém-se até o ponto F da curva característica onde se observa a queda de pressão de jorro mínimo e encontra-se a menor vazão de ar capaz de manter um jorro estável. Continuando com a redução da vazão chega-se ao ponto máximo de queda de pressão em vazões decrescentes (ponto E), que devido ao fenômeno de histerese, não corresponde ao ponto máximo de queda de pressão para vazões de gás crescentes, uma vez que não há mais a necessidade de romper a barreira formada pelo arco de material sólido ao longo do leito.

Dentre os parâmetros que exercem influência sobre a fluidodinâmica da secagem em leito de jorro, destaca-se a velocidade/vazão de mínimo jorro, a qual pode ser obtida através da curva característica. A vazão de mínimo jorro é definida como a vazão mínima do fluido capaz de romper a estrutura do leito de partículas na região central e formar o jorro, a uma pressão considerada constante. Esta pressão constante no interior do leito é definida como a queda de pressão de jorro mínimo (ΔP_{jm}). O parâmetro velocidade de mínimo jorro representa o valor mínimo de velocidade para existência de jorro estável (LOURENÇO, 2006).

A Figura 2.9 ilustra a formação de jorro para a mistura constituída por resíduo de acerola e grãos de soja, à medida que se aumenta a vazão de ar. Verifica-se que inicialmente o ar somente percola o leito (Figura 2.9-a), com o aumento da vazão de ar ocorre a formação de uma cavidade na base do cone (Figura 2.9-b). Após novo acréscimo da vazão de ar, as partículas menores são deslocadas para a parte superior do leito (Figura 2.9-c), obtendo-se a região de jorro estável na Figura 2.9-d.

2.8. Estudo Fluidodinâmico

2.8.1. Parâmetros avaliados

A análise fluidodinâmica no leito de jorro depende da elucidação do comportamento sólido-fluido, ou seja, da compreensão do movimento dos sólidos inseridos no meio fluido.

Portanto, prever as propriedades relacionadas ao movimento de um material granular se torna necessário quando se deseja evitar problemas durante o processo de secagem.

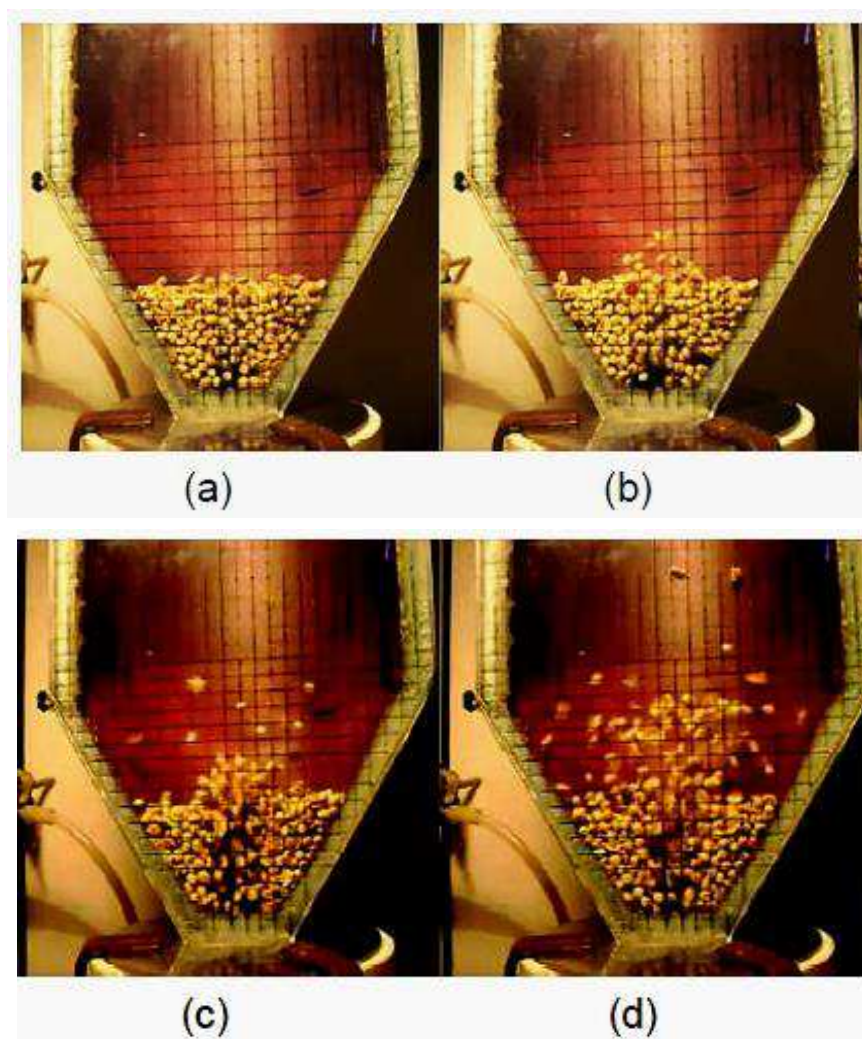


Figura 2.9 - Processo de formação do jorro estável para a mistura constituída de 25% de resíduo de acerola e 75% de soja.

Fonte: Bortolotti (2012)

Problemas de estabilidade fluidodinâmica no leito de jorro são relatados por diversos pesquisadores na secagem de polpas de frutas tropicais utilizando materiais inertes (MEDEIROS et al., 2001), na desidratação de polpas de acerola (LIMA et al, 2000a), de produtos vegetais (MARTINEZ et al., 1995) e de misturas constituídas por sementes de acerola e soja (BORTOLLOTTI, 2012). Em todos esses trabalhos, os autores expõem problemas de acúmulo/segregação de material, com o comprometimento das condições fluidodinâmicas e da estabilidade do leito.

O estudo numérico de propriedades físicas intrinsicamente relacionadas à escoabilidade do material pode contribuir para um melhor entendimento da fluidodinâmica do leito, ajudando a esclarecer problemas correlacionados à instabilidade no leito de modo a evitar transtornos durante a desidratação. Sendo assim, a determinação da fluidodinâmica depende da elucidação de parâmetros que exercem efeitos significativos sobre a escoabilidade do material particulado.

Em se tratando de misturas binárias, além da composição, fatores como características das partículas sólidas e propriedades das partículas inertes (massa específica, esfericidade, ângulos de repouso) também interferem no acúmulo de material no leito. Ishikura et al. (2003) acrescenta que as distinções no tamanho, forma, velocidade terminal e características da superfície do material, ocasionam diferenças no comportamento de cada componente da mistura, podendo causar o fenômeno da segregação. Santos (2011) em estudos sobre a fluidodinâmica de mistura constituída por polietileno e esferas de vidro em leito de jorro, verificou a existência de segregação na mistura creditando tal variação à altura de leito estático e à composição da mistura.

Diversas são as técnicas existentes destinadas à compreensão da escoabilidade do material granular com o objetivo de descrever a fluidodinâmica do sistema. Dentre estas destacam os métodos diretos (SCHWEDES, 1996) que envolvem a observação direta do comportamento das partículas durante o fluxo, como as células de cisalhamento (célula Jenike, células anulares e células triaxiais). Já os métodos indiretos avaliam a fluidodinâmica por meio das propriedades do fluxo. Esses métodos se referem à determinação de parâmetros como: ângulos de repouso estático e dinâmico, empacotamento da mistura, entre outros. Ou seja, parâmetros físicos que interferem de modo expressivo no comportamento fluidodinâmico das partículas dentro de um secador do tipo leito de jorro.

O ângulo de repouso é uma propriedade sensível à coesão, e segundo Ganesan et al. (2008) é um indicador do potencial de fluxo de um material granular. Schulze (2014) define o ângulo de repouso como a inclinação de uma pilha de material granular escoado a partir de um funil e depositado sobre uma placa plana (Figura 2.10). O mesmo autor define o ângulo de repouso drenado e o ângulo de repouso dinâmico.

De acordo com Medeiros (2001) o ângulo de repouso estático avalia a fricção do sólido granular sobre si mesmo, quando se encontra estático. É definido como o ângulo de talude formado com a horizontal na qual o material permanecerá quando empilhado, sendo que o tamanho, forma, teor de umidade e a orientação das partículas, exercem influência sobre esse parâmetro.

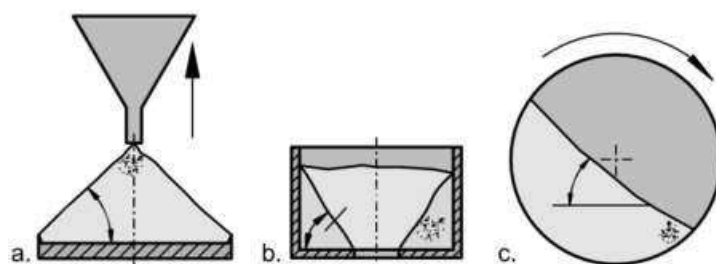


Figura 2.10 - Medidas do ângulo de repouso (a. ângulo de repouso, b. ângulo de repouso drenado e c. ângulo de repouso dinâmico).

Fonte: Schulze (2014)

Zhou (2002) acrescenta que o ângulo de repouso estático é um dos parâmetros macroscópicos mais importantes na caracterização do comportamento de materiais granulares, pois se relaciona a fenômenos importantes, como avalanches, estratificação e segregação. O autor relata ainda que o ângulo de repouso depende fortemente das propriedades do material tais como os atritos de deslizamento e de rolamento e densidade das partículas.

O ângulo de repouso dinâmico, medida que caracteriza a escoabilidade do material, avalia o movimento superficial da partícula e pode ser determinado por meio de uma mesa inclinada ou tambor rotativo (DURY et al., 1998). Quando materiais granulares são colocados em um tambor rotativo, avalanches são observadas (COURRECH DU PONT et al., 2003) e partículas de tamanhos diferentes tendem a segregar nas direções radial e axial (HILL et al, 1997). Segundo Dury et al. (1998) a segregação depende de parâmetros, tais como tamanho, formato, massa, força de atrito e nível de enchimento do tambor.

O leito de jorro é um equipamento que tem sua fluidodinâmica altamente influenciada também pela porosidade do leito estático, parâmetro intrinsecamente ligado ao empacotamento do leito. Leitos com porosidades reduzidas, ou seja, com maior grau de empacotamento oferecem maior resistência à movimentação das partículas, fato esse que interfere na vazão de mínimo jorro e na queda de pressão.

De acordo com pesquisas realizadas por Bortoloti (2012) a estrutura de empacotamento de uma mistura binária não é apenas função da composição desta. Variáveis como forças de fricção que agem sobre as partículas, razão entre os tamanhos e formato dos sólidos, e mecanismo de empacotamento exercem efeitos significativos sobre a segregação no leito. Desta forma, a definição e a análise numérica do empacotamento de misturas binárias é uma condição inicial essencial à modelagem e simulação do leito de jorro.

2.8.2. A modelagem e a simulação computacional

Diante do exposto, a análise por meio de simulações computacionais de propriedades físicas relativas ao movimento granular se torna necessária e pode contribuir para o conhecimento da fluidodinâmica do leito de jorro.

Cabe ressaltar que a realização de experimentos é geralmente uma opção dispendiosa, portanto simulações computacionais podem substituir parcialmente os experimentos. Tais simulações apresentam ainda vantagens como a possibilidade de manipular parâmetros, testar modelos e armazenar informações em todos os instantes de tempo. Além disso, características como redução dos custos e aumento da capacidade de processamento dos computadores reiteram o uso da abordagem fluidodinâmica computacional. Grima et al. (2011) acrescenta que as simulações podem contribuir na confiabilidade de projetos de engenharia e na estabilidade de funcionamento de equipamentos, reduzindo os riscos em suas análises.

A fluidodinâmica computacional se baseia em equacionamentos matemáticos, que se levamos em conta o referencial adotado pelas equações que governam o movimento, duas abordagens podem ser utilizadas: a euleriana e a lagrangeana. Na euleriana onde o domínio espacial é discretizado por um conjunto de pontos que formam a malha computacional, as equações do transporte são solucionadas através de um conjunto de equações algébricas por intermédio de métodos numéricos. Já na abordagem lagrangeana, partículas individuais do fluido são seguidas através do espaço em cada passo de tempo traçando-se a trajetória de cada uma (WOLK, 2003; SPIVAKOVSKAYA et al., 2007).

Dentre os métodos numéricos utilizados na investigação do comportamento das partículas destacam-se Monte Carlo, Cellular Autômato e Método dos Elementos Discretos (DEM), que leva em conta explicitamente os fatores geométricos e as forças envolvidas no sistema (ZHOU et al., 2002).

O Método dos Elementos Discretos é um método numérico que simula o movimento de um número finito de partículas, modeladas por geometrias simples (geralmente esféricas) dentro de um sistema fixo ou móvel variante com o tempo. O método fornece em cada instante, uma descrição detalhada das posições, velocidades e forças agindo em cada partícula assim como nos contornos físicos (MESQUITA et al., 2012). Ou seja, as simulações com DEM fornecem informações dinâmicas das partículas individuais.

A vasta aplicação do DEM no tratamento de materiais granulados se deve ao fato de tratar de um sistema não contínuo, que considera as forças de contato (coesão) e de não contato (eletromagnética, gravidade e capilaridade) entre cada partícula. Cada partícula, no

sistema considerado, pode se mover em movimentos de translação e rotação e tem seu movimento governado pela 2ª Lei do Movimento de Newton (ZHU *et al.*, 2008).

Segundo Nascimento et al. (2007) o DEM se propõe

“ a modelar o material granular por meio de um conjunto de partículas discretas, cujo comportamento é governado por leis físicas e onde os contatos entre elas podem ser criados ou extintos à medida que o conjunto de partículas se deforma como um todo. A representação do meio contínuo como um sistema de partículas discretas ou descontínuas caracteriza-se como um processo altamente dinâmico e com mudanças rápidas da configuração do domínio.”

O método DEM foi desenvolvido por Cundall e Strack (1979) sendo, inicialmente, simplista, mas que com o passar dos anos passou por evoluções, visando à compreensão dos fundamentos do escoamento de materiais granulares (CLEARY, 2010). Nos últimos anos, o método DEM tem se tornado uma poderosa ferramenta para as operações que envolvem material granulado devido à sua dinâmica aplicada às propriedades físicas e mecânicas dos materiais (SANTOS et al., 2012). Com o ajuste dos parâmetros da modelagem os modelos numéricos DEM podem prever resultados importantes para a engenharia pela calibração dos resultados numéricos com o experimental.

Uma das possibilidades e vantagens do método é a visualização virtual dos movimentos das partículas no sistema que se encontra em análise. Desta forma, o DEM está se tornando largamente aceito como um método efetivo de avaliar problemas de engenharia envolvendo materiais granulados especialmente em problemas de escoamento de partículas, tendo assim aplicação em várias áreas como, por exemplo, na estabilidade de taludes (NASCIMENTO et al., 2007), no estudo sobre o efeito da forma das partículas sobre o escoamento (SANTOS, 2012) e na mineração (MESQUITA et al., 2012).

Com relação ao material granular a ser modelado e simulado pelo DEM, o mesmo permite considerar a partícula como macia ou rígida. Na abordagem de partícula macia, os sólidos sofrem pequenas deformações, as quais são usadas na estimativa de forças elásticas, plásticas e de atrito entre os sólidos. Nesta abordagem são estabelecidos os múltiplos contatos entre as partículas, importante na modelagem de sistemas quase estáticos (NASATO, 2011).

Em contrapartida, em uma simulação de partículas rígidas, processa-se apenas uma colisão por vez, e considera a colisão como sendo instantânea, e frequentemente as forças entre partículas não são explicitamente consideradas. Portanto, tipicamente, o método de partículas rígidas é útil em escoamentos granulares rápidos.

Sendo assim, a modelagem do movimento das partículas no DEM consiste na resolução, por meio de integração numérica, da equação estabelecida pela 2ª lei de Newton. As forças e momentos externos agindo em cada partícula são provenientes de: choques entre partículas, choques entre partícula e parede; força gravitacional e forças provocadas pelo fluido no qual às partículas estão contidas.

Nasato (2011) acrescenta que

“uma partícula em um meio granular pode ter dois tipos de movimento: translacional e rotacional. O comportamento macroscópico de um material particulado é controlado pelas interações entre as partículas, assim como interações com um gás ou líquido circundante e paredes. Sendo assim o movimento não é afetado somente pelas forças e torques originados das partículas e fluido da vizinhança imediata, mas também pelo fluido e partículas distantes pela propagação de ondas de perturbação.”

Portanto, no DEM as equações governantes do movimento, de acordo com 2ª lei de Newton para movimento de translação e rotação, são dadas pelas equações 2.1 e 2.2 (ZHU et al., 2008). Estas equações descrevem os movimentos da partícula i em um intervalo de tempo, t , devido a sua interação com outras k partículas ou com a parede.

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j F_{ij}^c + \sum_k (F_{ik}^{nc} + F_i^f + F_i^g) \quad (2.1)$$

$$I_i \frac{dw_i}{dt} = \sum_j (M_{ij}) \quad (2.2)$$

Sendo m_i e I_i a massa e o momento de inércia da partícula i , respectivamente. M_i o torque agindo na partícula i pela partícula j e v_i e w_i as velocidade translacional e angular da partícula i . As forças envolvidas são F_{ij}^c a força de contato, F_{ik}^{nc} a força de não contato que atua na partícula i pela partícula k ou por outras fontes, F_i^f é a força de interação partícula-

fluido sobre a partícula i e F_i^g a força gravitacional. O esquema representativo das forças que agem sobre a partícula é dado pela Figura 2.11.

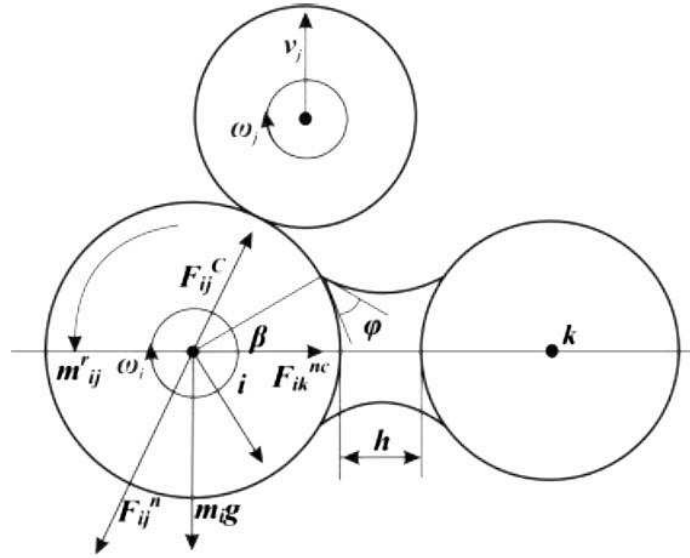


Figura 2.11 - Esquema representativo de forças atuando sobre a partícula i .

(Fonte ZHU et al., 2008).

2.8.2.1. Modelos de forças de contato

O contato entre duas partículas ocorre em uma área finita, onde a distribuição de tração de contato sobre esta área pode ser decomposta em dois planos. Uma componente no plano de contato, isto é no plano tangencial e outra normal ao plano. Desta forma, uma força de contato possui duas componentes, a normal e a tangencial.

A descrição de forma precisa e generalizada da distribuição de tração sobre esta área, e por consequência a força total e o torque agindo em uma partícula, requer a adoção de modelos ou equações simplificadas. Os modelos de força de contato descrevem o comportamento físico de um contato existente. Tuley (2007) acrescenta que a escolha adequada de um modelo implica diretamente na obtenção de resultados realísticos em simulações utilizando DEM.

Geralmente, modelos lineares são mais intuitivos e simples. O modelo linear mais comum é o chamado modelo mola-amortecedor proposto por Cundall e Strack (1979). Neste modelo simples a mola expressa às iterações elásticas, o amortecedor refere-se à lei de amortecimento viscoso responsável pela dissipação de energia no sistema o elemento de atrito representa o atrito de Coulomb e o menisco representa a força de coesão devida à ponte de

líquido (JOHNSTONE, 2010). A Figura 2.12 explicita a representação esquemática deste modelo de forças de contato.

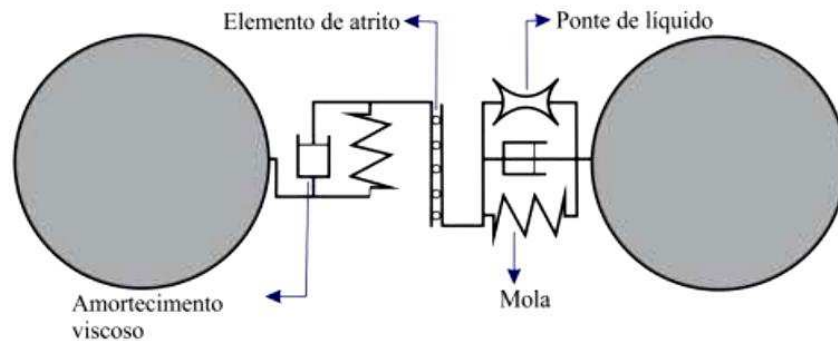


Figura 2.12 - Representação esquemática do modelo de forças do tipo mola-amortecedor.

Vários modelos baseados em teorias foram desenvolvidos para modelagem pelo DEM. A seguir um breve relato sobre os modelos adotados neste trabalho.

2.8.2.1.1 Modelo de contato de Hertz-Mindlin

O modelo de Hertz-Mindlin se baseia nos trabalhos de Mindlin (1949) e de Mindlin e Deresiewicz (1953). É um modelo não linear, cuja mecânica dos contatos pode ser considerada como uma configuração do tipo mola-amortecedor (Figura 2.13). O modelo não inclui forças coesivas, porém pode ser utilizado em conjunto com outros modelos como o de coesão linear e os de ligação.

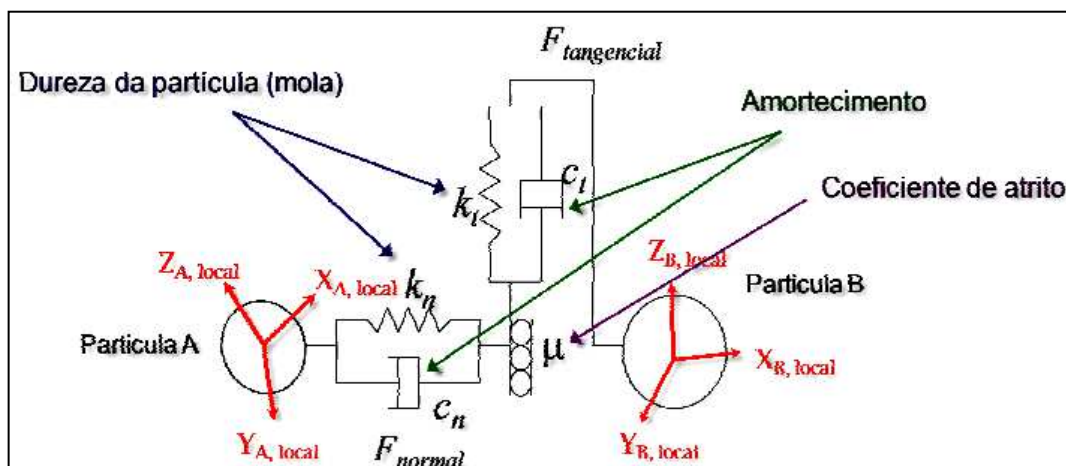


Figura 2.13 - Esquema representativo do modelo de forças adotado por Hertz-Mindlin.

Se ocorrer o contato elástico entre dois corpos esféricos e lisos, de raios R_i e R_j (Figura 2.14) submetidos a um carregamento normal, a partir do modelo de Hertz-Mindlin o raio do círculo de contato, a_0 , será dado pela Equação 2.3.

$$a_0^3 = \frac{3}{4} \pi (K_i + K_j) \frac{R_i R_j}{R_i + R_j} \cdot F_n \quad (2.3)$$

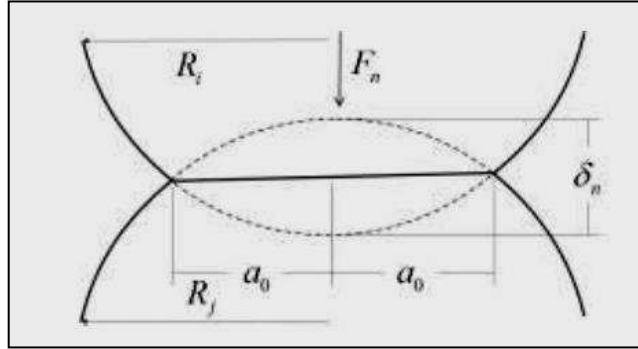


Figura 2.14 - Representação do contato elástico entre duas esferas.

Levando-se em consideração parâmetros que expressam a rigidez da partícula, ou seja, o módulo de Young (Y) também conhecido como módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson (ν), adimensional que mede a deformação de um material homogêneo e isotrópico, as constantes elásticas das partículas K_i e K_j podem ser representadas pelas Equações 2.4 e 2.5.

$$K_i = \frac{1-\nu_i^2}{\pi Y_i} \quad (2.4)$$

$$K_j = \frac{1-\nu_j^2}{\pi Y_j} \quad (2.5)$$

Segundo Carvalho (2013), devido à compressão, dois pontos distantes pertencentes aos corpos em contato podem ser aproximados por uma distância, δ_n , denominada por sobreposição normal, a qual é definida pela Equação 2.6.

$$\delta_n^3 = \frac{9}{16} \cdot \pi^2 (K_i + K_j)^2 + \frac{R_i + R_j}{R_i R_j} \cdot F_n \quad (2.6)$$

Neste modelo, a força normal, F_n , fundamenta-se na Teoria de Contato Hertziana e é tomada como função da sobreposição normal, δ_n , do módulo de Young efetivo Y^* e considerando o raio efetivo, R^* , sendo definida pela Equação 2.7.

$$F_n = \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^*} \delta_n^{3/2} \quad (2.7)$$

Como a teoria Hertziana assume um contato perfeitamente elástico, o modelo acrescenta o efeito da dissipação de energia, através da inclusão de um termo que segue a lei de amortecimento viscoso (CARVALHO, 2013). Dentro desse contexto, a força de amortecimento normal depende da velocidade normal relativa, $v_n^{\overline{rel}}$, sendo dada pela Equação 2.8 onde, S_n e β são rigidez e durezas normais, e , é o coeficiente de restituição e m^* , a massa efetiva (Equações 2.9 e 2.10).

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*}v_n^{\overline{rel}} \quad (2.8)$$

$$S_n = 2Y^*\sqrt{R^*\delta_n} \quad (2.9)$$

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \quad (2.10)$$

Já a componente da força de amortecimento na direção tangencial (Equações 2.11 e 2.12), é uma função de G^* que representa o módulo de cisalhamento, ou módulo de torção o qual é dado em Pascal (Pa) e estabelece uma relação entre a tensão de cisalhamento aplicada ao corpo (σ) e a sua deformação específica.

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*}v_t^{\overline{rel}} \quad (2.11)$$

$$S_t = 8G^*\sqrt{R^*\delta_n} \quad (2.12)$$

As forças tangenciais são estimadas baseadas na sobreposição tangencial (δ_t) e na rigidez tangencial (S_t) dada pela equação:

$$F_t = -2S_t\delta_t \quad (2.13)$$

A força tangencial é limitada pelo atrito de Coulomb $\mu_s F_n$, e o atrito de rolamento é estimado aplicando um torque às superfícies de contato de acordo com a equação:

$$M_i = -\mu_r F_r R_i w_i \quad (2.14)$$

Dentro desse contexto os parâmetros de entrada do material da partícula e da parede descritos na Tabela 2.6 e os parâmetros relacionados à interação entre as partículas são fornecidos (Tabela 2.7) e, a partir destes calculam-se as forças e torques pelo modelo de forças adotado. Em seguida as Eqs. (2.1) e (2.2) são resolvidas numericamente. Desta forma,

as trajetórias e velocidades são resolvidas para um determinado instante de tempo. Para o incremento de tempo seguinte, as ações externas são novamente encontradas e as respostas (deslocamento e velocidade) são novamente determinadas. E este processo repete-se durante toda a análise.

Tabela 2.6 - Parâmetros de entrada para os materiais da partícula e da parede.

Propriedades do material	Unidades
Massa específica (ρ)	[kg/m ³]
Coefficiente de Poisson (ν)	[-]
Módulo de cisalhamento (G)	[Pa]

Fonte: DEM Solutions 2011

Tabela 2.7 - Parâmetros de entrada para as interações entre partículas e partícula parede.

Propriedades de interações	Unidade
Coefficiente de atrito estático (μ_e)	[-]
Coefficiente de Restituição (e)	[-]
Coefficiente de atrito de rolamento (μ_r)	[-]

Fonte: DEM Solutions 2011

Silvério (2012) destaca por meio de uma tabela os parâmetros de entrada adotados por outros autores na análise de forças de contato. Verifica-se na Tabela 2.8 apresentada pela autora o *time step* utilizado em cada simulação bem como o número de partículas. Observa-se na Tabela 2.8, que os valores encontrados para os parâmetros dos modelos utilizados nos trabalhos de simulação DEM, variam expressivamente. Tal fato se justifica pela variabilidade de equipamentos, os quais podem conduzir a diferentes respostas de colisões partícula-partícula e partícula-parede. Sendo assim verifica-se a importância em se estudar a influência e a interação dos parâmetros do modelo utilizados na simulação DEM, para encontrar um melhor conjunto de parâmetros que melhor caracterize o sistema em estudo.

2.8.2.1.2 Modelo de coesão JKR

O modelo de coesão JKR é referenciado pelas iniciais dos nomes Johnson-Kendall-Roberts, de 1971. Este modelo pode ser considerado como uma extensão do modelo do Hertz-Mindlin no qual foram realizadas alterações na força normal, mantendo-se, no entanto, a mesma formulação para força tangencial.

O modelo JKR inclui a coesão através da Energia de superfície (τ), dada em J/m² (CARVALHO, 2013). Destaca-se que esse parâmetro introduz tanto as energias de superfícies para as forças de van der Waals em pós finos e secos como para as forças das pontes de líquidos em meios úmidos .

Tabela 2.8 - Parâmetros utilizados nos modelos DEM em vários trabalhos da literatura (SILVÉRIO, 2012).

Autores	Equipamento	Material	d_p (mm)	ρ (kg/m³)	n° partículas	Coefficiente de restituição	Coefficiente de atrito rolamento	Time Step (s)
NEUWIRTH <i>et al</i> (2012)	leito fluidizado	Polímero	6	1800	5900	0,83 e 0,85	0,25 e 0,32	-
REMY <i>et al</i> (2011)	Misturador	esfera de vidro	2 a 4	2200	14000 a 20000	0,6	0,5	-
CHAUDHURI <i>et al</i> (2010)	Calcinador	Tanoeiro	2	8900	8000	0,8	-	3. 10 ⁻⁶
ANAND <i>et al</i> (2009)	Hopper	esfera de aço	2,35	7850	6790	-	0,2	-
GENG <i>et al</i> (2009)	secador rotatório	cilindros de alumínio	2	2700	-	0,02	0,2 e 0,3	10 ⁻⁵
FRIES <i>et al</i> (2012)	leito fluidizado	Alumina	2	1500	25.10 ⁴	0,8	0,1	10 ⁻⁶
JIANG <i>et al</i> (2011)	tambor rotativo	esfera de vidro	1,5 a 3	2600	15000	0,9	0,3	5. 10 ⁻⁵
KETTERHAGEN <i>et al</i> (2008)	Hopper	esfera de vidro	0,5 a 2,24	2500	35500	0,94	0,1 e 0,15	-
LI <i>et al</i> (2012)	leito fluidizado	sementes de papoula	1,2	1000	9240	0,98	0,1	-
LI <i>et al</i> (2013)	leito de jorro	esfera de vidro	4,04	2526	44,8	0,87	0,1	-
LI <i>et al</i> (2009)	Hopper	esfera de vidro	10	2460	-	-	0,15; 0,13	1,14. 10 ⁻⁶
ZHONG <i>et al</i> (2006)	leito de jorro	-	1,5 a 3,0	1020	62000	0,9	0,3	10 ⁻⁶
SAHNI <i>et al</i> (2011)	-	-	-	1600	4.10 ⁴ a 10 ⁵	0,7	0,7	2. 10 ⁻⁶
REN <i>et al</i> (2012)	-	Milho	6,6 e 6,4	1385	23956 e 26482	0,59	0,34	1. 10 ⁻⁶
STEFAN RADL <i>et al</i> (2010)	Misturador	esfera de vidro	3	2500	-	0,98; 0,8, e 0,7	0,5	-
REMY <i>et al</i> (2011)	Misturados	-	2 a10	2200	14000 e 20000	0,6	-	< 10 ⁻⁵
LU <i>et al</i> (2008)	-	-	2	2508	1000	0,93	0,5	10 ⁻⁶

A definição de energia de superfície representa, segundo Fischer e Cripps (2000) citado por Santos (2013), o potencial que uma superfície tem para realizar uma ligação química com outros átomos, isto é, a energia potencial da camada superficial dos átomos. Nos líquidos essa ligação se manifesta por meio da tensão superficial.

Nos sólidos, entretanto, os efeitos da tensão superficial não são facilmente observáveis, pois os sólidos não se deformam com a mesma percepção que em líquidos.

No EDEM, *software* comercial que utiliza o método DEM, essa energia pode ser configurada para as interações partícula-partícula e partícula-geometria. Portanto, a coesão Johnson-Kendall-Roberts (1971) acrescenta ao modelo de Hertz-Mindlin forças de natureza adesiva, seja ela forças de van der Waals, de coesão, adesão, tensão superficial, força capilar, eletrostática, magnética ou ponte de líquido.

Quanto aos locais de atuação dos modelos, a Figura 2.15 mostra que o modelo simplificado de Hertz atua no ponto de contato enquanto que o modelo de Coesão de JKR considera a área de contato sobreposta. No EDEM, para a interação partícula-geometria, este modelo quantifica a interação da partícula com qualquer parte da geometria.

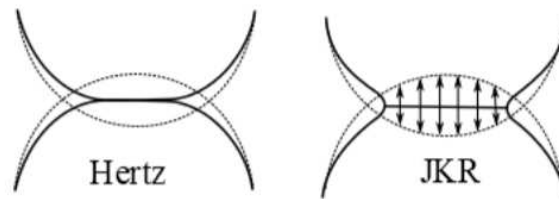


Figura 2.13 - Representação simplificada entre duas partículas esféricas.

A Figura 2.16 mostra o contato elástico adotado pelo modelo entre duas partículas de raio R_i e R_j tanto na presença como na ausência de forças de superfície, onde o raio da superfície de contato entre as duas partículas na ausência e na presença de forças de superfície é dado por a_0 e a_1 , respectivamente.

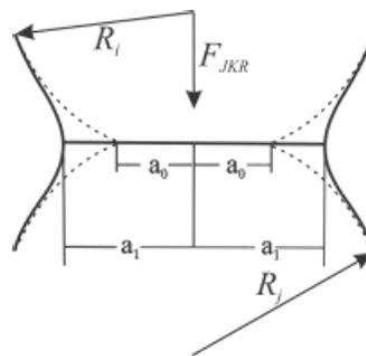


Figura 2.14 - Esquema representativo do contato elástico entre duas partículas esféricas.

Dentro desse contexto a equação para força normal, F_{JKR} é dada pelas Equações 2.15 e 2.16, onde τ é a energia de superfície ou tensão superficial e a é o raio de contato entre partículas sobrepostas.

$$F_{JKR} = -4\sqrt{4\pi\tau Y^*} a^{3/2} + \frac{4 Y^*}{3 R^*} a^3 \quad (2.15)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R^*} - \sqrt{4\pi\tau \frac{a}{Y^*}} \quad (2.16)$$

O modelo JKR permite o cálculo de forças de coesão ainda que as partículas não estejam em contato físico. A distância máxima, δ_c , permitida entre duas partículas para que a força de coesão seja diferente de zero é dada nas equações:

$$\delta_c = -\sqrt{4\pi\gamma \frac{a_c}{Y^*}} + \frac{a_c^2}{R^*} \quad (2.17)$$

$$a_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^{*2}}{2Y^*} \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{1/3} \quad (2.18)$$

CAPÍTULO 3

Caracterização Química e Física dos Materiais

As propriedades físicas, químicas e nutricionais do resíduo de acerola são parâmetros definidores da qualidade importantes em um processo de secagem, uma vez que a desidratação pode acarretar a degradação desses compostos ou a desnaturação proteica. As caracterizações físicas do resíduo de acerola e da soja (inerte) também possuem significativa importância no estudo da secagem em leito de jorro, pois parâmetros como esfericidade e massa específica influenciam na fluidodinâmica do processo. Os dados físicos são também relevantes na análise numérica de parâmetros determinadores do comportamento fluidodinâmico da secagem, dentre eles: os ângulos de repouso estático e dinâmico e a porosidade do leito estático. Diante do exposto, neste capítulo são apresentadas as metodologias e os resultados obtidos para a caracterização física e química dos materiais utilizados no presente estudo.

3.1 MATERIAL E MÉTODOS

3.1.1 Materiais

O resíduo de acerola (sementes), objeto de estudo desta pesquisa, foi cedido pela Nettare Indústria Comércio Importação e Exportação de Alimentos LTDA., empresa vinculada ao processamento de frutas, ou seja, destinada à produção de polpas, situada na cidade de Uberlândia-MG. Após coleta, as sementes foram acondicionadas em embalagens de 1 kg e conservadas sob refrigeração em *freezer* a aproximadamente -18°C.

As amostras destinadas à secagem foram divididas em lotes previamente homogeneizados. Em seguida, as amostras foram acondicionadas em embalagens plásticas e envoltas por papel alumínio, evitando-se a exposição à luz e conservadas sob refrigeração. Para realização da secagem ou do pré-tratamento, as amostras foram retiradas do *freezer* e colocadas na geladeira até completo descongelamento.

A soja, material inerte utilizado no auxílio fluidodinâmico do processo, da variedade Brazilian BRS foi adquirida no comércio local da cidade de Uberlândia.

A Figura 3.1 ilustra os materiais utilizados nesse estudo, em que se percebe que a semente de acerola não apresenta vestígios de polpa, o que demonstra a eficiência do despolpamento realizado na empresa.



(A)

(B)

Figura 3.1 - Imagens dos materiais utilizados no presente estudo (A) resíduo de acerola
(B) grãos de soja.

3.1.2 Umidade

A determinação de umidade foi realizada pelos métodos estufa à 105°C por 24 h e pelo secador infravermelho IV 2500 da GEHAKA. Desvios inferiores a 2% foram obtidos, quando as metodologias adotadas foram confrontadas. Dentro desse contexto optou-se pela análise em secador infravermelho por permitir a obtenção de resultados rápidos e confiáveis de percentagem de umidade. O infravermelho IV 2500 da GEHAKA (Figura 3.2) é equipado com emissor infravermelho, sensor de temperatura do tipo Platina (PT1000) e prato de alumínio descartável, sobre o qual é colocada a amostra. A sensibilidade da balança acoplada ao equipamento é de 0,001 g.

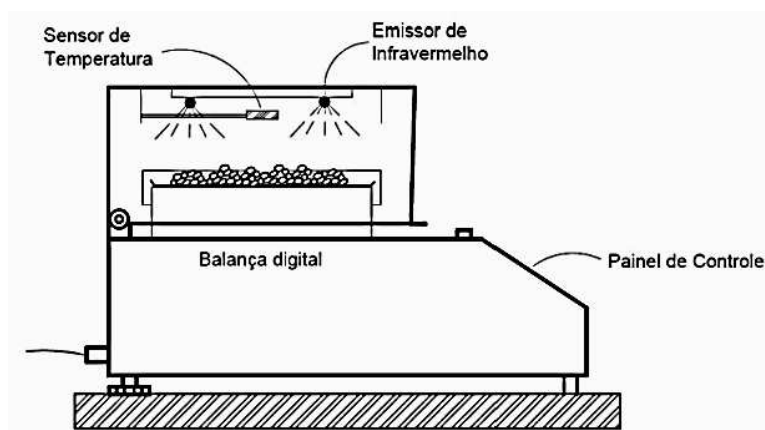


Figura 3.2 - Esquema ilustrativo do secador infravermelho.

3.1.3 Massa Específica Real

Para determinação da massa específica real, as sementes foram previamente secas em estufa à $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 h, e colocadas em dessecador até que atingissem temperatura ambiente. A análise utilizando o picnômetro a gás Hélio da marca MICROMERITICS, modelo ACCUPYC 1330 foi realizada após a trituração das sementes em liquidificador.

3.1.4 Massa Específica Aparente dos materiais

Para determinação da massa específica aparente foram utilizadas as sementes *in natura*. A técnica utilizada foi a picnometria adotando-se éter de petróleo de massa específica de 635 kg.m^{-3} .

3.1.5 Diâmetro da Partícula

Para obtenção do diâmetro médio de Sauter, a amostra *in natura* foi submetida ao peneiramento utilizando o conjunto de peneiras de 3/8, 1/4 e 6 mesh.

3.1.6 Esfericidade

A esfericidade das sementes de acerola foi calculada utilizando o equipamento HAVER-CPA 3-2 (analisador foto-óptico de partículas). No entanto, para a soja considerou-se esfericidade de 0,9 (BARROZO, 1995).

3.1.7 Ângulo de repouso estático (φ)

O ângulo de repouso estático foi determinado colocando-se o material em cilindro contendo uma das extremidades abertas, apoiando-o em superfície lisa e levantando-o, deixando as partículas caírem sob o efeito da gravidade. Após a formação do cone foram registradas as imagens, através da máquina fotográfica digital SONY modelo DSC-W35/W55, sendo então determinados os ângulos de repouso estático por meio de análise das imagens obtidas (Figura 3.3). Todos os ensaios foram realizados em triplicata.

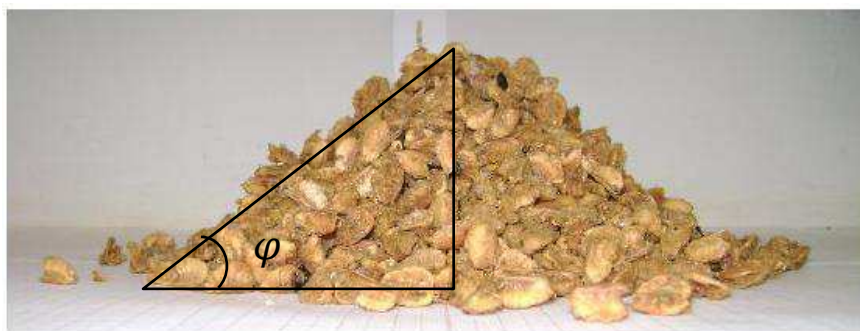


Figura 3.3 - Imagem ilustrativa do ângulo de repouso estático de sementes de acerola.

3.1.8 Ângulo de repouso dinâmico (ϕ)

A metodologia experimental para determinação do ângulo de repouso dinâmico empregou tambor rotativo acrílico de formato cilíndrico de 0,1 m de diâmetro, cujo aparato experimental é mostrado na Figura 3.4.



Figura 3.4 - Aparato experimental utilizado na determinação do ângulo de repouso dinâmico.

O ensaio consistiu em preencher 50% do volume do tambor e rotacionar o cilindro à velocidade constante, obtendo-se deste modo, o ângulo de repouso dinâmico através da análise de imagens obtidas conforme Figura 3.5. Além dos materiais puros, misturas contendo frações em massa entre 10 a 90% de acerola foram avaliadas experimentalmente quando submetidas à velocidade de rotação de 20,1; 25,2 e 38,1 rpm. Os ensaios experimentais foram realizados em triplicata.

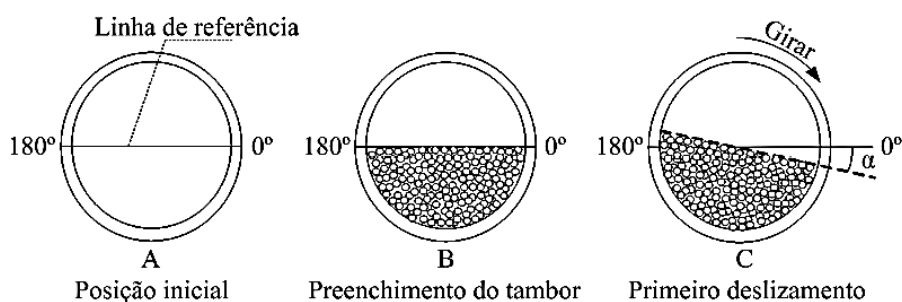


Figura 3.5 - Esquema ilustrativo para determinação do ângulo de repouso dinâmico.

Fonte: POZITANO; ROCHA (2011)

3.1.9 Análise dos Compostos

As análises dos compostos bioativos foram realizadas na ausência de luz reduzindo-se os riscos de degradação. As amostras *in natura* foram avaliadas mediante descongelamento

prévio. No entanto, para caracterização das amostras resultantes da desidratação, procedeu-se o acondicionamento dessas em embalagens plásticas envoltas por papel alumínio, seguidas por armazenamento em geladeira à $\pm 8^{\circ}\text{C}$, até o momento das análises.

Para determinação dos teores, as amostras foram previamente trituradas, pesadas em balança analítica com precisão de 0,0001 g da SHIMADZU modelo AY220. Para os ensaios envolvendo titulação (acidez e ácido ascórbico) o extrato foi obtido por meio da maceração com água destilada.

O metanol foi utilizado como extrator para os ensaios de fenólicos e flavonoides, o qual foi colocado com as sementes trituradas em um tubo com tampa e agitado em vortex QL-901 da BIOMIXER por 3 min. Após a agitação, a mistura foi armazenada em local escuro por 1 h, sendo posteriormente centrifugada em centrífuga KC4 da KINDLY, a 4000 rpm por 8 min. Ressalta-se que todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.1.9.2 Determinação da acidez titulável total

O teor de acidez titulável total das amostras foi realizado de acordo com os métodos da AOAC (1995), utilizando hidróxido de sódio 0,1 N para as titulações dos extratos. Os resultados foram expressos em g de ácido cítrico/100 g amostra seca.

3.1.9.2 Determinação de ácido ascórbico

O conteúdo de ácido ascórbico foi determinado por titulometria, através da redução do 2,6-diclorofenol-indofenol pelo ácido ascórbico. Nesta análise, o extrato dos resíduos provenientes da maceração foi misturado com ácido oxálico, na proporção de 50 mL de extrato para 50 mL de ácido oxálico. Os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico/100 g de amostra seca (AOAC, 1995).

3.1.9.3 Determinação de compostos fenólicos totais

O teor de fenólicos totais foi determinado pelo método de *Folin-Ciocalteu*, utilizando ácido gálico como padrão (SINGLETON; ROSSI, 1965). O reagente de *Folin Ciocalteu* é uma solução de íons complexos poliméricos que oxida os fenolatos, reduzindo os ácidos a um complexo azul Mo-W. A leitura da absorbância foi realizada a 622 nm. A curva analítica foi construída utilizando o ácido gálico como padrão. Os resultados foram expressos em mg de ácido gálico/100 g de amostra seca.

3.1.9.4 Determinação de compostos flavonoides totais

A extração dos flavonoides foi realizada 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 450 nm.

Este método utiliza o AlCl_3 como agente de deslocamento visando à redução da interferência de outros compostos na leitura da absorbância 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 seca.

3.1.10 Composição Nutricional

A composição química nutricional realizada através dos parâmetros teor de cinzas, proteína e extrato etéreo, foi conduzida no Laboratório de Bromatologia localizado no UNIPAM (Centro Universitário de Patos de Minas), sendo as análises realizadas em triplicata.

3.1.10.1 Cinzas

A determinação do resíduo mineral (cinzas) foi realizada segundo o Instituto Adolfo Lutz (1985), pela incineração da amostra em mufla à temperatura de 550°C, seguida pelos processos de resfriamento em dessecador e pesagem até obtenção de peso constante.

3.1.10.2 Proteínas

A concentração de proteína bruta foi determinada pela quantificação de nitrogênio total da amostra utilizando método de Kjeldahl, seguindo as normas analíticas do AOAC (1990). A análise constitui-se pela pesagem da amostra, adição de mistura catalítica (90% de sulfato de potássio e 10% de sulfato de cobre) e 10 mL de ácido sulfúrico, seguida por digestão no digestor da MARCONI modelo MA4025.

Posteriormente, 2 mL de água destilada foram adicionados em cada tubo. As amostras foram alcalinizadas com a adição de 25 mL de solução de hidróxido de sódio a 40% e destiladas em destilador de nitrogênio da FORLAB modelo FL74. Frascos de erlenmeyer contendo 10 mL de solução de ácido bórico receberam a solução destilada até completar um volume de 75 mL, sendo esta titulada com solução de ácido clorídrico a 0,1 N. O resultado foi multiplicado pelo fator de conversão estabelecido pela Legislação Brasileira (Resolução RDC n. 360 de 23 de dezembro de 2003, da ANVISA), correspondentes a 6,2 para proteínas vegetais.

3.1.10.3 Extrato etéreo (Lipídios)

A extração dos lipídios totais foi realizada através da extração etérea por fluxo intermitente, utilizando o éter etílico como solvente orgânico sob refluxo em aparelho Soxhlet, considerando as normas analíticas descritas pela AOAC (1990). A extração foi realizada por um período de 3 h. Em seguida, os cartuchos foram removidos do extrator e seco em estufa à 105°C, por 30 min. Logo após, foram acondicionados no dessecador até atingirem temperatura ambiente quando então foram pesados.

3.1.10.4 Fibras

A determinação de fibras se fez por meio de digestão ácido-básica utilizando ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, ambos a 1,25%. Seguido por filtração e lavagem com água, etanol e acetona. A análise baseia-se ainda na secagem e incineração à 250°C do cadinho contendo a amostra, conforme metodologia proposta por Silva (2004).

3.1.11 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises de microscopia foram realizadas pelo microscópio eletrônico de varredura (MEV) da CARLZEISS, modelo EVOMA10, após as amostras terem sido fixadas nos *stubs* e metalizadas com ouro no metalizador LEICA modelo SCD050. O MEV foi regulado a uma distância focal de 9,5 mm, voltagem de aceleração de 10 kV e as amostras sofreram ampliações entre 36 a 1000 vezes.

Para conservação do tecido estrutural e fixação das amostras que apresentavam elevado teor de umidade (amostras *in natura* e as submetidas aos pré-tratamentos) realizou-se a desidratação prévia utilizando solução Karnovsky constituída por paraformaldeído, glutaraldeído e solução tampão de fosfato (pH entre 7,2 e 7,4).

Em seguida as amostras foram lavadas com água destilada e submetidas a soluções de concentração crescente de acetona (30, 50, 70, 90 e 100%) permanecendo cerca de 10 min em cada uma. Ao término da desidratação, realizou-se a secagem em ponto crítico utilizando para tanto, o dióxido de carbono gasoso. A secagem se fez no aparelho de ponto crítico da BALZERS modelo CPD-020.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.2.1 Caracterização química do resíduo de acerola

Na Tabela 3.1 são apresentados os resultados de caracterizações químicas da semente de acerola *in natura*, parâmetros definidores de sua qualidade nutricional. Destaca-se que os resultados são médias aritméticas dos diversos lotes avaliados no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa. Nota-se pelos desvios padrões que existem diferenças significativas entre os lotes.

Tabela 3.1 - Características químicas do resíduo de acerola *in natura*.

Propriedades	Sementes de acerola <i>in natura</i>
Umidade (%)	71,8±1,3
Acidez (mg de ácido cítrico/100 g amostra seca)	1388,1±168,4
Teor de ácido ascórbico (mg de ácido ascórbico/100 g de amostra seca)	60,2±12,8
Fenólicos totais (mg de ácido gálico/100 g de amostra seca)	691,7±92,5
Flavonoides (µg de rutina/100 g amostra seca)	2400±0,5

A determinação de umidade é uma das medidas mais utilizadas na análise de alimentos e a partir desta é possível inferir sobre aspectos relacionados à estabilidade, qualidade e composição dos produtos. Fatores esses que afetam o armazenamento, as embalagens e o processamento industrial (CHAVES et al., 2004).

O conteúdo de umidade de um alimento possui relevada importância, porém, sua determinação precisa é muito difícil, uma vez que a água pode ocorrer nos alimentos de três diferentes maneiras: água ligada, água disponível e água livre (ALDRIGUE et al., 2002).

Verifica-se pela Tabela 3.1 que a semente de acerola possui teores elevados de umidade (71,8%±1,3), o que pode favorecer a proliferação microbiana e reações químicas de degradação, reduzindo o tempo de vida útil desse resíduo. Ressalta-se que os valores médios de umidade são próximos aos obtidos por Sousa (2011a) cerca de, 83,45% ± 0,06. Entretanto, fatores como distinções entre os processamentos industriais podem acarretar em alterações significativas deste parâmetro.

A acidez é um importante parâmetro na apreciação do estado de conservação de um produto alimentício. Encontra-se ainda relacionada à adstringência do alimento. O valor médio de acidez titulável, em ácido cítrico obtido foi de 1388,1 mg/100 g, indicando baixa

acidez e reduzida predisposição ao desenvolvimento de micro-organismos. Análises de acidez de polpas de acerola foram realizadas por Oliveira et al. (1999) resultado em teores da ordem de 1030 mg/100 g isto é próximos aos obtidos neste estudo.

Entretanto, valores da ordem de 3000 mg/100 g e $2564 \pm 72,12$ mg/100 g foram obtidos por Silva (2014) e Silva (2015), respectivamente, em estudos com sementes de acerola, superiores aos encontrados nesta pesquisa, provavelmente devido ao estágio de maturação e/ou do genótipo do fruto (MATSUURA, 2001).

O valor de vitamina C ($60,2 \pm 12,8$ mg/100 g) encontra-se ligeiramente inferior ao citado por Sousa (2011a) que obteve 89,55 mg de ácido ascórbico/100 g. Apesar do teor de ácido ascórbico ser menor quando comparado ao fruto de acerola (1677,59 mg/100 g), ainda assim pode-se utilizar a semente de acerola como fonte complementar deste nutriente, pois a ingestão diária recomendada para adultos (Institute of Medicine - IOM, 2000) é de 75 mg para mulheres e 90 mg para homens. Os valores obtidos são superiores aos encontrados por Silva (2014) e Silva (2015).

A determinação dos compostos bioativos fenólicos mostrou que a semente de acerola possui consideráveis teores desse princípio ativo, quando confrontados os valores encontrados nas sementes (691,7 mg/100 g) com os obtidos no fruto, cerca de 1063 mg/100 g (RUFINO, 2008). Valores similares foram obtidos por Silva (2014) cerca de 600 mg/100 g e valores inferiores foram obtidos por Sousa (2011b), em torno de 247,62 mg/100 g.

Quanto aos teores de flavonoides verifica-se que as sementes de acerola possuem teores menos expressivos desse composto, $2400 \pm 0,5$ µg/100 g. Os valores obtidos são superiores aos encontrados por Sousa (2011) que encontrou teores de $1040 \pm 0,30$ µg/100 g e Silva (2015), cerca de 1650 µg/100 g.

As discrepâncias ocorridas entre os teores nutricionais do presente estudo e outros autores podem estar relacionadas a fatores como a localização geográfica, práticas de cultivo, regime pluvial, exposição à luz do sol, características genéticas e, principalmente, o estágio de maturação em que os frutos se encontram (MATSUURA et al., 2001).

3.2.2 Composição química nutricional do Resíduo de Acerola

Os dados referentes à composição da acerola são apresentados na Tabela 3.2, que se constitui por valores médios dos lotes avaliados no presente estudo, bem como as indicações do desvio padrão em relação à estimativa da média. As discrepâncias no valor nutricional e a palatabilidade dos resíduos gerados pelas agroindústrias podem depender de inúmeros fatores,

dentre eles: a variedade das frutas utilizadas, os métodos de processamento e o tempo de armazenamento.

A avaliação dos resíduos de acerola mostrou que, de forma geral, as sementes deste fruto possuem quantidades significativas do macro nutrientes, sendo plausível o seu aproveitamento no enriquecimento de outros produtos alimentícios.

Tabela 3.2 - Composição química nutricional do resíduo de acerola.

Propriedades	Sementes de acerola <i>in natura</i>
Cinzas (%)	1,84±0,60
Proteínas (%)	12,54±1,20
Lipídios (%)	4,37±0,34
Fibra bruta (%)	40,86±6,30

O valor médio encontrado para as cinzas nas sementes de acerola foi de 1,84%, próximo ao obtido por Pereira (2014) cerca de 1,41%. Chaves et al. (2004) obtiveram para acerolas frescas valores entre 0,3 a 2,1% de cinzas, ou seja, frações próximas às obtidas neste estudo. Sendo assim, as frações de cinzas obtidas podem estar associadas a uma concentração significativa de minerais.

Segundo Chaves et al. (2004) a fração de cinzas, ou seja, quantidade de resíduo mineral fixo presente nos alimentos se refere à parcela de resíduo inorgânico, remanescente da queima da matéria orgânica. Sendo assim, o conteúdo em cinzas de uma amostra alimentícia representa o conteúdo total de minerais podendo, portanto, ser utilizado como medida geral da qualidade de alimentos. No entanto, nem sempre esse resíduo representa toda a substância inorgânica presente na amostra, pois alguns sais podem sofrer redução ou serem volatilizados durante o aquecimento (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985).

As proteínas, moléculas de natureza heteropolimérica, exercem funções importantes dentre elas as de catalisadores biológicos (enzimas) e de componentes estruturais da célula. De um modo geral, a qualidade da proteína é encontrada, em ordem decrescente, nos alimentos zoógenos (animais), sementes oleagionosas, leguminosas, cereais e amiláceos (GAVA, 1978).

O estudo realizado com resíduos desidratados de acerola (LOUSADA et al. 2006) mostra teores de proteínas de 10,5%, valor ligeiramente inferior ao encontrado neste trabalho

(12,54%). Resultados inferiores foram obtidos para farinhas de resíduo de acerola por Sobrinho (2014) que obteve teores de proteína na faixa entre 6,1 a 8,7%.

Ressalta-se que a semente de acerola revela-se como uma boa fonte proteica, contendo fração de 12,54%, conteúdo superior aos subprodutos de algumas frutas como o abacaxi (8,4%) e a goiaba (8,5%) (LOUSADA et al., 2006). Em média, a proteína bruta da semente da acerola ultrapassa valores como o sorgo grão (10,45%), casca de soja (11,94%), germen de milho (9,31%) (ROCHA JÚNIOR; VALADARES FILHO; BORGES, 2002, citados por AGUIAR, 2010). De acordo com Aguiar (2010) dentre as partes dos frutos (casca, semente e pedúnculo) que formam os subprodutos, as sementes são aquelas que contêm teores de proteínas mais elevados.

A determinação do extrato etéreo, método aplicável à determinação de lipídios em alimento, fundamenta-se na extração de gorduras e óleo por meio de solventes orgânicos. Os lipídios são compostos orgânicos altamente energéticos, contém ácidos graxos essenciais ao organismo e atuam no transporte das vitaminas lipossolúveis. São substâncias insolúveis em água, solúveis em solventes orgânicos, tais como éter, clorofórmio e acetona, dentre outros (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985).

As sementes de acerola apresentaram teores lipídicos expressivos com $(4,37 \pm 0,34)\%$. Os resultados encontrados neste estudo são ligeiramente superiores aos quantificados por Júnior et al. (2008) e Sousa (2011), que obtiveram para os resíduos de acerola desidratados valores de 3,27% e 3,59%, respectivamente. Valores mais elevados que os obtidos nesta pesquisa foram determinados por Silva et al. (2012), cerca de 8,92%.

Teores elevados de fibra bruta foram obtidos nas sementes de acerola, 40,86%. Valores superiores foram obtidos por Chiocchetti (2013) em torno de 59%.

3.2.3 A caracterização física do resíduo de acerola e da soja

A Tabela 3.3 apresenta a caracterização física das partículas de resíduo de acerola e soja determinadas por meio de experimentos. Resultados esses utilizados como parâmetros de entrada nas simulações computacionais visando o estudo das propriedades fluidodinâmicas dos mesmos em leito de jorro.

Avaliando-se as características da soja, verifica-se que os resultados estão em conformidade com a literatura, uma vez que valores similares foram obtidos por Duarte (2006), que em estudos com recobrimento da soja obteve diâmetro médio de 6 mm e massa específica aparente de 1173 kg/m^3 . Os resultados também se encontram coerentes aos obtidos

por Vieira et al. (1999), o qual obteve para a soja valores de massa específica aparente na faixa entre 1159 a 1199 kg/m³.

Tabela 3.3 - Características físicas do resíduo de acerola e da soja.

Propriedades		Soja	Resíduo de Acerola
Diâmetro da partícula	d_p [mm]	6,30±0,40	7,05 ±0,07
Massa específica real	ρ_{real} [kg/m ³]	1232,95±0,60	1344,85±13,86
Massa específica aparente	ρ_{ap} [kg/m ³]	1188,20± 6,18	677,47 ± 0,45
Esfericidade	Φ	0,90	0,68
Diâmetro equivalente	D_{eq} [mm]	6,29	8,09

De modo similar, os resultados obtidos para as sementes de acerola são similares aos de Alves et al. (2010) e Silva (2014), que obtiveram massa específica real de 1354,7 kg/m³ e 1427,5 ± 9,4 kg/m³, respectivamente. Quanto à massa específica aparente, determinada por picnometria com éter de petróleo, Silva (2014) obteve 860,4±10,6 kg/m³, valor ligeiramente superior ao encontrado nesta pesquisa. Variações entre a massa específica real e aparente dos materiais se devem à diferença entre os materiais.

A baixa esfericidade das sementes de acerola era um resultado esperado, pois a mesma possui formato de elipse. Em contrapartida, a elevada esfericidade da soja contribui de modo favorável no auxílio da escoabilidade dos materiais no leito de jorro.

3.2.3.1 Avaliação experimental dos ângulos de repouso dinâmico do resíduo de acerola e da soja

O ângulo de repouso dinâmico, medida física característica da escoabilidade de um material, relaciona-se ao movimento superficial das partículas (JONG et al., 1999). Também denominado por ângulo de inclinação, a medida informa sobre o comportamento da partícula em movimento lento, por exemplo em tambor rotativo.

As determinações experimentais do ângulo de repouso dinâmico foram realizadas com intuito de avaliar o comportamento fluidodinâmico dos materiais tidos como objeto de estudo deste trabalho. De acordo com Chou et al. (2010) a condição de segregação de um material pode ser prevista com base no ângulo de repouso dos materiais granulares.

A Tabela 3.4 apresenta os resultados encontrados para o ângulo de repouso dinâmico das sementes de acerola e da soja. Verifica-se que o resíduo de acerola possui ângulo de

repouso dinâmico superior ao dos grãos de soja. O resultado é compatível com a literatura que, segundo Medeiros et al. (2001), o ângulo de repouso diminui com o aumento da esfericidade.

Tabela 3.4- Ângulos de repouso dinâmico dos resíduos de acerola, da soja e da mistura de composição 50% em massa.

Materiais	Ângulo de repouso dinâmico (°)
Resíduo de acerola	52,60 ± 3,80
Soja	41,10 ± 2,00
Mistura resíduo de acerola e soja (50%)	44,96 ± 2,00

Outro fator importante a destacar é o atrito entre as partículas, fator esse mais evidenciado nas sementes de acerola, devido à sua rugosidade e formato. O atrito existente entre as partículas pode contribuir para o aumento do ângulo de repouso.

O termo atrito por fricção é uma designação comum aos fenômenos em que o movimento relativo entre duas superfícies em contato é freado pelas forças de coesão existentes entre as superfícies. Silva et al. (2006) destaca que o atrito pode ocorrer de três modos: de escorregamento, que ocorre entre duas superfícies sólidas em contato e que deslizam uma sobre a outra; o de rolamento, entre uma superfície sólida e outra superfície que rola sobre ela; e atrito interno de um fluido, ou seja, a viscosidade.

A presença de elevado teor de umidade da semente de acerola também contribui para o aumento da força de coesão entre as partículas, tendendo a agregar estas partículas e, conseqüentemente, aumentando o atrito interno. Silva e Corrêa (2000) concordam e afirmam que o ângulo de repouso é altamente influenciado pelo teor de umidade do produto.

Após realização dos ensaios experimentais, obteve-se o valor de $44,96^{\circ} \pm 2,5^{\circ}$ para o ângulo de repouso dinâmico da mistura de iguais frações mássicas de soja e resíduo de acerola (50%). O resultado obtido é compatível com Bortolotti (2012) que para acerola pura obteve o valor de $49,29^{\circ} \pm 4,16^{\circ}$

A escoabilidade de um material particulado é inversamente proporcional ao ângulo de repouso dinâmico portanto, o acréscimo de soja à mistura auxilia na escoabilidade no leito de jorro. Fato esse em concordância com as esfericidades e rugosidades dos dois materiais (MEDEIROS et al., 2001). A Figura 3.6 ilustra os ângulos de repouso dinâmico dos materiais utilizados como objeto de estudo.



(A)

(B)

(C)

Figura 3.6 - Avaliação qualitativa do ângulo de repouso dinâmico (A) resíduo de acerola (B) mistura constituída a 50% e (C) soja.

Avaliação do efeito da velocidade de rotação e da fração de acerola sobre o ângulo de repouso dinâmico da mistura

A avaliação experimental dos efeitos da velocidade de rotação e da fração de acerola sobre o ângulo de repouso dinâmico é apresentada na forma gráfica pela Figura 3.7.

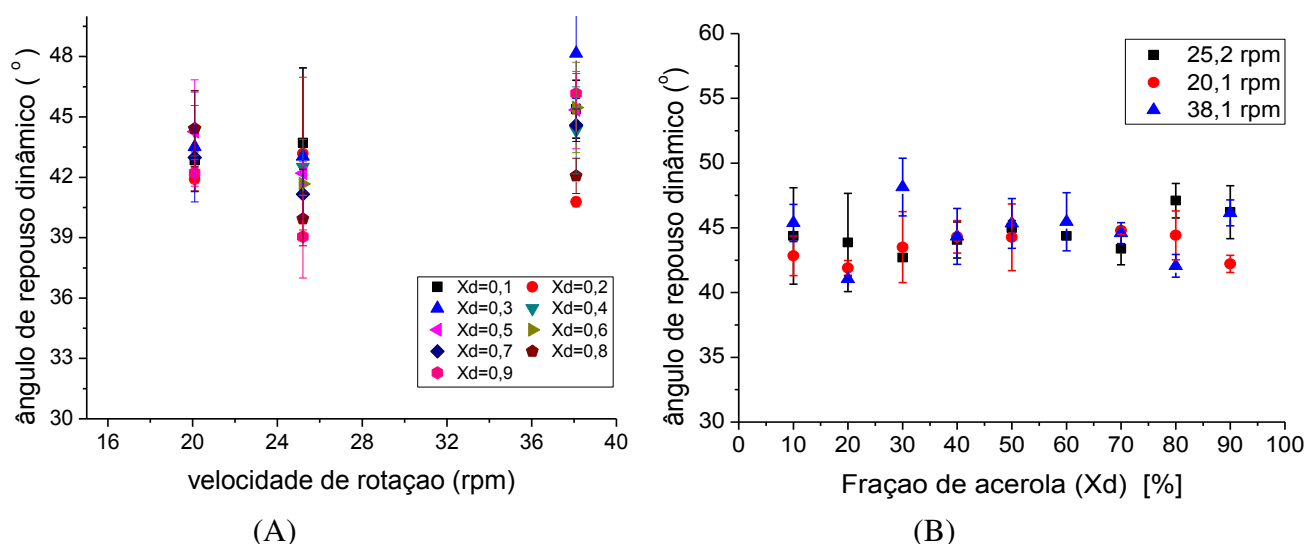


Figura 3.7 - Avaliação do efeito da (A) velocidade de rotação e da (B) fração de acerola sobre o ângulo de repouso dinâmico da mistura soja/resíduo de acerola.

Para verificar a influência dessas variáveis na resposta em questão, os resultados foram tratados estatisticamente por meio de análise de variância (Tabela 3.5). Através desta infere-se (nível de significância de 5%) que a variável isolada velocidade de rotação não exerce efeito significativo sobre o ângulo de repouso dinâmico, na faixa avaliada. Entretanto, a variável isolada fração de acerola exerce efeito estatístico sobre a resposta, fato evidenciado pela ordem de grandeza do valor numérico da probabilidade.

Tabela 3.5 - Análise de variância (ANOVA) para a variável resposta o ângulo de repouso dinâmico da mistura.

Efeitos	Soma dos Quadrados	DF	Quadrado médio	F	Probabilidade (p)
Média	252435,3	1	252435,3	25414,05	0,0000
Velocidade de rotação	14,7	2	7,4	0,74	0,4782
Fração de acerola	251,9	8	31,5	3,17	0,0022
Erro puro	1817,7	183	9,9		

3.2.3.2 Avaliação experimental do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola e da soja

O ângulo de repouso estático, outro parâmetro físico determinante da escoabilidade, depende das características dos materiais tais como porosidade, tamanho, forma e orientação das partículas. De acordo com Dantas et al. (2009), a fluidez de um material e o ângulo de repouso estático estão correlacionados à fricção do sólido granular sobre si mesmo, também designada como escoabilidade estática.

A Tabela 3.6 e a Figura 3.8 apresentam os valores obtidos para os ângulos de repouso estático das sementes de acerola e dos grãos de soja. Nota-se que a semente de acerola possui maior ângulo de repouso estático quando confrontada à soja. As características físicas já anteriormente citadas contribuem para esse resultado.

Tabela 3.6 - Medidas do ângulo de repouso estático para os resíduos de acerola e a soja.

Materiais	Ângulo de repouso estático (°)
Resíduo de acerola	39,20 ± 1,40
Soja	21,40 ± 0,90

De acordo com Caravalho (2013), as partículas podem se classificar segundo sua escoabilidade, sendo essa inversamente proporcional ao ângulo de repouso (Tabela 3.7). Ou seja, quanto maior for o ângulo de repouso de uma partícula, pior será a sua escoabilidade. Para as sementes de acerola nota-se que a mesma se classifica como material de difícil escoabilidade. Já os grãos de soja devido às suas características (esfericidade elevada e superfície lisa) possuem escoabilidade fácil, fato esse que contribui para a formação de jorro, quando utilizado em mistura com as sementes de acerola durante a secagem.

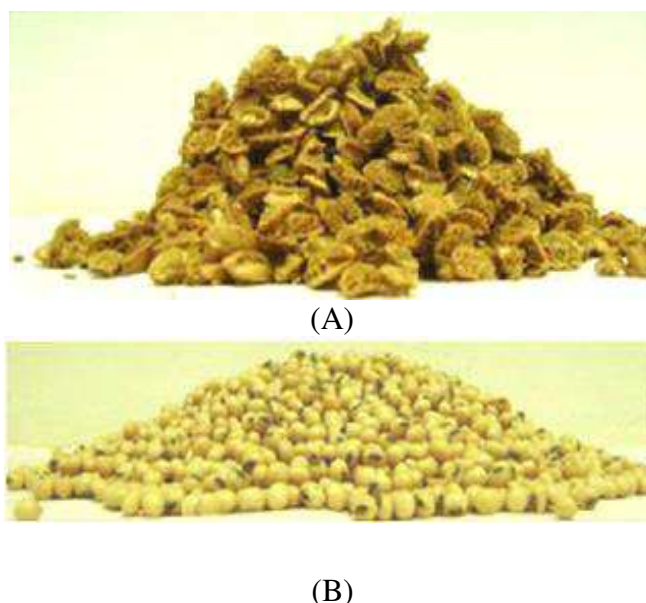


Figura 3.8 - Avaliação qualitativa do ângulo de repouso estático (A) do resíduo de acerola e (B) da soja.

Tabela 3.7 - Comportamento de escoabilidade de sólidos.

Ângulo de repouso (°)	Escoabilidade
< 30	Fácil escoamento
30 – 50	Difícil escoabilidade
> 50	Coesivo

Fonte: Caravalho (2013)

Dentre os fatores preponderantes sobre o ângulo de repouso estático destaca-se o teor de umidade do resíduo de acerola, onde o efeito do teor de água existente na matéria analisada também pode influenciar o ângulo de repouso. De acordo com Brito et al. (2012), a higroscopicidade é um fator de grande influência em materiais porosos, pois a adsorção de água pode ser um fator importante na aglomeração das partículas influenciando a sua escoabilidade. Explicações físicas são dadas por Lumay et al. (2012) que afirmam que o

movimento e a interferência dos grãos dentro de uma pilha são influenciados pelas repulsões estéricas, forças de atrito e de coesão. Sendo a repulsão estérica relacionada à geometria das partículas e as forças de fricção influenciadas pelas propriedades da superfície e pela natureza química das partículas. Já as forças de coesão são induzidas pela presença de pontes líquidas, cargas elétricas, interações de Van der Waals e interações magnéticas dipolo-dipolo.

Segundo Lumay et al. (2012), os materiais granulares podem ser divididos em duas categorias: coesivos e não coesivos. Em materiais granulares não coesivos, a interação entre as partículas está essencialmente relacionada com a repulsão estérica e com as forças de atrito. Portanto, as propriedades macroscópicas são regidas pela geometria das partículas (forma e distribuição de tamanhos) e por propriedades de superfície. Quando as forças de coesão entre as partículas se tornam maiores do que o peso de uma partícula, as propriedades macroscópicas são fortemente influenciadas pela coesão.

CAPÍTULO 4

A Secagem de Resíduo de Acerola em Leito de Jorro e os Pré-Tratamentos

A adoção de pré-tratamentos tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores que lidam com a secagem de materiais alimentícios. Dentre os pré-tratamentos destaca-se a aplicação de ultrassom, energia limpa que contribui para o aumento da eficiência da desidratação. A pulverização de etanol também vem sendo adotada em pesquisas de secagem. Ressalta-se que os pré-tratamentos supracitados contribuem também para a sanitização do produto. Porém, variabilidades nutricionais podem ocorrer em função do pré-tratamento. Sendo assim, o presente capítulo destina-se ao confronto entre as secagens precedidas ou não por pré-tratamentos, utilizando para tanto parâmetros como a redução de umidade e a qualidade nutricional. Avaliações morfológicas por meio de microscopia eletrônica de varredura e análises fluidodinâmicas como porosidade do leito e segregação de mistura, também fazem parte do escopo deste capítulo.

4.1 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS DESENVOLVIDAS

4.1.1 A Unidade Experimental

Os experimentos foram conduzidos em leito de jorro, cuja unidade é composta por: (1) compressor centrífugo 7,5 cv, (2) tubulação de aço galvanizado, (3) leito de jorro construído em aço inoxidável com sistema de guilhotinas (nas posições axiais) para realização de amostragens da mistura em diferentes posições axiais do leito, (4) termoanemômetro para a coleta de dados de velocidade do ar na linha e calibração da placa de orifício, (5) medidor de vazão do tipo placa de orifício e (6) sistema de aquisição de dados com o auxílio do *software* LabVIEW (Figura 4.1). Os dados referentes à geometria do leito são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dimensionais do leito de jorro.

D_c [m]	Diâmetro da coluna	0,210
D_i [m]	Diâmetro de entrada	0,035
β [°]	Ângulo do cone	60
H [m]	Altura do leito	0,850
H_c [m]	Altura do cone	0,150

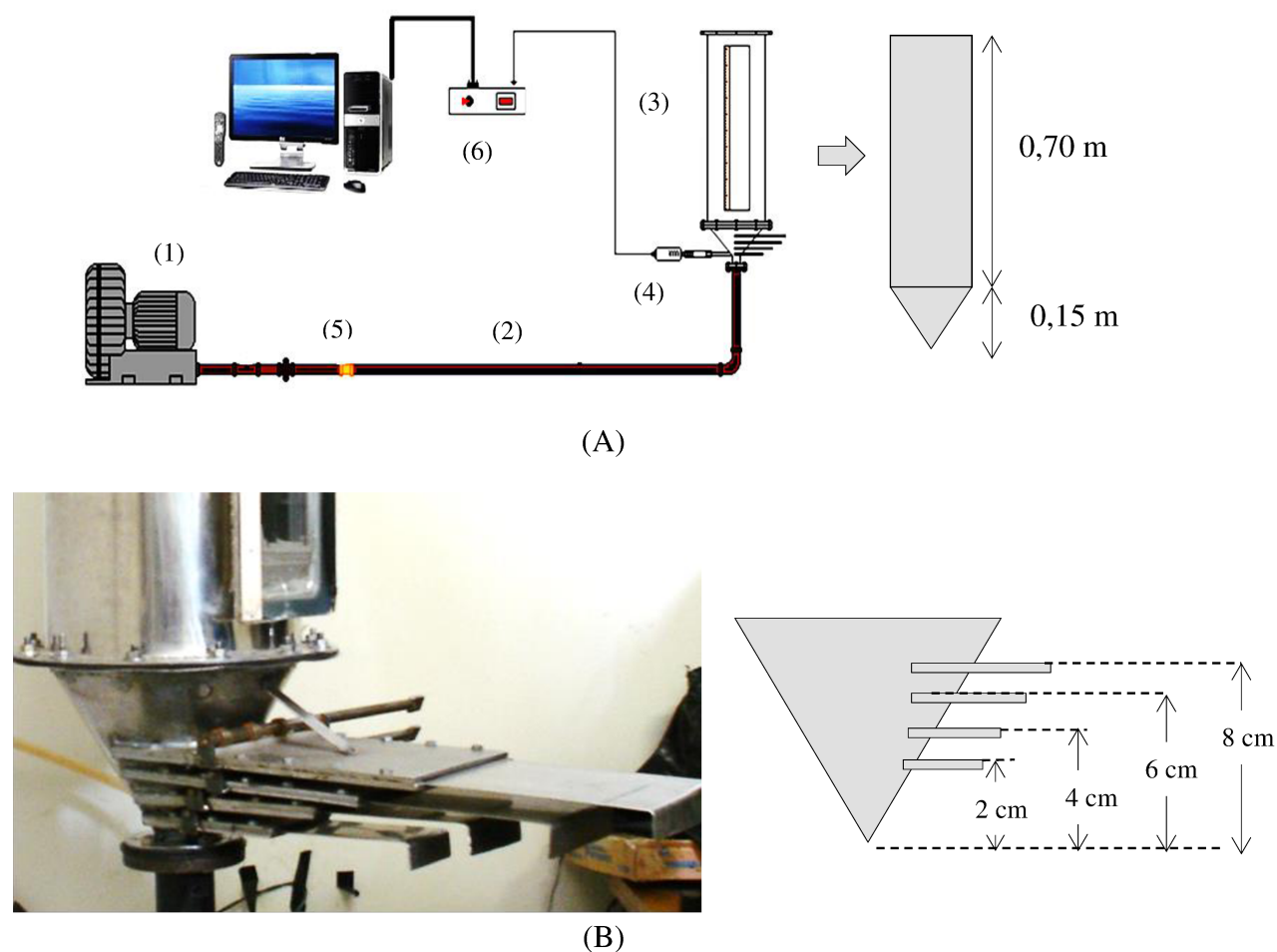


Figura 4.1 - Esquema da unidade experimental (A) equipamentos e instrumentação da unidade de leito de jorro; (B) leito de jorro com a inserção de guilhotinas na região cônica.

4.1.2 Avaliação experimental da porosidade do leito estático (Empacotamento do leito)

A determinação experimental da porosidade do leito, também determinada pelo empacotamento do leito estático, foi realizada por meio da pesagem das partículas seguida pela inserção dos materiais aleatoriamente a um recipiente cônico similar à parte cônica do leito de jorro empregado neste estudo. Tal procedimento foi repetido até obtenção de altura de leito estático requerido (8 cm e 10 cm). Foram avaliadas as porosidades dos leitos constituídos pela mistura, nas frações em massa de 0,15; 0,25; 0,35; 0,50 e 0,75. As medidas de porosidade foram realizadas em triplicata e serão utilizadas no confronto de simulações numéricas na análise desse parâmetro. Para cálculo da porosidade utilizou a Equação 4.1 a seguir.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V}{V_L} \quad (4.1)$$

em que:

V : Volume da mistura [m³]

V_L : Volume do leito estático [m³]

4.1.3 Segregação Axial da Mistura

Para caracterização das condições operacionais e determinação da estabilidade fluidodinâmica do leito, mensurou-se a segregação, através do índice de mistura no leito (I_M), que relaciona a fração mássica final de resíduo de acerola em determinada posição axial com a fração mássica inicial de resíduo de acerola na mistura (Equação 4.2).

A determinação da segregação foi viabilizada pela adaptação realizada no leito de jorro, o qual se constitui por um sistema de guilhotinas, que permite a realização de amostragens da mistura em diferentes posições axiais no leito.

$$I_M = \frac{\left(\frac{M_{di}}{M_{ti}}\right)}{\left(\frac{M_{fr}}{M_{ft}}\right)} = \frac{(x_{di})}{(x_{dt})} \quad (4.2)$$

em que:

M_{di} : Massa de resíduo de acerola no compartimento i

M_{fr} : Massa de resíduo de acerola no final

M_{ft} : Massa total final

M_{ti} : Massa total inicial

x_{di} : Fração mássica de resíduo de acerola no compartimento i

x_{dt} Fração mássica total de resíduo de acerola

Sendo assim, índices de mistura maiores que 1 caracterizam a concentração do leito em resíduo de acerola e valores menores que 1 apontam a concentração do leito em soja. Valores de índice de mistura iguais a 1 em todas as posições axiais do leito indicam a estabilidade do leito.

4.1.4 A Secagem em leito de jorro sem o pré-tratamento

Os experimentos de secagem em leito de jorro sem a aplicação de tratamento prévio foram realizados com tempo de operação de 40 min, e altura de leito estático de 8 cm.

O jorro foi alimentado em regime batelada com composição variável de acerola, a qual foi inserida de forma aleatória e submetida à vazão e temperatura constantes. Para tanto,

adotou-se um planejamento experimental, considerando-se as variáveis: relação vazão de ar/vazão de ar no jorro mínimo (Q/Q_{min}), temperatura de ar de entrada (T) e fração de acerola (X_d), sendo as variáveis codificadas e na escala original, apresentadas na Tabela 4.2 e pelas Equações 4.3. As vazões de jorro mínimo foram determinadas a partir das curvas características (Anexo 1).

Tabela 4.2 - Variáveis codificadas aplicadas ao Planejamento Central Composto.

Variáveis	- α^*	-1	0	+1	+ α^*
Q/Q_{min}	1,07	1,10	1,20	1,30	1,33
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	40,0	44,5	60,0	75,5	80,0
Fração de acerola (X_d)	0,16	0,20	0,35	0,50	0,54

* $\alpha=1,287$

$$X_1 = \frac{Q/Q_{min} - 1,20}{0,1} \quad X_2 = \frac{T(^{\circ}\text{C}) - 60}{15,5} \quad X_3 = \frac{X_d - 0,35}{0,15} \quad (4.3)$$

4.1.5 Os Pré-Tratamentos

Visando à redução do tempo de exposição a elevadas temperaturas, que podem afetar negativamente a qualidade nutricional do produto, foram adotados anteriormente à secagem os pré-tratamentos das sementes de acerola, dentre eles a aplicação de ultrassom e a pulverização de etanol.

A aplicação de ultrassom implica na imersão do material em um meio fluido, geralmente água. No presente estudo, foram avaliados dois meios de imersão sendo esses a água e o etanol comercial (93,2 °GL).

4.1.5.1 Pré-tratamento com ultrassom utilizando água como meio de imersão

Os pré-tratamentos ultrassônicos utilizando água como meio de imersão foram realizados em dois banhos ultrassônicos, cujas descrições encontram-se detalhadas na Tabela 4.3.

No banho ultrassônico de potência 80 W, as sementes de acerola foram imersas em água na proporção de 1 kg de sementes para 4 L de água, descrita como melhor condição operacional por Fernandes et al. (2008). No entanto, no banho de 1050 W, as características físicas do banho não permitiram a adoção da proporção anteriormente estabelecida, sendo portanto, utilizada água em excesso.

Tabela 4.3 - Descrição detalhada das características dos banhos ultrassônicos.

Características	Banhos ultrassônicos	
Modelo	Ultrasonic Cleaner (UNIQUE- USC 1400)	Ciencor Scientific LS-55DA
Potência (W)	80	1050
Capacidade (L)	2,5	55,0

A aplicação de ultrassom se fez com a variação de tempo de sonicação adotando-se o intervalo de tempo entre 10 min e 80 min. Após aplicação de ultrassom as sementes foram peneiradas e dispostas sobre papel toalha a fim de remover o excesso de água. A desidratação em leito de jorro desenvolvida logo após o pré-tratamento foi conduzida nas condições fixas de: tempo de secagem de 40 min, temperatura de 60°C, fração de acerola de 45% e vazão de ar 20% acima do jorro mínimo.

4.1.5.2 Pré-tratamento com ultrassom utilizando etanol como meio de imersão

A sonicação com etanol realizou-se nos banhos ultrassônicos de 80 W e 1050 W, depois de realizadas adaptações físicas no banho de maior potência para que se mantivessem nos dois banhos proporções semelhantes entre o etanol (93,2 °GL) e a semente de acerola. As condições operacionais foram escolhidas usando um planejamento fatorial (2^3), adotando-se como variáveis independentes o tempo de sonicação, a potência e o volume de etanol (Tabela 4.4). Nos ensaios de secagem em leito de jorro, adotou-se o tempo de desidratação de 30 min, mantendo-se a temperatura de 60°C e a vazão de ar 20% acima da vazão de ar mínimo e fração de acerola de 45%.

Tabela 4.4 - Codificação das variáveis utilizadas no Planejamento Fatorial.

Parâmetros	-1	+1
Tempo [min]	3	10
Potência [W]	80	1050
Proporção entre o volume de etanol e a massa de semente de acerola [mL/g de resíduo]	2:1	4:1

4.1.5.3 Pré-tratamento com pulverização de etanol

Como pré-tratamento foi também realizada a pulverização de etanol (93,2 °GL) sobre as sementes de acerola, variando-se o volume de etanol para uma massa fixa de sementes de

acerola, sendo as mesmas deixadas em repouso por 1,5 h até o momento da secagem, condição essa definida por Silva (2014). Os ensaios foram realizados seguindo o Planejamento Composto Central, cujas variáveis codificadas e na escala original são apresentadas na Tabela 4.5. As desidratações em leito de jorro foram realizadas adotando-se tempo fixo de secagem de 30 min e fração de acerola de 45%.

Tabela 4.5 - Codificação das variáveis adotadas no Planejamento Central Composto aplicado aos ensaios com pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.

Parâmetros	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	43,2	50	60	70	76,8
Q/Q_{min}	1,07	1,1	1,15	1,20	1,23
V etanol [mL/g de resíduo]	0,302	0,390	0,520	0,650	0,739

$\alpha=1,68$

A variável x_1 representa a temperatura do ar de secagem, x_2 corresponde à relação entre a vazão de ar e a vazão de jorro mínimo e x_3 o volume de etanol (mL/g de resíduo) utilizado durante a pulverização. As Equações apresentadas no item 4.4 representam as codificações das variáveis.

$$x_1 = \frac{T(oC)-60}{10} \quad x_2 = \frac{Q/Q_{min}-1,15}{0,05} \quad x_3 = \frac{V(mL/g \text{ resíduo})-0,52}{0,13} \quad (4.4)$$

4.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.2.1 A porosidade do leito

A secagem em leito de jorro possui fluidodinâmica altamente influenciada pela porosidade do leito estático, sendo que um maior empacotamento, ou seja, menor porosidade oferece maior resistência à movimentação das partículas, obtendo-se maiores picos de queda de pressão na curva característica (SANTOS, 2011).

A porosidade de um leito não está somente relacionada à composição das misturas binárias, mas também às forças de fricção a que as partículas são submetidas e ao método de empacotamento das mesmas. Estudos mostram que a relação entre porosidade e esfericidade depende da forma de partículas e do método de empacotamento (YU; ZOU, 1996). A

literatura apresenta de forma clara que, para partículas de tamanho uniforme, leitos compostos por partículas não esféricas tendem a apresentar maior porosidade (YU; ZOU, 1996).

Os ensaios experimentais resultaram em porosidades maiores para leitos compostos apenas por resíduo de acerola (cerca de 0,548) quando confrontado com a soja (0,402), na altura de leito estático de 8 cm, o que se deve à esfericidade dos materiais. A Tabela 4.6 apresenta os resultados de porosidade obtidos para diferentes frações de acerola na altura de leito estático de 0,08 m. Percebe-se que o acréscimo de soja reduz a porosidade do leito, o que acarreta em alterações da queda de pressão e da vazão de mínimo jorro. Fatores como forma e massa específica dos materiais também devem ser levados em consideração.

Tabela 4.6 - Porosidade para difentes frações de acerola na altura de leito estático de 0,08 m.

Fração em massa de acerola	0,00	0,15	0,25	0,35	0,50	0,75	1,00
Porosidade (ϵ)	0,402	0,450	0,460	0,470	0,480	0,490	0,548

Resultados similares foram obtidos por Bortolotti (2012) no estudo da porosidade das misturas a diferentes alturas de leito estático (0,06; 0,08 e 0,09 m), onde a autora conclui que para todas as alturas estudadas a porosidade aumenta com o aumento da fração mássica de resíduo de acerola.

4.2.2 A secagem de resíduo de acerola em leito de jorro utilizando soja como material inerte

As Tabelas 4.7 e 4.8 apresentam, respectivamente, a caracterização do resíduo *in natura* e a avaliação nutricional após a secagem em leito de jorro para o planejamento central composto adotado.

Confrontando-se os valores de umidade do resíduo *in natura* (Tabela 4.7) e do proveniente da secagem (Tabela 4.8) percebe-se que, no tempo de 40 min, a secagem em leito de jorro promoveu considerável redução de umidade. Conforme esperado as maiores reduções ocorreram na condição de temperatura elevada, apesar da adoção de temperatura de 60°C também promover significativa desidratação. De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária, que estabelece as diretrizes de padrões de alimentos (Resolução-CNNPA nº 12, de 1978), os teores máximos permissíveis de umidade em farináceos são de 15%. Sendo assim, a desidratação a 60°C também atende aos requisitos legais.

Tabela 4.7 - Caracterização do resíduo *in natura*.

Propriedades físico-químicas	Resíduo <i>in natura</i>
Umidade (%)	70,2±2,5
Acidez (mg de ácido cítrico/100 g amostra seca)	2240,8±84,3
Ácido ascórbico (mg de ácido ascórbico/100 g de amostra seca)	65,4±10,5
Fenólicos totais (mg de ácido gálico/100 g de amostra seca)	378,5±58,3
Flavonoides (µg de rutina/100 g amostra seca)	2405,0±152,8

Do ponto de vista nutricional verifica-se que para a maioria das condições operacionais a secagem promoveu a redução dos teores de acidez, possivelmente pela degradação térmica. Salienta-se que os teores elevados de ácido cítrico podem causar a adstringência do alimento, não sendo encontrados na literatura pesquisada, valores limites para esse parâmetro (Tabelas 4.7 e 4.8).

Tabela 4.8 - Avaliação das variáveis operacionais e da qualidade nutricional da acerola após a secagem ($\alpha=1,287$).

Ensaio	Q/Qmin (X ₁)	T (X ₂)	Xd (X ₃)	Umidade	Acidez	Ácido ascórbico	Fenólicos	Flavonoides	Índice de mistura
01	-1 (1,10)	-1 (44,5)	-1 (0,20)	14,4	2150,7	54,2	252,6	3947,3	2,3
01	-1 (1,10)	-1 (44,5)	1 (0,50)	27,1	1810,4	20,7	113,0	3077,7	2,5
03	-1 (1,10)	1 (75,5)	-1 (0,20)	6,50	817,1	60,4	232,1	3534,6	1,9
04	-1 (1,10)	1 (75,5)	1 (0,50)	8,10	1046,4	93,7	260,2	4328,8	2,5
05	1 (1,30)	-1 (44,5)	-1 (0,20)	20,1	1821,2	62,3	281,1	4208,3	1,7
06	1 (1,30)	-1 (44,5)	1 (0,50)	17,3	1442,8	24,7	264,9	3854,1	2,4
07	1 (1,30)	1 (75,5)	-1 (0,20)	6,1	2275,2	78,2	220,0	3484,6	1,9
08	1 (1,30)	1 (75,5)	1 (0,50)	4,9	1717,9	85,9	249,1	3941,4	1,8
09	- α (1,07)	0 (60,0)	0 (0,35)	10,0	1676,8	100,3	219,8	4809,0	1,7
10	+ α (1,33)	0 (60,0)	0 (0,35)	12,7	2092,1	71,1	258,2	4562,6	2,4
11	0 (1,20)	- α (40,0)	0 (0,35)	20,1	1817,4	30,0	183,2	2598,2	2,2
12	0 (1,20)	+ α (80,0)	0 (0,35)	3,1	1384,3	106,2	172,3	2929,1	2,4
13	0 (1,20)	0 (60,0)	- α (0,16)	9,3	1590,5	99,7	110,2	3646,7	2,4
14	0 (1,20)	0 (60,0)	+ α (1,54)	9,9	1621,5	106,3	70,5	3274,0	1,6
15	0 (1,20)	0 (60,0)	0 (0,35)	9,1	1058,0	108,3	122,1	3601,7	1,9
16	0 (1,20)	0 (60,0)	0 (0,35)	9,5	1003,7	112,2	122,2	3349,5	2,0

Acidez (mg/100 g); ácido ascórbico (mg/100 g); fenólicos (mg ácido gálico/100 g) e flavonoide (µg de rutina/100 g)

Para o ácido ascórbico verifica-se o aumento na extração desse nutriente para determinadas condições operacionais. Fenômeno semelhante foi observado por Ozgur et al. (2011) na desidratação de pimentas. De acordo com Fernandes et al. (2014) o acréscimo de vitamina sugere que o tratamento térmico promove alterações químicas do produto as quais são capazes de liberar em sua forma livre uma quantidade maior de vitamina, ou seja, na forma biodisponível.

Com relação aos compostos bioativos verifica-se que a secagem reduziu os teores de fenólicos. Dentre as causa destaca-se a oxidação enzimática pela polifenoloxidase foi relatada (DJENDOUBI et al., 2012; DEVIC et al, 2010) como o principal mecanismo de degradação de fenol durante a secagem convectiva.

Efeito contrário foi observado para os flavonoides, onde acréscimos em sua extração foram obtidos. Comportamento similar foi obtido por Chang et al. (2006) em estudos com tomates.

Infere-se pelos valores obtidos na réplica no ponto central do PCC adotado (Tabela 4.8) a significativa reprodutibilidade dos resultados. Destaca-se que determinadas condições operacionais favorecem a extração dos teores de ácido ascórbico (ensaios 09, 14, 15 e 16) e flavonoides (ensaios 04, 05, 09 e 10), ao passo que outras contribuem para uma menor degradação de fenólicos (ensaios 05 e 06). Em destaque o ensaio 09 (vazão de 7% acima do jorro mínimo, temperatura de 60°C e fração de acerola de 35%) que resultou em extrações entre as maiores de vitamina C e flavonoides, degradações pouco expressivas de fenólicos, sendo essa uma condição favorável de secagem.

Para avaliar os efeitos das variáveis operacionais Q/Q_{min} , temperatura, e fração de acerola nas variáveis respostas umidade, acidez e teores de ácido ascórbico e compostos bioativos, utilizou-se a técnica de regressão múltipla. A Equação 4.5 explicita em forma matricial, o comportamento da umidade final do resíduo de acerola frente às variáveis estudadas, onde se destaca o significativo efeito negativo da temperatura.

$$umidade = 9,33 + x'b + x'Bx \quad (R^2=0,942) \quad (4.5)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,00 \\ -6,65 \\ 0,98 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1,64 & 0,00 & -2,29 \\ 0,00 & 1,80 & -1,19 \\ -2,29 & -1,19 & 0,00 \end{bmatrix}$$

Os modelos propostos para os teores nutricionais são apresentados, em forma matricial, nas Equações 4.6, 4.7 e 4.8, onde é possível quantificar os efeitos das variáveis independentes sobre as respostas.

$$\text{teor de ácido ascórbico} = 107,8 + x'b + x'Bx \quad (R^2=0,909) \quad (4.6)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 22,5 \\ 0,00 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -17,2 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -27,8 & 14,0 \\ 0,00 & 14,0 & 0,00 \end{bmatrix}$$

$$\text{teor de fenólicos totais} = 105,8 + x'b + x'Bx \quad (R^2=0,896) \quad (4.7)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 18,3 \\ 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 82,1 & -25,5 & 0,00 \\ -25,5 & 45,1 & 26,6 \\ 0,00 & 26,6 & 0,00 \end{bmatrix}$$

$$\text{teor de flavonoides} = 3466,0 + x'b + x'Bx \quad (R^2=0,938) \quad (4.8)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 743,2 & -184,4 & 0,000 \\ -184,4 & -416,9 & 309,3 \\ 0,000 & 309,3 & 0,000 \end{bmatrix}$$

em que $X_1 = Q/Q_{\min}$, $X_2 =$ temperatura e $X_3 =$ fração de resíduo de acerola, na forma codificada.

A avaliação fluidodinâmica da secagem em leito de jorro sem pré-tratamento realizada através do Índice de Mistura é mostrada na Figura 4.2, onde se observa que o índice de mistura é maior que 1 para a guilhotina superior, caracterizando, assim a concentração de resíduo de acerola no topo do leito. Esta segregação ocorre devido à baixa massa específica e à dificuldade de deslocamento do resíduo de acerola no leito de jorro. Já nas guilhotinas inferiores, há uma concentração de soja, verificada pelos índices de mistura menores que 1.

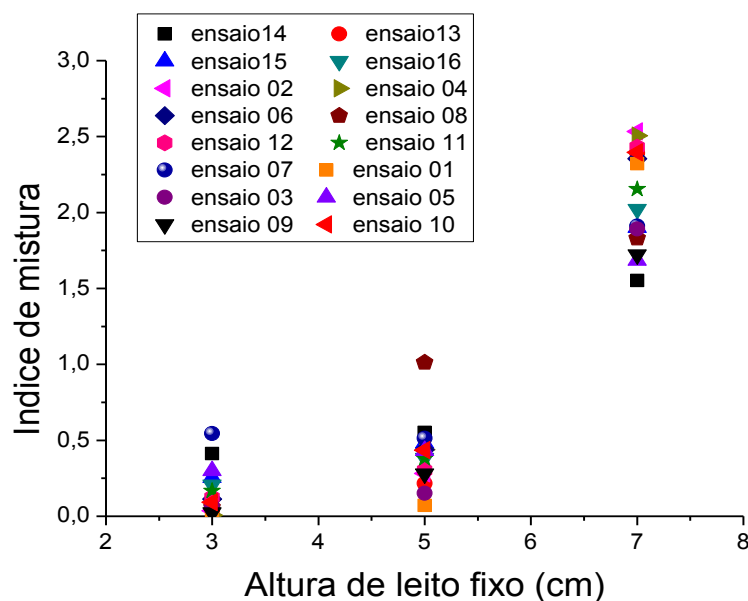


Figura 4.2 - Avaliação fluidodinâmica da secagem em leito de jorro (sem pré-tratamento) por meio do índice de mistura.

A segregação se deve ao fato de que partículas mais densas (grãos de soja) sobem a uma altura menor na região fonte e ao caírem de volta para a zona de jorro, ocupam portanto, as posições radiais próximas à interface anular-jorro. Sendo assim, estas partículas descrevem uma trajetória mais curta do que as sementes de acerola, que circulam preferencialmente ao longo da região periférica exterior da zona anular.

4.2.3 Avaliações de pré-tratamentos na secagem de resíduo de acerola

4.2.3.1 Pré-tratamento ultrassônico em meio aquoso

O ultrassom representa uma nova forma de exploração de energia limpa, que pode ser empregada em diferentes segmentos, dentre os quais, o alimentício. Objetivando-se avaliar o efeito do pré-tratamento ultrassônico sobre a secagem e a qualidade nutricional do resíduo de acerola, os pré-tratamentos utilizando água como meio de imersão foram conduzidos em condições distintas de tempo de sonicação e potência.

Para fins de comparação, adotou-se como grupo de controle a secagem em leito de jorro sem aplicação de ultrassom. Ressalta-se que os experimentos de secagem foram realizados à temperatura de 60°C, (condição mais favorável nos ensaios anteriores) na altura de leito estático de 10 cm e fração de acerola de 45%. Testes preliminares revelaram que para essa composição de mistura a vazão de ar ajustada deveria ser de 20% acima do jorro mínimo. Adotou-se tempo de secagem de 40 min. Dentro desse contexto, a Figura 4.3 apresenta a eficácia da desidratação determinada pela redução de umidade, a qual foi calculada em relação à umidade inicial do resíduo. Analisando-se a figura verifica-se que para o grupo de controle, ou seja, sem a aplicação de pré-tratamentos (secagem em leito de jorro sem pré-tratamento) foram obtidas reduções de umidade reduções da ordem de 85,2%.

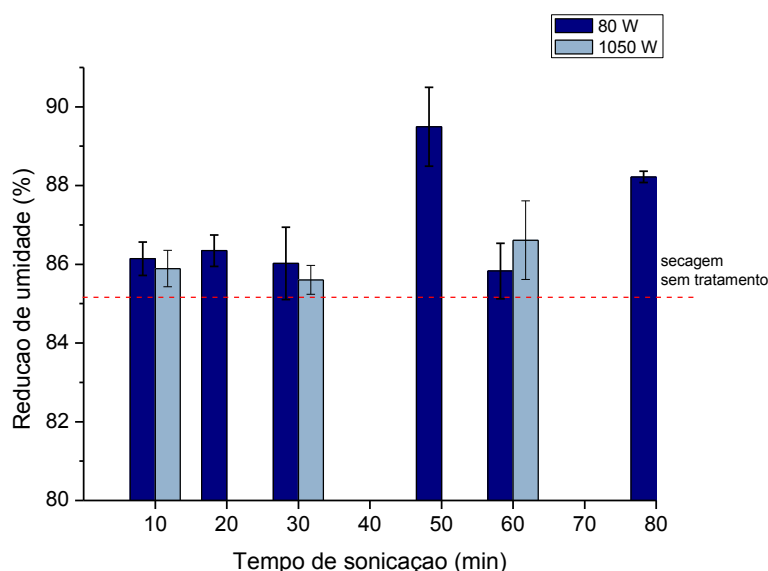


Figura 4.3 – Percentual de redução da umidade em função do tempo de sonicação parametrizado na potência aplicada.

Os resultados apresentados na Figura 4.3 sugerem que o uso de ultrassom como pré-tratamento influencia a secagem do produto em leito de jorro, pois para todas as condições avaliadas foram obtidas reduções de umidade superiores à do controle.

Verifica-se que reduções maiores de umidade (89,2%) foram alcançadas na condição de sonicação de 50 min à potência de 80 W (Figura 4.3). Atribuem-se esses resultados à possível formação de canais microscópicos, causados pela aplicação de ultrassom, decorrentes dos fenômenos de cavitação e efeito esponja. Segundo a literatura tais fenômenos se devem à ocorrência de uma série rápida de compressões e expansões que aumentam a transferência convectiva de massa no fruto, conduzindo a um processo de secagem mais eficiente (TARLETON; WAKEMAN, 1998; GARCÍA-PÉREZ et al., 2006).

Parâmetros como tempo e potência de sonicação podem exercer efeitos significativos sobre o processo ultrassônico e consequentemente sobre a secagem. Os resultados apontam que, na faixa estudada, a elevação da potência não promove alterações significativas na secagem (Figura 4.3). Tal fato confirma-se pela análise de variância a qual indica que, para as condições adotadas, o tempo afeta, significativamente, a secagem no entanto, a potência não exerce efeito significativo sobre essa resposta. Os resultados apresentados estão em concordância com Fernandes e Rodrigues (2007, 2012), o qual afirma que o tempo de sonicação afeta o coeficiente difusivo de transferência de massa e consequentemente a redução de umidade.

Entretanto, a pouca influência da redução de umidade com a potência se diverge do relatado pela literatura, para outros materiais. Segundo Fuente-Blanco et al. (2006), o aumento da potência ultrassônica favoreceu a taxa de secagem de cenouras e de cascas de limão. Acredita-se que tais divergências se devem às características estruturais apresentadas pelas sementes de acerola e pelo excesso de água utilizada durante a sonicação em potência elevada.

Os efeitos da sonicação sobre a qualidade nutricional do resíduo desidratado são apresentados nas Figuras 4.4 a 4.7. Cabe ressaltar que as figuras apresentam os desvios (reduções ou aumentos) dos teores nutricionais em relação ao resíduo *in natura*. De acordo com Dorta et al. (2012), a temperatura e o tempo de secagem podem afetar a atividade e estabilidade dos compostos nutricionais, sendo essa causada por alteração química e enzimática, por volatilização e/ou decomposição térmica.

Nota-se pela Figura 4.4 que a secagem em leito de jorro sem pré-tratamento acarretou reduções de 39% nos teores de ácido cítrico. Resultados similares foram obtidos por Silva (2014), com secagem de sementes de acerola em infravermelho, e por Duzzioni et al.

(2013), em secador de leito fixo. As reduções ocorridas devem-se possivelmente à baixa estabilidade do ácido cítrico em condições operacionais envolvendo temperaturas elevadas (PODSEDEK, 2007).

Verifica-se pela Figura 4.4 que a sonicação quando realizada em condições de baixa potência pode ocasionar desvios sobre os teores de ácido cítrico quando confrontados com a secagem em leito de jorro sem pré-tratamento. Considerando que o ultrassom degrada a matéria orgânica, levando à produção de ácidos, como fórmico e acético (YOUSEF, 1999) era de se esperar um aumento de acidez titulável, uma vez que o valor desta se relaciona à concentração total de ácidos na amostra (RODRIGUEZ, 2014). Entretanto, o tempo de aplicação do ultrassom e a baixa potência (80 W) pode não ser suficiente para que haja intensa degradação, com formação de ácidos capazes de alterar a acidez titulável de modo apreciável. Cabe ainda ressaltar que o ácido cítrico possui elevada solubilidade em água. Sendo assim fatores antagônicos ocorrem quando se aplica o ultrassom em meio aquoso, ou seja, a degradação dos compostos orgânicos que pode ocasionar em acréscimo nos teores de acidez e a solubilização do ácido cítrico que pode acarretar em reduções desses no resíduo.

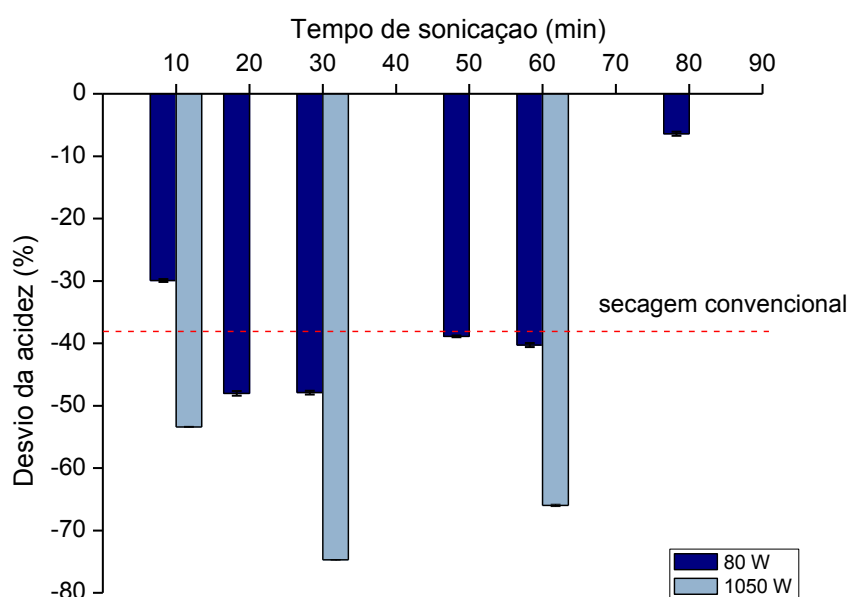


Figura 4.4 – Desvio percentual da acidez em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.

Após análise de variância verifica-se que as variáveis, tempo e potência exercem efeitos sobre os teores de acidez, o que nos permite inferir, com confiabilidade de 95%, que

existem diferenças significativas entre os valores obtidos.

O ácido ascórbico, composto hidrossolúvel, caracteriza-se por ser um nutriente termolábil que pode ser degradado por diversos fatores, dentre eles pH, teor de umidade, oxigênio e presença de metais (GREGORY, 1996 citado por SANTOS e SILVA, 2008). Conforme a literatura (BOBBIO; BOBBIO, 1992; FELLOWS, 2006), o processamento térmico promove perdas importantes no teor de vitamina C dos alimentos, sendo a temperatura e o tempo de exposição fatores importantes neste processo. No entanto, analisando-se a Figura 4.5 verifica-se que a secagem em leito de jorro sem pré-tratamento, ou seja, a exposição à temperatura de 60°C resultou em extrações maiores de ácido ascórbico, teores superiores ao do resíduo *in natura* foram obtidos nesta condição. Resultados similares foram obtidos por Duzzioni et al. (2013) em estudos com resíduos de acerola em leito fixo e por Ozgur et al. (2011) ao secar pimentas. Tal fato deve-se, provavelmente, à desativação de enzimas as quais são responsáveis pela degradação do ácido ascórbico. Entretanto, nota-se que a aplicação do ultrassom promoveu reduções dos teores de vitamina C. A solubilidade do ácido ascórbico em água explica as reduções obtidas em praticamente todos os tratamentos quando comparados à secagem sem pré-tratamento (Figura 4.5).

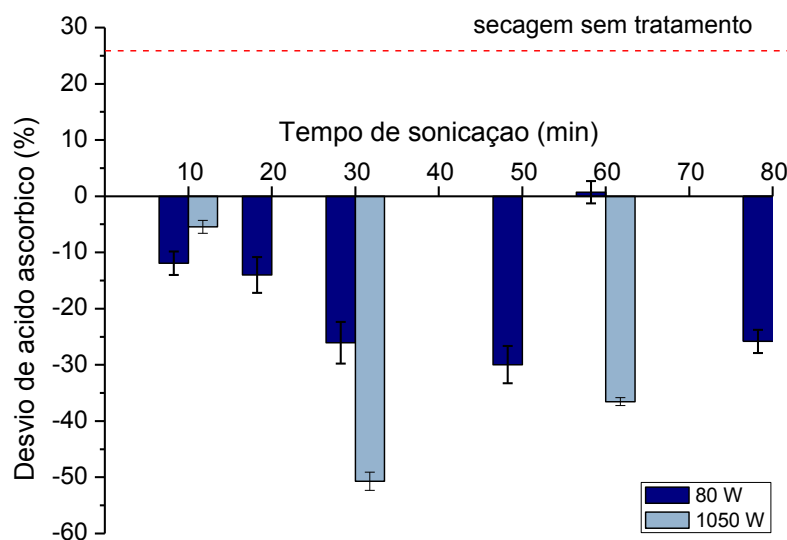


Figura 4.5 – Desvio percentual dos teores de ácido ascórbico em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.

As reduções mais acentuadas ocorridas nos tempos de 50 e 80 min para a potência de 80 W coincidem com as mais relevantes perdas de umidade, causada possivelmente pela

formação de microcanais ocasionados pela aplicação de ultrassom. Ou seja, os mecanismos mostram-se favoráveis no processo de secagem, contudo contribuem com a perda de nutrientes, como o ácido ascórbico. Cabe ainda ressaltar que o uso de excesso de água nos ensaios em condições de elevada potência podem ter colaborado com a transferência de massa devido ao elevado gradiente de concentração entre as sementes e o meio líquido.

Nota-se que para a maioria dos tratamentos as maiores reduções foram obtidas durante a aplicação de potência mais elevada (1050 W), o que sugere a influência desta variável sobre as respostas. A análise de variância revela que o tempo e a potência exercem efeitos significativos ($p < 0,05$) sobre o teor de ácido ascórbico, ou seja, existem diferenças estatísticas entre os valores obtidos.

Rodrigues et al. (2014) relataram resultados semelhantes em estudos de extração assistida por ultrassom de bagaço de caju onde a intensidade da potência exerce efeito negativo sobre a extração de ácido ascórbico, ou seja aumentos dessa variável independente causam degradações dos teores de vitamina C. Tiwari et al. (2008) afirmam que essa degradação, provavelmente, deve-se à termólise ou à combustão que ocorre no interior da bolha de cavitação ou ainda pela reação com os radicais hidroxila que conduzem à formação de produtos de oxidação que ocorrem na superfície da bolha.

Os compostos fenólicos são os mais abundantes antioxidantes hidrofílicos da dieta humana e por isso vêm recebendo grande interesse, pois, evidências científicas apontam que o seu consumo contribui na prevenção de certas doenças crônicas, como câncer, neurológicas e cardiovasculares.

A partir da Figura 4.6 nota-se que a desidratação sem pré-tratamento promoveu uma redução dos teores de fenólicos totais das sementes de acerola. Resultado também evidenciado nos estudos realizados por M'hiri et al. (2014), durante a secagem de cascas de laranja. De modo similar, Chantaro et al. (2008) observaram durante a secagem convectiva de cascas de cenoura perdas de fenólicos da ordem de 64% à 60°C e 26% à 80°C. Já Lopez et al. (2010) obtiveram para esse mesmo composto bioativo perdas de 80% à 50°C e 50% à 90°C em mirtilos durante a sua secagem convectiva.

Cabe ressaltar que, segundo Haard e Chism (1996), as frutas e vegetais possuem, normalmente, elevado teor de compostos fenólicos, ou seja, ácidos fenólicos que se acumulam nos vacúolos. A ruptura da parede celular pode ocasionar a liberação desses compostos, no entanto, pode também provocar a liberação de enzimas hidrolíticas e oxidativas que destroem os antioxidantes.

A oxidação enzimática pela polifenoloxidase foi também relatada (DJENDOUBI et al., 2012; DEVIC et al, 2010) como o principal mecanismo de degradação de fenol durante a secagem convectiva. Li (2006) explica a redução pela possível destruição de alguns dos fenóis ocasionada pela secagem, ou ainda pela aderência celular, ocorrida na ausência de água, o que possivelmente dificulta a posterior extração com solvente. Dentro desse contexto, condições operacionais, tais como temperatura e vazão de ar, podem ocasionar decréscimos (degradação dos componentes nutricionais) ou acréscimos (maiores extrações desses compostos).

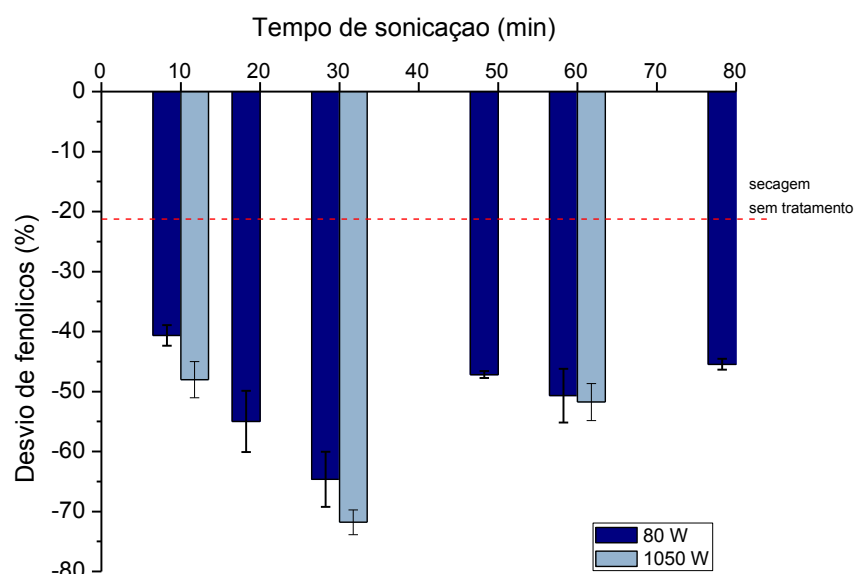


Figura 4.6 – Desvio percentual dos teores de fenólicos em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.

Constatam-se pela Figura 4.6 que reduções mais expressivas de fenólicos ocorreram para todas as desidratações precedidas por ultrassom, o que possivelmente se deve à degradação desses compostos. Resultados similares foram obtidos em secagem de maçãs, onde perdas significativas de fenólicos foram obtidas nas condições de elevada intensidade de ultrassom a 70°C (RODRÍGUEZ, 2014). Por análise de variância ($p < 0,05$) constata-se que somente o tempo exerce efeito sobre os teores de fenólicos.

A Figura 4.7 apresenta os desvios dos teores de flavonoides em relação ao *in natura*. Percebe-se que as condições operacionais adotadas na secagem sem pré-tratamento contribuíram para o aumento da extração dos flavonoides, composto bioativo pertencente à classe dos fenóis. O mesmo comportamento foi encontrado por Chang et al. (2006) em seus

estudos com tomates, em que amostras secas continham teores mais elevados de flavonóides totais quando confrontadas com as amostras frescas. Resultados próximos ao da secagem sem tratamento foram obtidos nas condições operacionais de: potência de ultrassom de 80 W e tempo de 10 min e potência de 1050 W nos tempos de 30 e 60 min. Análise estatística revela que o tempo e a potência não exercem efeitos estatísticos significativos sobre os teores de flavonoides.

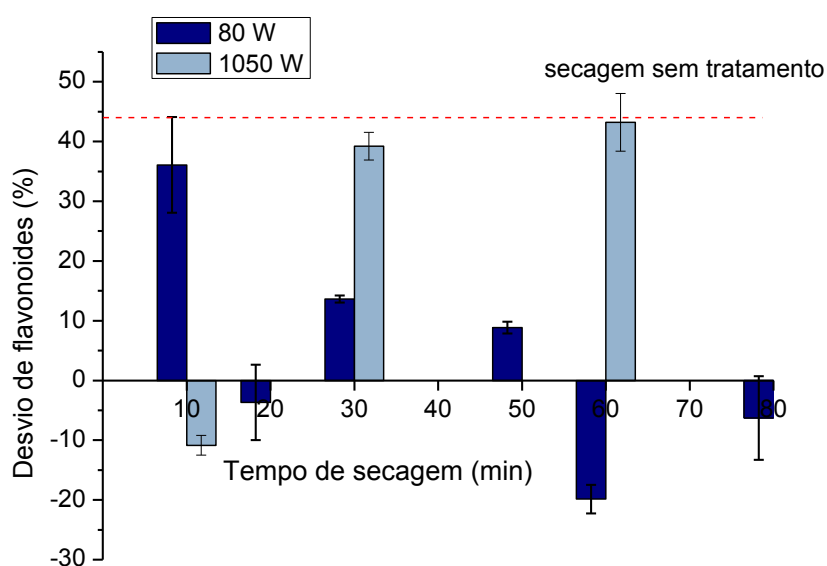


Figura 4.7 – Desvio percentual dos teores de flavonoides em função do tempo de sonicação, parametrizado na potência aplicada.

A avaliação fluidodinâmica, realizada através do índice de mistura é apresentada na Figura 4.8. Assim como na secagem sem pré-tratamento, o índice de mistura possui valores menores que 1 para a guilhotina inferior, caracterizando a concentração de soja. No entanto, para guilhotina superior, nota-se a concentração de resíduo de acerola no topo do leito, pois o índice de mistura é maior que 1. Esta variabilidade de segregação ao longo da altura de leito estático se deve à baixa massa específica e à dificuldade de deslocamento do resíduo de acerola no leito de jorro.

Através da figura percebe-se ainda que a aplicação de pré-tratamento envolvendo a sonicação em meio aquoso não acarretou alterações fluidodinâmicas para baixas alturas de leito estático, onde valores próximos de índice de mistura foram obtidos. Discrepâncias provenientes dos pré-tratamentos são mais acentuadas na altura de leito estático de 9 cm. Percebe-se que, para esta altura de leito axial, leitos mais homogêneos foram obtidos nas

condições de tempo de sonicação de 10 min e potência de 1050 W.

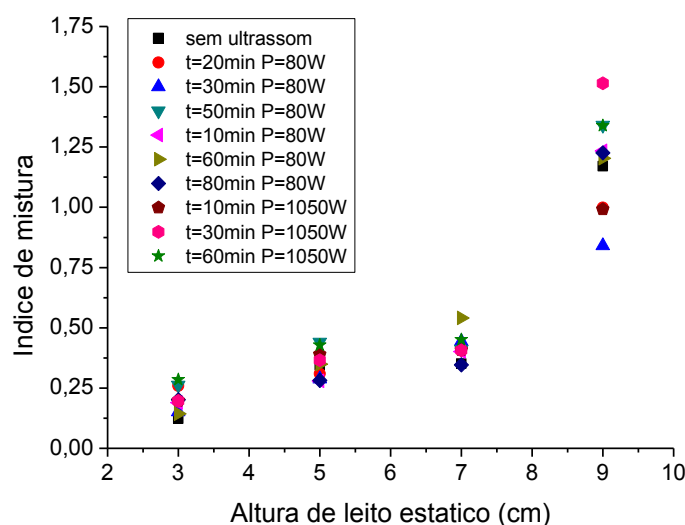


Figura 4.8 – Índice de mistura em função da altura de leito estático, parametrizado na potência aplicada.

4.2.3.2 Pré-tratamento ultrassônico em meio etanólico

As pesquisas da literatura envolvendo pré-tratamento ultrassônico utilizam apenas a sonicação em meio aquoso. O presente trabalho avaliou também a eficácia do etanol como fluido de imersão durante a sonicação. A escolha pelo etanol se deve à sua propriedade dessecante.

Testes preliminares utilizando o etanol (93,2°GL) no pré-tratamento ultrassônico resultaram em significativa redução do teor de umidade do produto, após submissão à secagem em leito de jorro. Sendo assim, visando obter teores de umidade semelhantes aos obtidos anteriormente (quando água era utilizada como meio de imersão na sonicação) reduziu-se o tempo de secagem em 25%. Ou seja, os ensaios de desidratação no leito de jorro que antes eram de 40 min, passaram a ser conduzidos por 30 min. Mesmo após a redução do tempo, teores de umidade menores que 15% foram obtidos, ou seja, dentro do limite máximo estabelecido pela legislação vigente para farináceos (Agência Nacional de Vigilância Sanitária, Resolução - CNNPA nº 12, de 1978).

A redução do tempo de secagem objetivou aspectos econômicos, pois estudos apontam que a secagem é uma operação industrial de elevado consumo energético. Estimativas sugerem que processos térmicos de desidratação correspondam por aproximadamente 9% a 25% do consumo industrial de energia (PASSOS; MUJUMDAR, 2000). Questões ambientais e aspectos nutricionais também foram parâmetros que

corroboraram pois, com a redução do tempo de secagem, resultados favoráveis são esperados com relação à qualidade nutricional do produto, uma vez que a exposição à elevada temperatura, em tempos prolongados, podem contribuir na degradação dos compostos bioativos. Entretanto, em estudos de viabilidade econômica deve-se levar em consideração os custos com o etanol.

Os resultados provenientes da secagem precedida por sonicação em meio aquoso apontaram que o tempo e a potência podem influenciar a qualidade nutricional das sementes de acerola. As análises sugerem que a condição de pré-tratamento (tempo de ultrassom de 10 min e potência de 80 W) mostrou-se favorável sobre a qualidade nutricional do produto. Pesquisas desenvolvidas por Lelas et. al (2006) utilizando cogumelos, couve de Bruxelas e couve-flor aponta que resultados satisfatórios de desidratação foram obtidos quando a sonicação deu-se por apenas 3 min. Dentro desse contexto tempos menores de sonicação, 3 e 10 min, foram avaliados no presente estudo.

Aliado a esse fato, pesquisas desenvolvidas por Fernandes (2008) indicam que o volume do meio de imersão também pode acarretar em alterações do coeficiente difusivo, ou seja, na taxa de secagem. Portanto, os ensaios de ultrassom em meio etanólico foram conduzidos tendo as condições operacionais escolhidas e usando um planejamento fatorial 2^3 , adotando-se como variáveis independentes: tempo de ultrassom, potência e proporção de etanol em relação à massa de resíduo. Os resultados do planejamento são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Avaliação do ultrassom em meio etanólico sobre a desidratação do resíduo de acerola submetido à secagem

Tratamento	Tempo Ultrassom (min) X_1	Potência (W) X_2	Proporção etanol (mL/g) X_3	Redução umidade	Acidez	Ácido ascórbico	Fenólicos totais	Flavonoides
1	-1	-1	-1	83,5	990,3±58,3	71,4±4,2	390,2±7,7	4103,4±83,6
2	+1	-1	-1	87,2	1198,4±33,8	70,5±4,9	554,1±16,2	4845,1±79,0
3	-1	+1	-1	82,3	859,9±36,6	71,0±2,6	339,5±9,8	2221,1±32,7
4	+1	+1	-1	83,8	1018,4±64,1	75,3±1,2	342,1±18,6	3256,0±57,9
5	-1	-1	+1	84,5	1097,6±67,9	64,2±3,2	343,6±27,1	2855,1±56,3
6	+1	-1	+1	84,4	1008,9±36,4	80,5±6,9	511,2±20,7	3011,5±89,6
7	-1	+1	+1	83,9	1182,7±38,3	64,5±7,0	329,5±9,7	3239,9±55,0
8	+1	+1	+1	84,8	1031,9±44,2	75,8±5,7	363,3±3,7	2961,6±49,1
Secagem convencional				78,0	1055,7±58,7	60,5±4,9	448,2±14,9	4348,5±72,4
<i>In natura</i>				-	1598,5±64,4	65,6±6,1	545,5±22,3	1794,4±107,2

Acidez (mg/100 g); ácido ascórbico (mg/100 g); fenólicos (mg ácido gálico/100 g) e flavonoide (µg de rutina/100 g)

A eficácia da secagem é apresentada na forma gráfica pela Figura 4.9, comparando a secagem em leito de jorro com e sem pré-tratamento ultrassônico. Verificam-se nas desidratações com pré-tratamentos aumentos das taxas de transferência de massa, tendo como consequência o aumento da redução de umidade. Atribuem-se esses resultados à alteração da camada limite entre o resíduo de acerola e o meio líquido e à formação de canais microscópicos, causados pela aplicação de ultrassom, decorrentes dos fenômenos de cavitação e efeito esponja. Deve-se levar em consideração também a propriedade dessecante do etanol, o que provavelmente tenha contribuído para a eficácia da secagem.

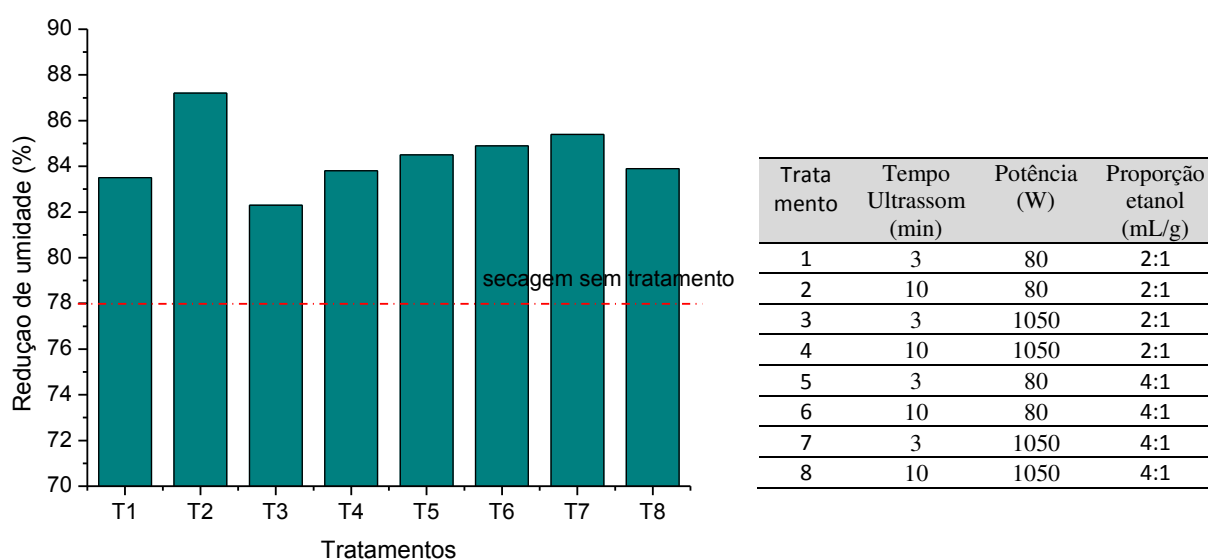


Figura 4.9 - Avaliação da redução da umidade proveniente da secagem precedida por ultrassom em meio etanólico.

Para avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre a desidratação das sementes de acerola utilizou-se uma análise estatística, onde verificou-se, no grau de confiança de 95%, que as variáveis adotadas não exercem efeitos significativos sobre a redução de umidade, ou seja, sobre a taxa de secagem.

As avaliações de teores de ácido cítrico são apresentadas na Figura 4.10. Percebe-se que a sonicação em meio etanólico acarretou, para todos os tratamentos, reduções dos teores, fato esse também evidenciado na secagem sem pré-tratamento. Entretanto, em algumas condições com pré-tratamento a degradação foi menor do que a sem tratamento. Degradações menores ocorreram no ensaio 2 (tempo de sonicação de 10 min, potência de 80 W e proporção de etanol de 2:1). Sendo assim essas condições são favoráveis à secagem e aos teores de ácido

cítrico. De acordo com a literatura o ultrassom pode degradar a matéria orgânica, levando à produção de ácidos, como fórmico e acético (GONZE et al, 1999; YOUSEF et al., 1999), em contrapartida cabe ressaltar que o ácido cítrico possui elevada solubilidade em etanol, o que justifica seu decréscimo

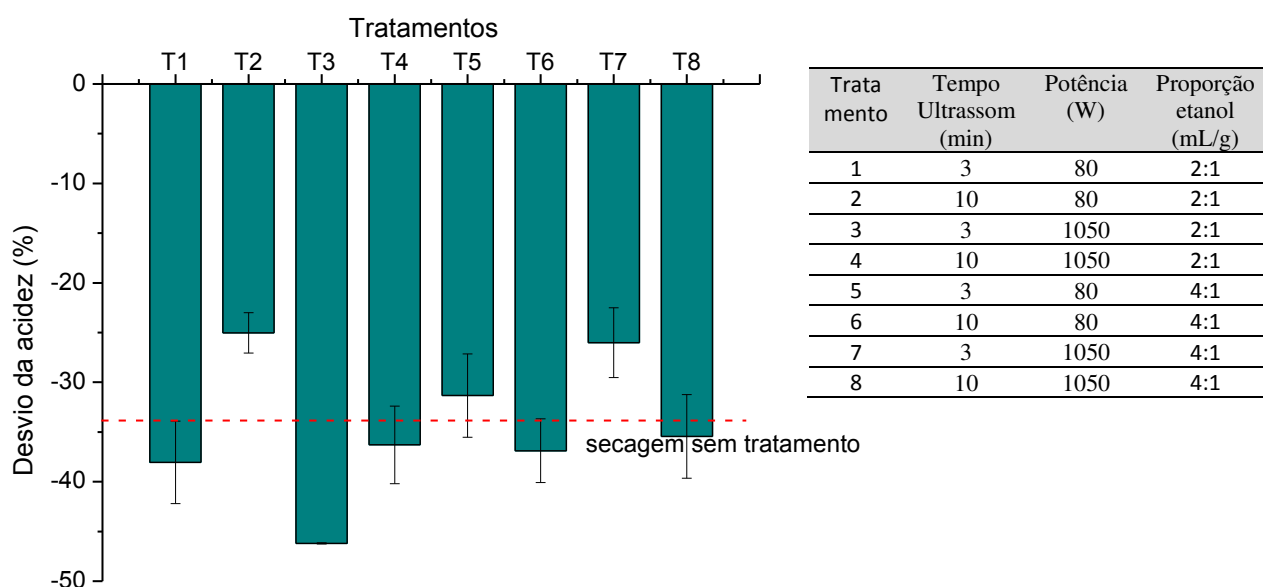


Figura 4.10 - Avaliação do desvio de acidez proveniente da secagem precedida por ultrassom em meio etanólico.

Os efeitos estimados das variáveis independentes sobre o teor de ácido cítrico, expresso através da acidez, mostram a importância do tempo (X_1) e da proporção de etanol (X_3) (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de ácido cítrico resultantes de secagens precedidas por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).

Variáveis	Efeitos ($R^2=0,999$)	P
Média	+1048,52	0,0009
X_1	+31,80	0,0620
X_2	-50,60	0,0390
X_3	+63,51	0,0311
X_1X_2	-27,95	0,0704
X_1X_3	-151,54	0,0130
X_2X_3	+104,65	0,0188

X_1 (tempo de sonicação), X_2 (potência) e X_3 proporção de etanol.

Estas variáveis (X_1 e X_3) afetam positivamente o teor de ácido cítrico, ou seja, para a faixa estudada, acréscimos destas variáveis contribuem para a menor degradação da acidez. Observa-se também uma forte interação entre essas variáveis. Tal efeito sugere que o aumento no tempo de sonicação associado à elevada quantidade de etanol contribuíram para a maior solubilidade do ácido cítrico.

Os teores de vitamina C encontrados nas sementes de acerola após desidratação se mostraram influenciáveis pelo tratamento adotado (Figura 4.11). Aumento das extrações dos teores de ácido ascórbico após a secagem precedida por ultrassom também foram obtidos por Fernandes et al. (2014), o qual afirma que a sonicação pode promover alterações químicas do produto as quais são capazes de liberar em sua forma livre uma quantidade maior de vitamina, ou seja, na forma biodisponível. Ressalta-se que o ácido ascórbico é insolúvel em meio etanólico.

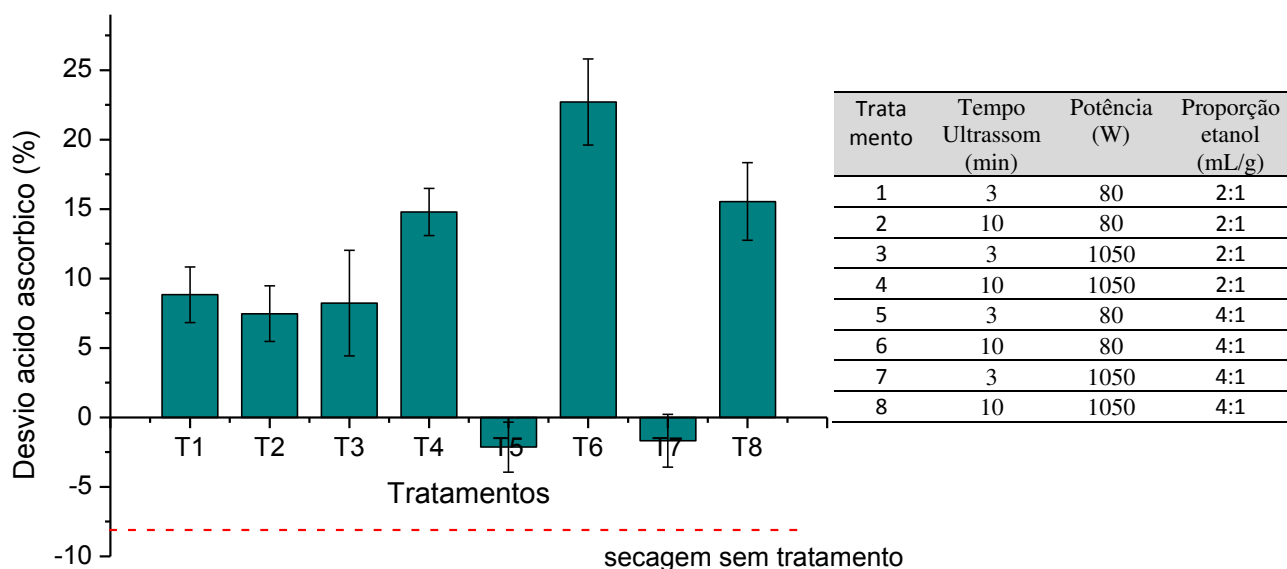


Figura 4.11- Avaliação dos desvios de ácido ascórbico provenientes das secagens precedidas por ultrassom em meio etanólico.

Possíveis alterações estruturais podem explicar o aumento das extrações após a secagem com este pré-tratamento. Segundo Jin et al. (2014) a degradação/retenção de vitamina C pode estar ligada ao colapso da estrutura interna e à liberação de componentes nutricionais durante a secagem. Materiais vegetais naturais são muitas vezes bem organizados em compartimentos celulares, onde nutrientes e outros componentes (açúcar, amido e proteína)

estão localizados em compartimentos celulares naturais. No entanto, a parede da célula torna-se também um fator de controle na biodisponibilidade de nutrientes. O estado físico da estrutura da célula regula a liberação, a transferência de massa, a acessibilidade e a estabilidade bioquímica dos componentes. Processos térmicos podem melhorar a biodisponibilidade, provavelmente como resultado da ruptura das paredes das células de tecidos vegetais, da dissociação dos complexos de nutriente em função da matriz, ou da transformação em uma estrutura molecular mais ativa

As condições experimentais adotadas no ensaio 6 (tempo de sonicação de 10 min, potência de 80 W e proporção de etanol de 4:1) favoreceram as extrações de ácido ascórbico. O resultado confirma-se pela análise dos efeitos das variáveis independentes, tempo de sonicação e proporção de etanol apresentada na Tabela 4.11. Efeitos positivos do tempo de ultrassom e da interação entre essa variável e a proporção de álcool foram obtidos.

Tabela 4.10 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de ácido ascórbico resultantes dos ensaios de secagem precedidos por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).

Variável	Ácido ascórbico ($R^2=0,900$)	P
Média	+71,65	0,000
X ₁	+7,75	0,0041
X ₁ X ₃	+6,05	0,0113

X₁ (tempo) X₂ (potência) e X₃ proporção de etanol

Resultados similares foram obtidos por Rodrigues (2014) em estudos de ultrassom em meio aquoso, onde a fração de água teve o efeito positivo sobre a extração de ácido ascórbico. Segundo o autor, uma vez que a velocidade de propagação das ondas de ultrassons em um líquido é consideravelmente mais elevada do que no ar, a adição de líquido aumenta o efeito de ultrassons fazendo a sua ação mais homogênea.

Tabela 4.11 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de fenólicos totais resultantes dos ensaios de secagem precedidos por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).

Variável	Fenólicos ($R^2=0,957$)	P
Média	+396,7	0,000
X ₁	+92,0	0,0056
X ₂	-106,1	0,0033
X ₁ X ₂	-73,8	0,0119

X₁ (tempo) X₂ (potência) e X₃ proporção de etanol

A partir dos resultados dos teores de fenólicos apresentados na forma gráfica na Figura 4.12 infere-se que para a maioria dos ensaios a sonicação em meio etanólico promoveu a degradação desses compostos bioativos, degradações essas superiores à obtida para a secagem sem pré-tratamento. A análise estatística (Tabela 4.12) indica que os decréscimos se devem à potência e à interação entre tempo e potência.

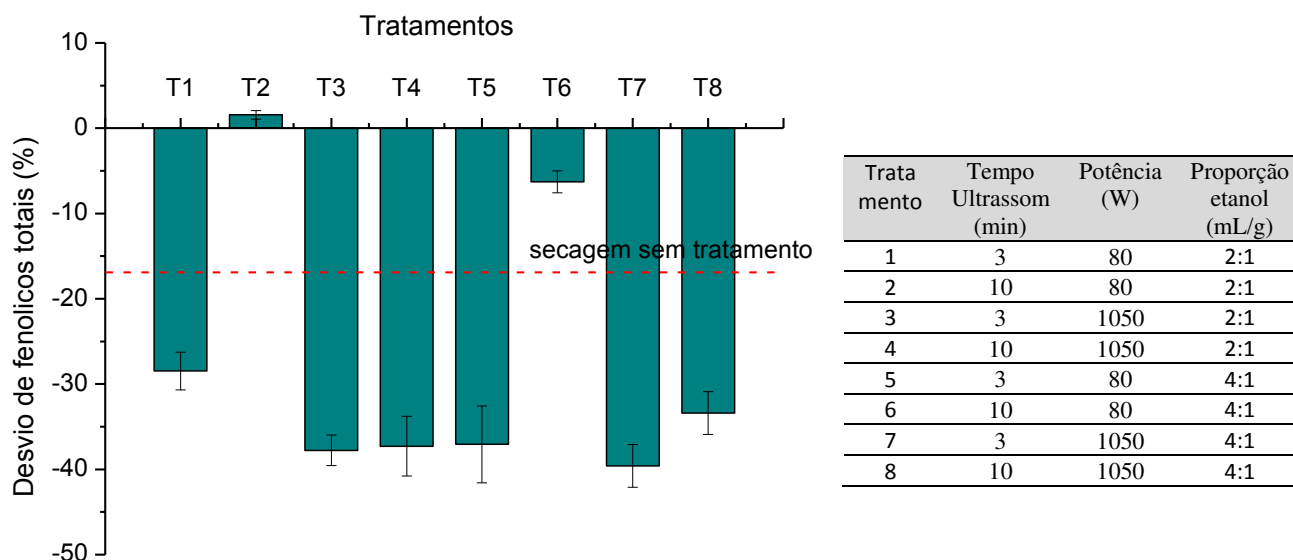


Figura 4.12 - Avaliação dos desvios de fenólicos totais provenientes das secagens precedidas por ultrassom em meio etanólico.

A oxidação enzimática pela polifenoloxidase foi relatada por Djendoubi (2012) como o principal mecanismo de degradação de fenol durante a secagem convectiva. Alterações morfológicas ocasionadas pela sonicação, como por exemplo, aderência celular, podem ter ocorrido no sentido de dificultar as extrações desse composto, fato esse que contribuiu para os decréscimos obtidos.

Reduções mais expressivas que a resultante da secagem sem pré-tratamento foram obtidas para a maioria dos tratamentos precedidos por sonicação em meio etanólico, para o parâmetro teor de flavonoides (Figura 4.13). No entanto, para duas condições experimentais extrações expressivas foram alcançadas, a destacar a apresentada no ensaio 2 (tempo de sonicação de 10 min, potência de 80 W e proporção de etanol de 2:1). Condição esta também favorável à umidade, teores de ácido cítrico e fenólicos.

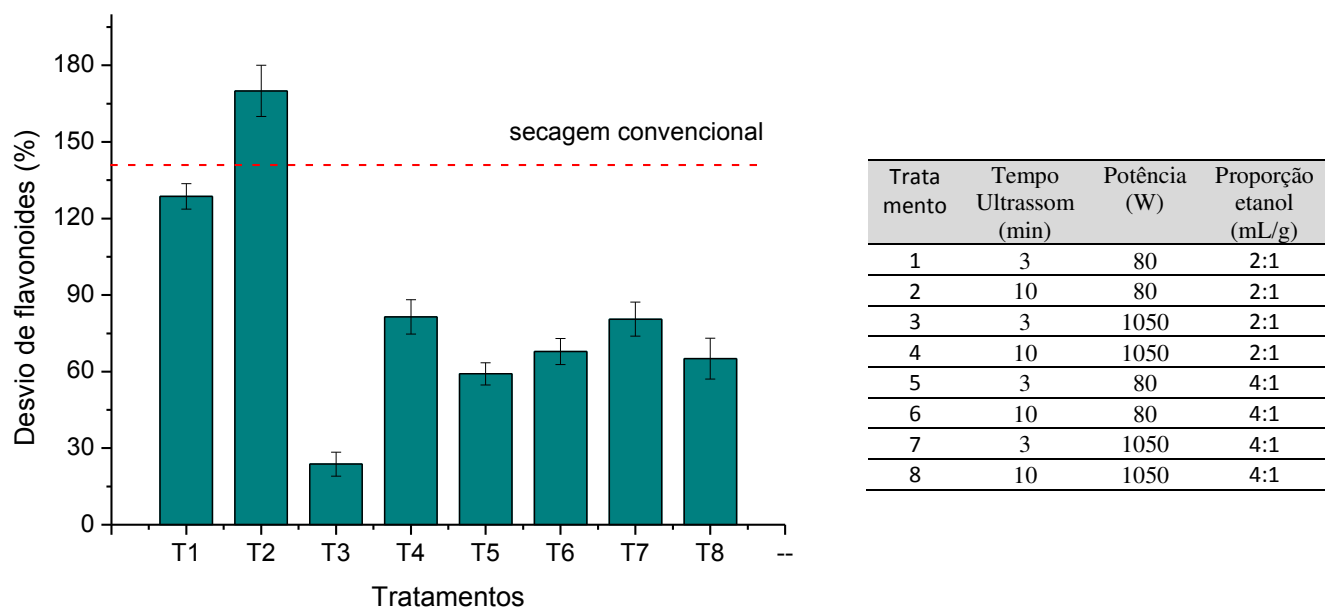


Figura 4.13 - Avaliação dos desvios de flavonoides totais provenientes das secagens precedidas por ultrassom em meio etanólico.

As análises estatísticas (Tabela 4.13) demonstram que a potência do ultrassom exerce efeito desfavorável sobre os compostos bioativos flavonoides, ou seja, acréscimos desta variável ocasionam reduções nas extrações de flavonoides. No entanto, destaca-se o pronunciado efeito favorável da interação entre a potência e a proporção de etanol.

Tabela 4.12 - Efeitos estatísticos das variáveis dependentes sobre os teores de flavonoides resultantes dos ensaios de secagem precedidos por sonicação em meio etanólico ($\alpha < 0,10$).

Variável	Flavonoides ($R^2=0,985$)	P
Média	+3311,7	0,0004
X ₁	+413,7	0,0874
X ₂	-784,1	0,0268
X ₃	-589,4	0,0461
X ₁ X ₃	-474,6	0,0685
X ₂ X ₃	+951,6	0,0185

X₁ (tempo) X₂ (potência) e X₃ proporção de etanol

Em síntese, os resultados sugerem que as condições experimentais adotadas no ensaio 2 favoreceram a qualidade nutricional do produto, aliado ao fato de significativa redução de umidade, quando confrontado à secagem sem pré-tratamento. Portanto, para fins de validação do efeito ultrassônico um grupo de controle foi avaliado. Para esse, adotou-se o pré-tratamento constituído por imersão do resíduo em etanol, entretanto, sem a aplicação do ultrassom. Utilizou-se como comparativo as condições experimentais adotadas no ensaio 2,

consideradas mais favoráveis no presente estudo. Sendo assim, as condições operacionais do ensaio 2 foram reproduzidas, no entanto sem a aplicação de ultrassom (Tabela 4.14).

A Tabela 4.14 apresenta o estudo comparativo entre os ensaios na condição 2 realizados na presença e na ausência de ultrassom. Verifica-se que os parâmetros redução de umidade, acidez e teores de ácido ascórbico não sofreram alterações expressivas, no entanto, o mesmo não ocorre com os teores de fenólicos e flavonoides. Nota-se que a aplicação de ultrassom promove à liberação desse compostos bioativos, o que justifica a sua implementação como pré-tratamento na secagem de resíduos de acerola.

Tabela 4.13 - Estudo comparativo para validação do efeito ultrassônico.

Tratamentos	Redução umidade (%)	Acidez	Ácido Ascórbico	Fenólicos Totais	Flavonoides totais
Ensaio 2 na presença de ultrassom.	87,2	1198,4±33,8	70,5±4,9	554,1±16,2	4845,1±79,0
Ensaio 2 na ausência de ultrassom	86,1	1036,0±49,0	69,0±2,8	428,8±1,4	2088,0±57,3
Secagem sem pré-tratamento	78,0	1055,7±58,7	60,5±4,9	448,2±14,9	4348,5±72,4
Amostra <i>in natura</i>	-	1598,5±64,4	65,6±6,1	545,5±22,3	1794,4±107,2

A avaliação fluidodinâmica no leito realizada através do Índice de Mistura, que correlaciona a fração em massa final de acerola em cada compartimento do leito com a fração mássica inicial de acerola, é apresentada na Figura 4.14.

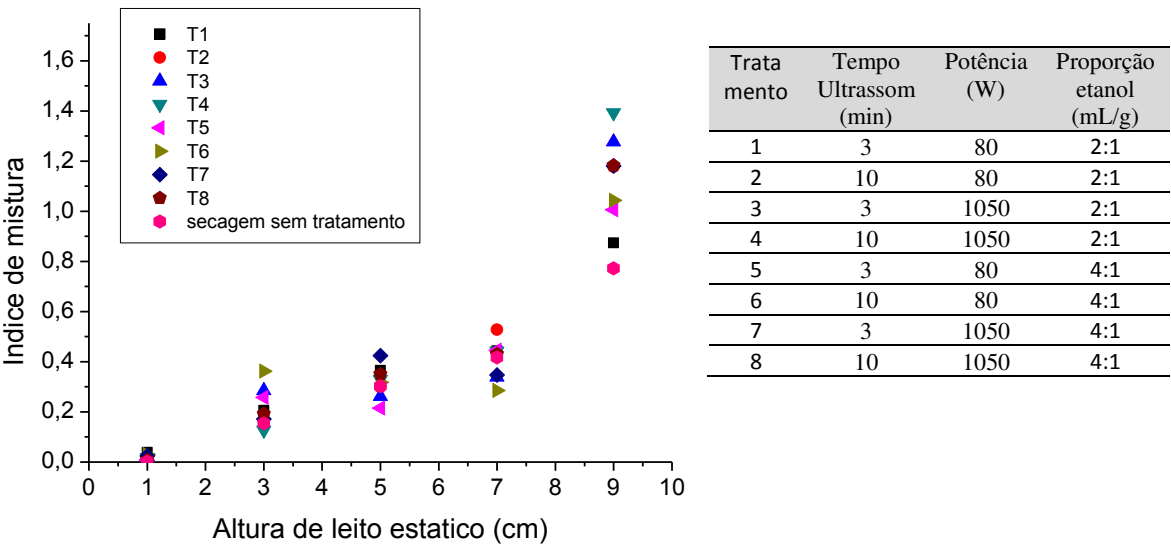


Figura 4.14- Avaliação fluidodinâmica da mistura resíduo de acerola e soja em leito de jorro, submetida a tratamento prévio de sonicação em meio etanólico.

Por meio desse índice é possível avaliar a segregação ocorrida durante a secagem. Para baixas alturas de leito estático existe a concentração de soja ($I_m < 1$) e para elevadas alturas de leito estático, o leito de concentra em acerola ($I_m > 1$).

Os resultados apontam que existe uma discrepância maior entre os índices de mistura obtidos na altura de leito estático de 9 cm, fato esse também evidenciado para os pré-tratamentos com ultrassom em meio aquoso. Nota-se, nessa altura de leito estático, que os tratamentos que resultaram em leitos mais homogêneos foram o T5 e T6, que possuem em comum o tempo de sonicação de 10 min e a potência de 80 W.

4.2.3.3. Pré-tratamento com pulverização de etanol

O etanol é um solvente orgânico que possui elevada aplicabilidade na indústria de alimentos devido à sua propriedade sanitizante. Pesquisas envolvendo a aplicação do etanol como forma de pré-tratamento durante a desidratação de alimentos são encontradas na literatura e vem apresentado resultados satisfatórios (LURIE et al., 2006; BRAGA, 2007; BRAGA e SILVA, 2010 e TOSATO, 2012).

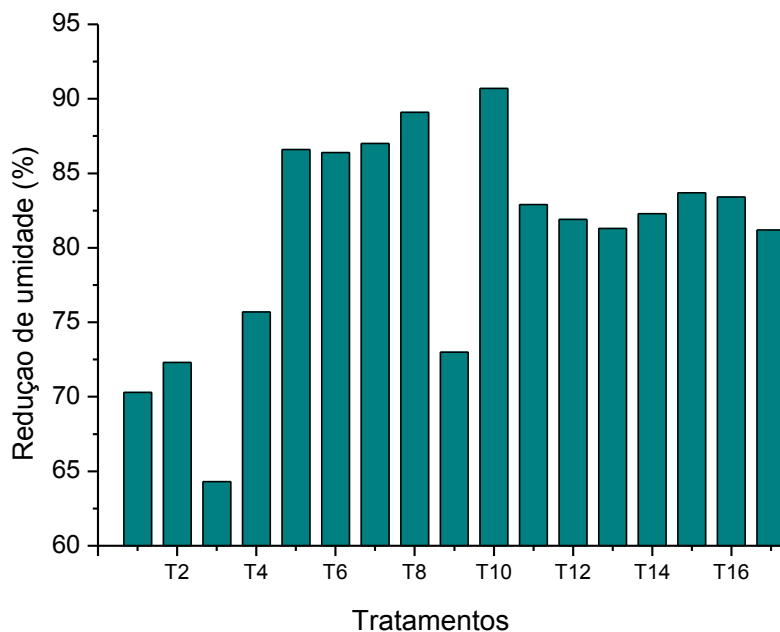
As condições operacionais dos ensaios com a pulverização de etanol foram selecionadas usando um planejamento central composto com três repetições no ponto central, utilizando as variáveis independentes: temperatura do ar (X_1), vazão de entrada de ar (X_2) e volume de etanol em mL/g (X_3), cuja matriz e resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.15.

Os resultados sugerem que a pulverização de etanol sobre a superfície das sementes de acerola, antes da secagem em jorro, contribui para o aumento de sua desidratação, pois para a maioria dos tratamentos, remoções de água maiores que 80% foram obtidas (Figura 4.15). Os resultados estão em conformidade com os obtidos por Braga e Silva (2010) que realizaram estudos envolvendo a secagem de fatias de abacaxi. Nesta pesquisa foram confrontadas as secagens: sem pré-tratamento, sob atmosfera atomizada com etanol e a precedida por tratamento com etanol. De modo similar, resultados mais favoráveis foram alcançados para as amostras tratadas com etanol, resultando em cinética de secagem mais rápida e com menor degradação da cor. Corrêa et al. (2012) em desidratação de bananas também obtiveram resultados satisfatórios para amostras pulverizadas com etanol.

Tabela 4.14 - Avaliação da secagem e da composição nutricional para os resíduos submetidos à pulverização de etanol após a secagem.

Ensaio	Temperatura (X ₁)	Q/Qmin (X ₂)	Volume etanol (X ₃)	Umidade final (%)	Acidez	Ácido Ascórbico	Fenólicos totais	Flavonoides	Proteína
T1	-1 (50)	-1 (1,1)	-1 (0,390)	20,5	732,48	68,6	1136,9	4550,5	10,64
T2	-1 (50)	-1 (1,1)	1 (0,650)	19,7	788,91	58,0	912,6	3428,0	11,99
T3	-1 (50)	1 (1,2)	-1 (0,390)	24,8	838,97	68,2	1224,7	3340,3	9,88
T4	-1 (50)	1 (1,2)	1 (0,650)	18,6	772,40	62,7	1171,0	5128,9	11,88
T5	1 (70)	-1 (1,1)	-1 (0,390)	9,3	806,14	71,1	1281,1	5383,2	10,56
T6	1 (70)	-1 (1,1)	1 (0,650)	9,2	989,69	77,3	1087,9	4205,5	10,42
T7	1 (70)	1 (1,2)	-1 (0,390)	9,4	813,55	73,4	1259,9	3422,5	8,84
T8	1 (70)	1 (1,2)	1 (0,650)	8,5	862,18	71,2	853,6	4282,2	7,75
T9	-α (43,2)	0 (1,15)	0 (0,520)	21,1	828,65	67,9	808,7	5459,2	10,73
T10	α (76,8)	0 (1,15)	0 (0,520)	6,6	906,70	85,3	992,1	4604,4	6,91
T11	0 (60)	-α (1,07)	0 (0,520)	12,2	782,16	59,7	1466,7	4624,6	10,78
T12	0 (60)	α (1,23)	0 (0,520)	12,9	740,65	59,9	1456,1	3936,4	9,89
T13	0 (60)	0 (1,15)	-α (0,302)	13,4	771,49	70,3	1399,4	3103,0	10,36
T14	0 (60)	0 (1,15)	α (0,739)	12,5	863,49	60,6	1168,3	3875,2	11,45
T15	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)	11,8	851,21	65,3	1432,0	4702,0	9,2
T16	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)	11,5	857,94	65,6	1436,9	4711,0	9,8
T17	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)	12,0	854,78	66,5	1430,0	4712,4	9,47

Acidez (mg/100 g); ácido ascórbico (mg/100 g); fenólicos (mg ácido gálico/100 g) e flavonoide (µg de rutina/100 g)



Tratamento	Temperatura (X ₁)	Q/Qmin (X ₂)	Volume etanol (X ₃)
T1	-1 (50)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T2	-1 (50)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T3	-1 (50)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T4	-1 (50)	1 (1,2)	1 (0,650)
T5	1 (70)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T6	1 (70)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T7	1 (70)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T8	1 (70)	1 (1,2)	1 (0,650)
T9	-α (43,2)	0 (1,15)	0 (0,520)
T10	α (76,8)	0 (1,15)	0 (0,520)
T11	0 (60)	-α (1,07)	0 (0,520)
T12	0 (60)	α (1,23)	0 (0,520)
T13	0 (60)	0 (1,15)	-α (0,302)
T14	0 (60)	0 (1,15)	α (0,739)
T15	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T16	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T17	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)

Figura 4.15 – Redução da umidade (%) para diferentes condições operacionais de temperatura e Q/Qmin e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.

De modo semelhante Tosato (2012) em secagem de maçãs Fuji avaliou os efeitos do gotejamento de etanol comercial sobre a superfície das maçãs como forma de tratamento. A adição de etanol provocou a aceleração do processo de secagem contribuindo na qualidade física do produto, sendo a metodologia adotada considerada viável em termos econômicos.

Verifica-se que maiores remoções de água (Figura 4.15) ocorreram nos tratamentos, T5, T6, T7, T8 e T10, os quais se encontram associados a condições experimentais de maiores temperaturas.

A Figura 4.16 apresenta o diagrama de Pareto, uma das formas de se avaliar visualmente a influência dos fatores estudados sobre a resposta. O efeito estimado indica o quanto cada fator (variável preditora) influi nas respostas estudadas, onde quanto maior o efeito, maior será a sua influência, (BARROS NETO et al., 2001). O diagrama de Pareto explicita os significativos efeitos da temperatura sobre a redução de umidade.

Após análise de regressão, o modelo estatístico ajustado à umidade, considerando-se apenas os efeitos significativos, no nível de significância de 20% ($p < 0,20$) é apresentado pela Equação 4.9. Foi escolhido o nível de significância de 20%, pois no nível de 5% poucas variáveis se mostraram significativas.

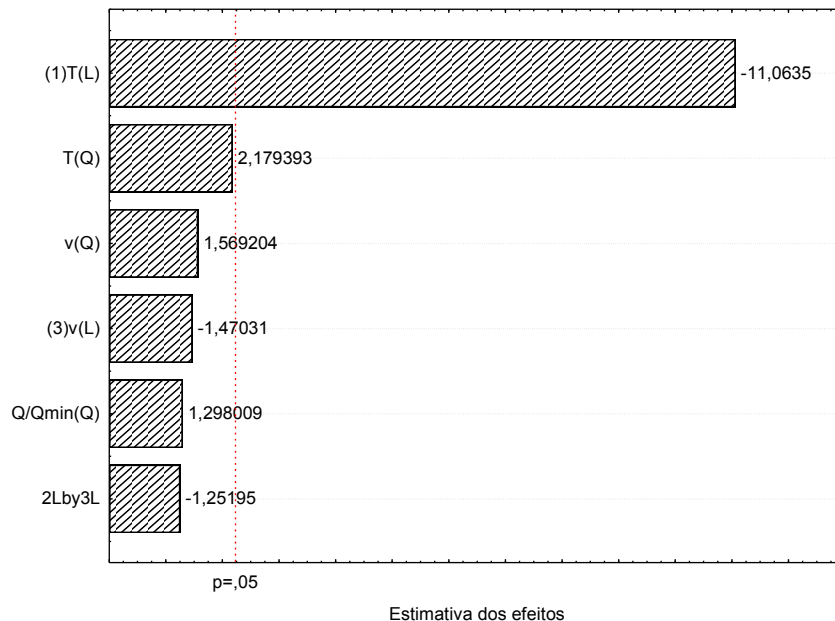


Figura 4.16 - Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre a umidade resultante da secagem precedida pela pulverização de etanol.

$$umidade = 11,65 + x'b + x'Bx \quad (4.9)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -5,24 \\ 0,00 \\ -0,69 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1,14 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,68 & -0,78 \\ 0,00 & -0,78 & 0,81 \end{bmatrix}$$

em que X_1 =temperatura, X_2 = vazão de entrada de ar (Q/Q_{min}) e X_3 = volume de etanol

Observa-se pela Tabela 4.16 que o valor do coeficiente de determinação R^2 foi de 93,0%, indicando que o modelo quadrático representa bem a relação entre os efeitos e a resposta. Entretanto, para se determinar se o modelo quadrático proposto possui significância estatística faz-se necessária a realizar a análise de variância (ANOVA). A síntese dos resultados da análise de regressão para todas as variáveis respostas analisadas é mostrada na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 - Análise de regressão para o modelo ajustado à umidade.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coefficiente da correlação	F_{cal}	F_{tab} (95%)	F_{cal}/F_{tab}
0,930	0,964	22,01	3,22	6,84

De acordo com Barros Neto et al. (2001) uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste F, pode não ser útil para realizar previsões pelo fato de não cobrir uma faixa extensa dos fatores estudados. Box e Wetz (1973) concordam e sugerem que, para se considerar uma regressão significativa, não apenas estatisticamente, mas também útil para fins preditivos, o valor de F calculado para a regressão deve ser, no mínimo, de quatro a cinco vezes maiores que o valor de F tabelado. Dentro desse contexto nota-se a partir da análise de variância (Tabela 4.16) que o modelo proposto possui significância estatística, uma vez que o valor de F (calculado) é 6,84 maior que o F(tabelado). A avaliação do modelo proposto pode ainda ser realizada através da observação do gráfico dos valores preditos versus os valores observados, conforme Anexo 2.

A Figura 4.17 (A) mostra o comportamento da umidade frente às variações da temperatura e da vazão de entrada de ar, para um volume de etanol fixo no ponto central, correspondente a 0,520 mL/g resíduo e a Figura 4.17 (B) explicita o comportamento da umidade em relação à temperatura e ao volume de etanol.

A importante influência da temperatura sobre a umidade é evidenciada nas superfícies de resposta, confirmada pelos efeitos no diagrama de Pareto (Figura 4.16). Portanto, os resultados sugerem que a transferência convectiva de ar não se mostra relevante em relação à temperatura, devido ao restrito tempo de contato entre fluido-partícula na região de jorro. Resultados similares foram obtidos na Figura 4.17 (B) onde o efeito da temperatura se sobrepõe ao de volume de etanol pulverizado.

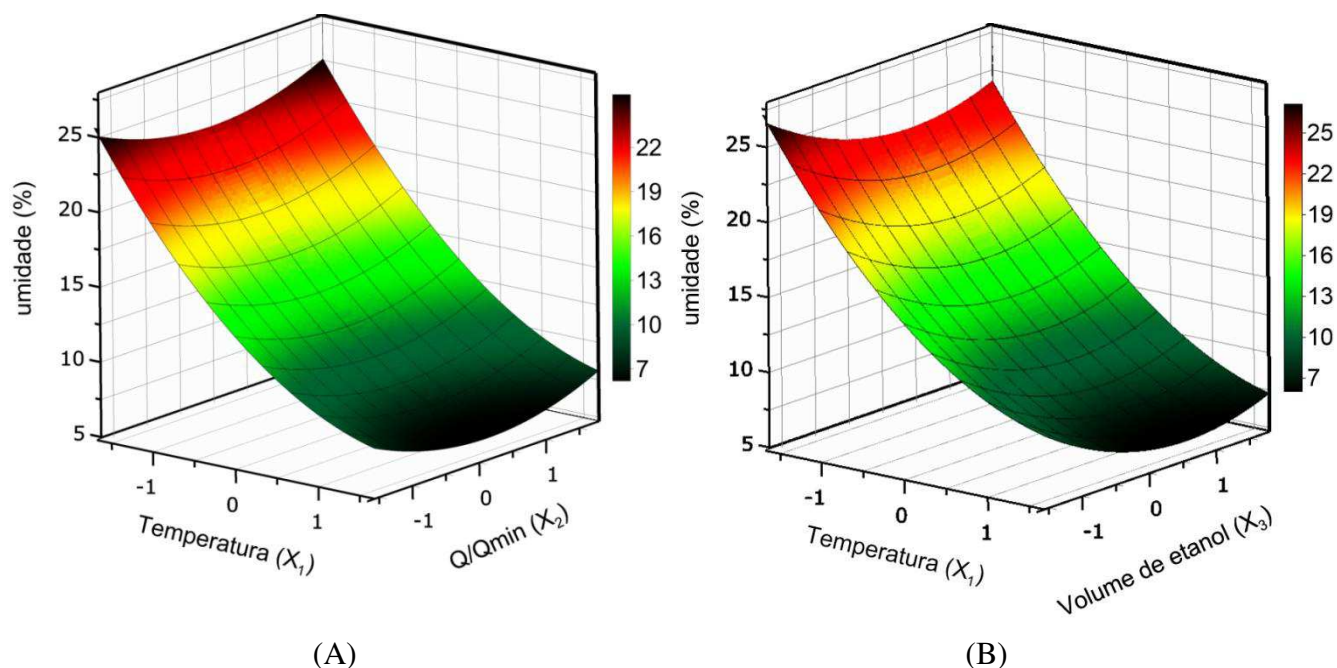


Figura 4.17 - Superfície de resposta ajustada à umidade em função da temperatura e da vazão de ar, para a pulverização de 0,520 mL de etanol/g resíduo.

Considerando-se que as condições operacionais adotadas na secagem podem favorecer a degradação dos componentes nutricionais e visando obter as melhores condições operacionais foram também avaliados os efeitos dessas variáveis sobre teores nutricionais. Dentro desse contexto, a Figura 4.18 ilustra os desvios de acidez, ou seja, as variações obtidas em relação à amostra *in natura*, para todos os tratamentos adotados. Verifica-se que as menores degradações ocorreram nos tratamentos T6 e T10, condições essas coincidentes com as mais favoráveis à remoção de umidade.

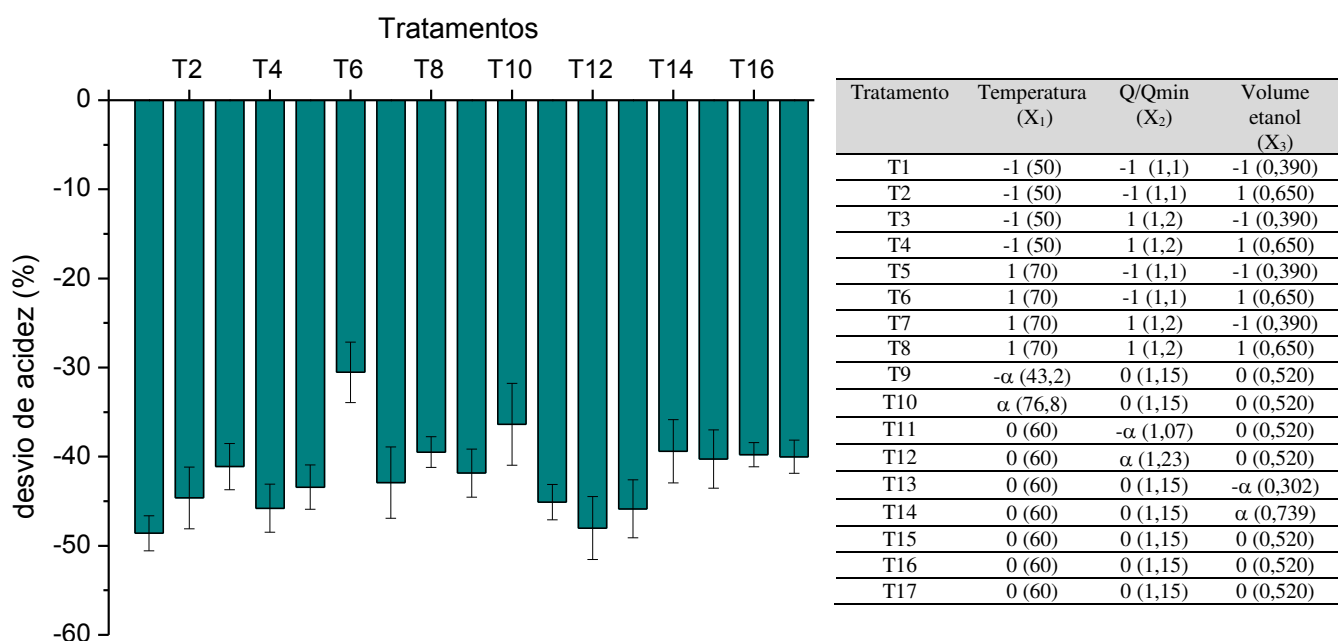


Figura 4.18 - Variações dos teores de acidez para diferentes condições operacionais de temperatura e Q/Qmin e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de

Destaca-se que para todos os tratamentos aplicados foram obtidas reduções dos teores de ácido cítrico, ou seja, degradações desse composto. As reduções de ácido cítrico podem estar relacionadas à baixa estabilidade frente a tratamentos térmicos ou ainda à conversão desse ácido em açúcares ou outros compostos (PODSEDEK, 2007). Reduções de acidez também foram obtidas por Silva (2014) em estudos de desidratação de sementes de acerola em secador roto-aerado, com tratamento prévio constituído por pulverização de etanol. Ressalta-se, entretanto, que acidez em excesso pode causar certa adstringência, o que afeta o sabor final do produto.

O diagrama de Pareto (Figura 4.19) explicita que, na faixa de estudo, a temperatura é a variável operacional que exerce maior efeito sobre a acidez. Em concordância Silva (2014) também obteve reduções menos expressivas na condição de temperatura de 80°C.

Acréscimos de volume de etanol contribui para a redução da degradação desse composto. Destaca-se ainda que todas as interações entre as variáveis independentes exercem efeitos significativos sobre a acidez da amostra, ao nível de confiança de 95%.

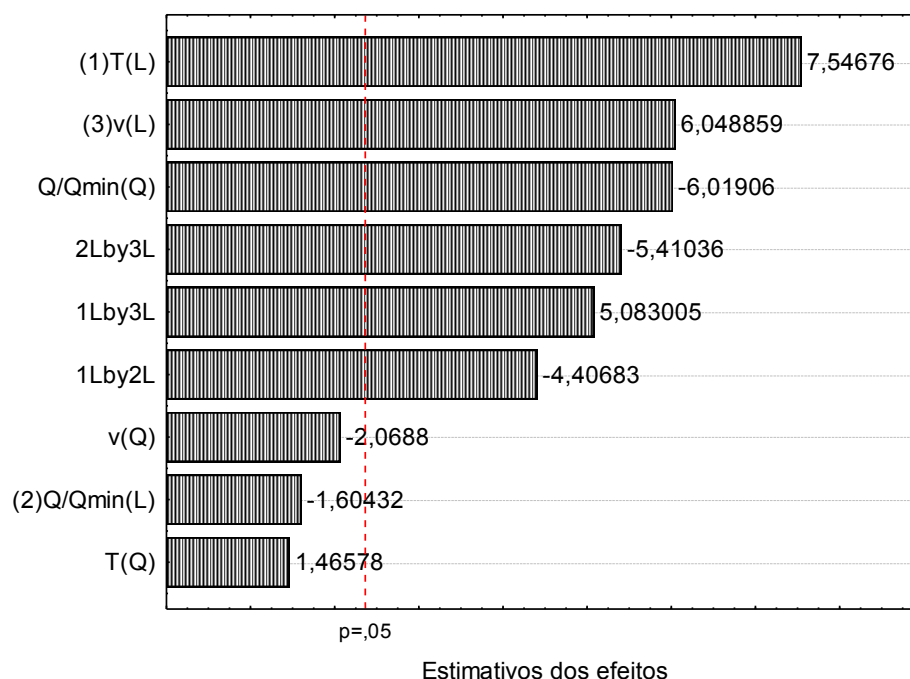


Figura 4. 19- Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de ácido cítrico resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.

A Equação 4.10 apresenta o modelo preditivo ajustado aos teores de ácido cítrico para as sementes de acerola submetidas à secagem em leito de jorro, as quais foram pré-tratadas com a pulverização de etanol.

$$acidez = 863,25 + x'b + x'Bx \quad (4.10)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 34,42 \\ 0,00 \\ 27,59 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,000 & -26,26 & 30,29 \\ -26,26 & -32,39 & -32,24 \\ 30,29 & -32,24 & -12,56 \end{bmatrix}$$

em que X_1 =temperatura, X_2 = vazão de entrada de ar (Q/Q_{\min}) e X_3 = volume de etanol

O modelo estatístico exposto para os teores de acidez, de acordo com a Tabela 4.17, apresenta uma porcentagem de variação explicada pela regressão de 94,8%. O coeficiente de correlação (0,974) indica um ajuste satisfatório entre os valores observados e os preditos pela correlação. De acordo com a análise de variância (Tabela 4.17) o modelo apresentado se mostra significativo do ponto de vista estatístico, pois o F calculado foi aproximadamente sete vezes maior que o F tabelado. Os valores preditos se aproximam dos observados, assim como não são perceptíveis alterações significativas no gráfico valor do normal esperado em função dos resíduos (Anexo 3).

Tabela 4.16 - Análise de regressão para o modelo ajustado à acidez.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (95%)	F _{cal} /F _{tab}
0,948	0,974	23,57	3,29	7,16

A superfície de resposta ilustrada na Figura 4.20 mostra o comportamento da acidez frente às variações de temperatura e volume de etanol, quando a vazão de entrada de ar encontra-se fixa no ponto central, ou seja, vazão de ar 15% acima do jorro mínimo. Confrontando-se com amostra *in natura* ($1424,8 \pm 36,8$) mg/100 g verifica-se que os maiores teores de ácido cítrico encontram-se associados à condição de elevado volume de etanol (0,739 mL/g) e elevadas temperaturas ($76,8^\circ\text{C}$), ou seja região de menor degradação nutricional para esse composto. Portanto, os resultados apontam os efeitos benéficos da pulverização de etanol como forma de pré-tratamento.

A superfície de resposta apresentada pela Figura 4.21 sugere que a pulverização de etanol reduz a degradação da acidez do resíduo de acerola, pois um aumento do volume de etanol reduz a degradação desse composto. A condição experimental de baixos volumes de etanol (0,302 mL/g) associada a baixas vazões de ar (7% acima do jorro mínimo) contribui para o aumento da degradação dos teores de ácido cítrico. A Figura 4.21 ilustra a interação

entre as variáveis em estudo, o que pode ser confirmado pelo diagrama de Pareto (Figura 4.19)

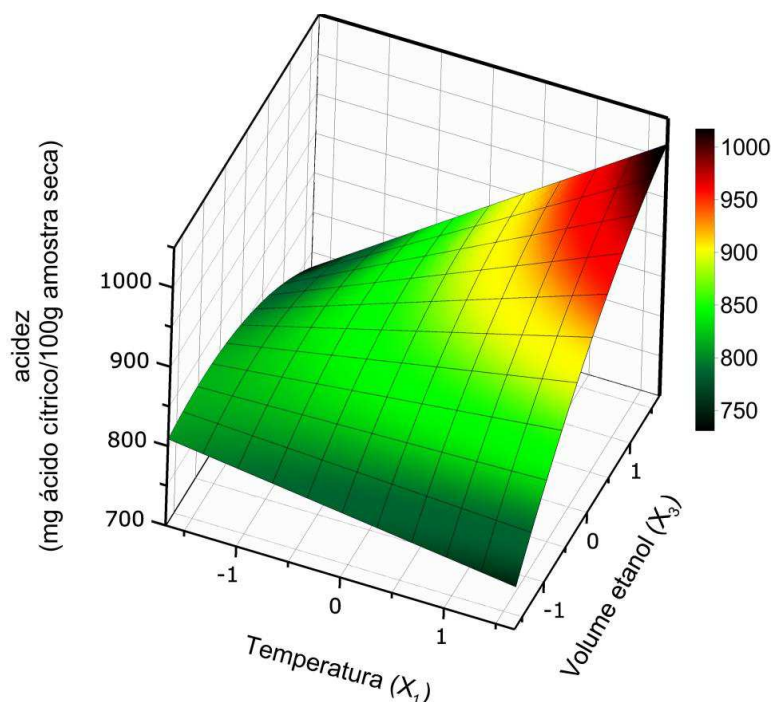


Figura 4. 20- Superfície de resposta ajustada à acidez em função da temperatura e do volume de etanol, para uma vazão de entrada de ar fixa em 15% acima do jorro mínimo.

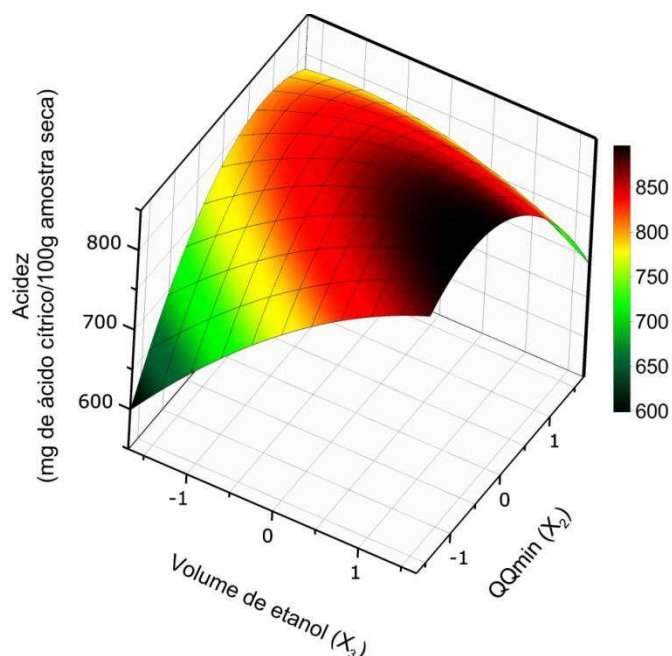
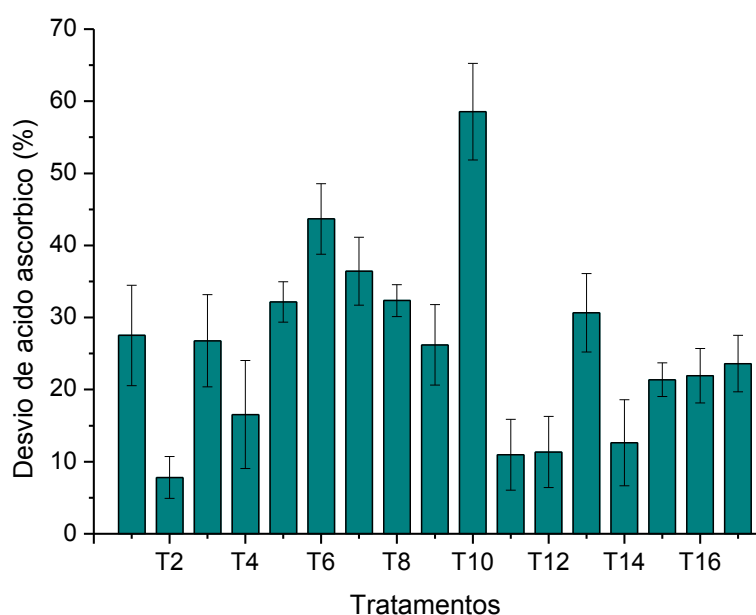


Figura 4.21 - Superfície de resposta ajusta à acidez em função do volume de etanol e da vazão de entrada de ar, à temperatura constante de 60°C.

A Figura 4.22 ilustra os resultados dos teores de ácido ascórbico obtidos nos experimentos de secagem precedidos por pulverização de etanol. Esses desvios se

caracterizam por acréscimos dos teores em relação ao *in natura*, onde os tratamentos T10 ($T=76,8^{\circ}$, $Q/Q_{min}=1,15$, $V=0,52$ mL/g) e T6 ($T=70^{\circ}C$, $Q/Q_{min}=1,1$, $V=0,65$ mL/g) foram mais favoráveis à extração, ou seja, as condições operacionais supracitadas disponibilizaram teores mais elevados de vitamina C em sua forma livre (biodisponível). Ressalta-se que essas mesmas condições operacionais favoreceram a secagem e promoveram as menores degradações dos teores de acidez.

Segundo Fernandes (2014) a secagem pode afetar a química vinculada à vitamina, o que contribui para esse acréscimo. Resultados similares foram obtidos por Fernandes (2014) em estudos com maçãs, onde o autor obteve acréscimos dos teores de vitamina B, nos experimentos envolvendo a secagem na presença e na ausência de ultrassom.



Tratamento	Temperatura (X ₁)	Q/Q _{min} (X ₂)	Volume etanol (X ₃)
T1	-1 (50)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T2	-1 (50)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T3	-1 (50)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T4	-1 (50)	1 (1,2)	1 (0,650)
T5	1 (70)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T6	1 (70)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T7	1 (70)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T8	1 (70)	1 (1,2)	1 (0,650)
T9	-α (43,2)	0 (1,15)	0 (0,520)
T10	α (76,8)	0 (1,15)	0 (0,520)
T11	0 (60)	-α (1,07)	0 (0,520)
T12	0 (60)	α (1,23)	0 (0,520)
T13	0 (60)	0 (1,15)	-α (0,302)
T14	0 (60)	0 (1,15)	α (0,739)
T15	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T16	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T17	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)

Figura 4.22 - Variações dos teores de ácido ascórbico para diferentes condições operacionais de temperatura e Q/Q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.

A partir do diagrama de Pareto (Figura 4.23) percebe-se dentro do domínio experimental estudado que a temperatura exerce efeito pronunciado sobre a vitamina C, sendo esse favorável à resposta, ou seja, acréscimos desse fator geram aumentos na extração de vitamina C. Percebe-se também que entre as interações a interação entre a temperatura e o volume de etanol é estatisticamente significativa sobre os teores de ácido ascórbico. Considerando-se apenas as variáveis significativas do ponto de vista estatístico, o modelo

ajustado aos dados experimentais é representado pela equação 4.11, para um nível de confiança de 95%.

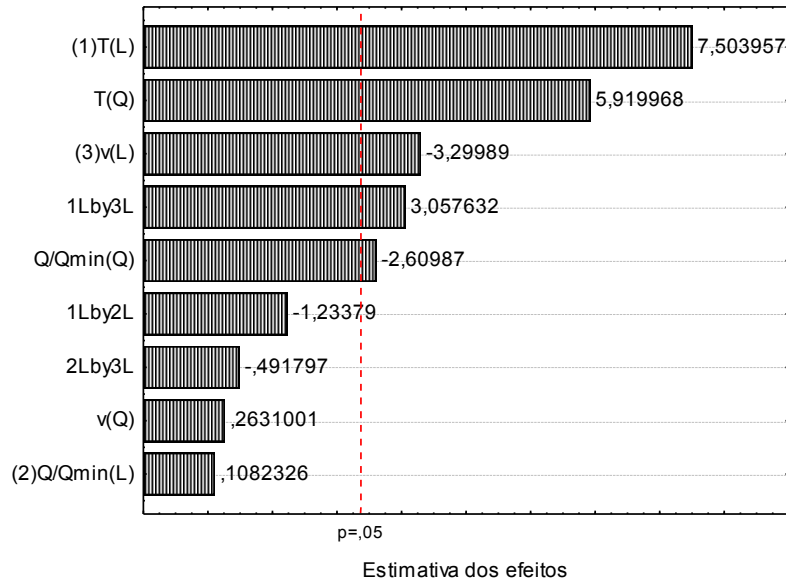


Figura 4.23- Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de ácido ascórbico resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.

$$\text{ácido ascórbico} = 65,98 + x'b + x'Bx \quad (4.11)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 4,70 \\ 0,00 \\ -2,08 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 4,06 & 0,00 & 2,52 \\ 0,00 & -1,87 & 0,00 \\ 2,52 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix}$$

em que X_1 =temperatura, X_2 = vazão de entrada de ar (Q/Q_{min}) e X_3 = volume de etanol

Pela Tabela 4.18 é possível inferir que o modelo de regressão aplicado aos teores de ácido ascórbico explica 93,7% das variações dos teores de ácido ascórbico em função das variáveis estudadas. Ressalta-se ainda o elevado coeficiente de correlação de 98%, indicativo de ajuste satisfatório entre os valores preditos e os observados, fato esse também evidenciado nos gráficos apresentados no Anexo 4. O anexo compara os pontos experimentais para os teores de ácido ascórbico e os valores calculados pelo modelo. Infere-se que existe ajuste satisfatório do modelo, confirmando a análise de variância. O anexo 4 explicita a relação entre os valores normais esperados e os resíduos, para a resposta teores de ácido ascórbico.

Pelo teste F da regressão contata-se que o modelo ajustado aos dados experimentais é estatisticamente significativo e preditivo, pois o valor da razão para o teste F é de 10,12.

Tabela 4.17 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de ácido ascórbico.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coefficiente da correlação	F_{cal}	$F_{tab} (95\%)$	F_{cal}/F_{tab}
0,937	0,98	32,99	3,20	10,12

A Figura 4.24 apresenta a superfície de resposta ajustada pelo modelo preditivo obtido para os teores de ácido ascórbico em função da temperatura e do volume de etanol, mantida constante no ponto central a vazão de entrada de ar (15% acima do jorro mínimo).

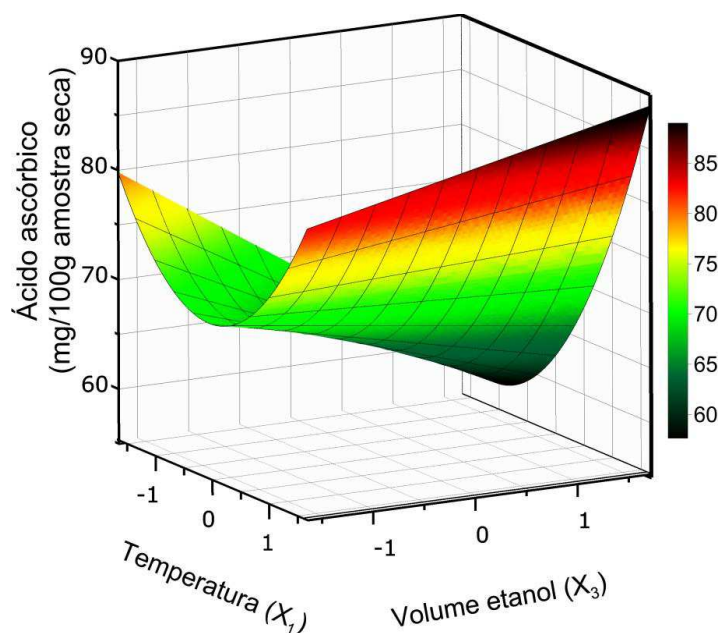


Figura 4.24 - Superfície de resposta ajustada aos teores de ácido ascórbico em função da temperatura e do volume de etanol pulverizado, a uma vazão de ar 15% acima do jorro mínimo.

Para todos os tratamentos adotados nota-se que a secagem com pré-tratamento promoveu um aumento nos teores de ácido ascórbico, quando comparado ao da amostra *in natura* ($53,8 \pm 7,4$). Pela Figura 4.24 verifica-se que a pulverização com volumes maiores de etanol ($0,739 \text{ mL/g}$) associados a temperaturas elevadas ($76,8^\circ\text{C}$) contribuiu para o acréscimo da extração dessa vitamina. Percebe-se, também o efeito da interação entre as variáveis independentes selecionadas. Resultados similares foram obtidos por Silva (2014) em estudos com secagem de resíduo de acerola em leito roto-aerado, onde o efeito benéfico da temperatura sobre o teor de ácido ascórbico, em relação ao resíduo *in natura*, foi obtido para todas as secagens realizadas (com ou sem pré-tratamento). Este comportamento também foi encontrado por Duzzioni et al. (2013) em estudos com resíduos de acerola em leito fixo e por Ozgur et al. (2011) ao secar pimentas. Isto pode ter ocorrido, porque o aumento da

temperatura contribui para a desativação de enzimas responsáveis pela degradação do ácido ascórbico, promovendo dessa forma a maior extração nesta condição.

A Figura 4.25 explicita a superfície de resposta ajustada aos teores de ácido ascórbico presentes nas sementes de acerola desidratadas em leito de jorro, mantido fixo no ponto central o volume de etanol pulverizado (0,520 mL etanol/g resíduo). A partir desta é possível inferir que o aumento da temperatura contribui para a extração dos teores de vitamina C, independente da vazão de entrada de ar adotada no experimento, o que comprova o efeito mais importante da temperatura em relação à vazão de ar de entrada.

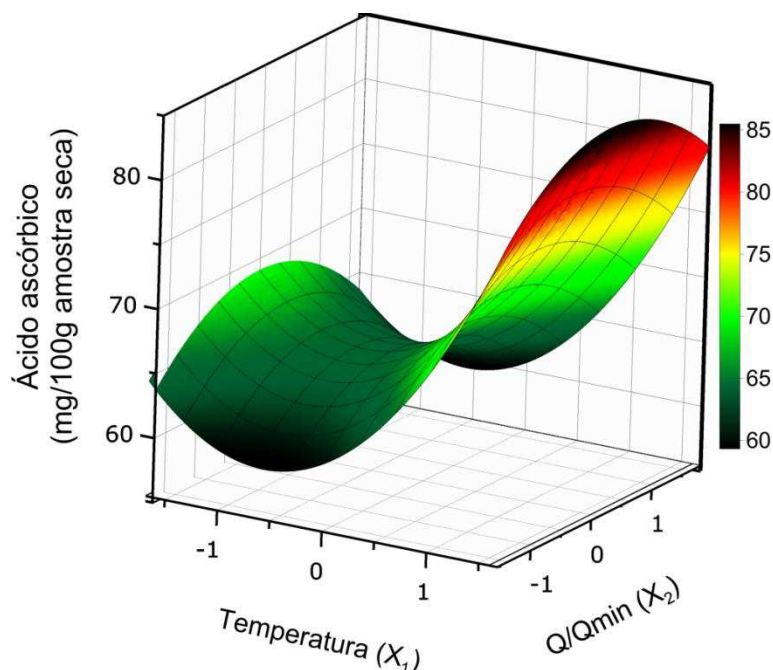


Figura 4.25 - Superfície de resposta ajustada aos teores de ácido ascórbico em função da temperatura e da vazão de entrada de ar, para um volume de fixo de etanol pulverizado (0,520 mL etanol/g resíduo).

Analisando-se os teores de compostos fenólicos das sementes de acerola tratadas com a pulverização de etanol e desidratadas em leito de jorro, representados na Figura 4.26, percebe-se que as variáveis independentes adotadas exercem efeitos diversos sobre os fenólicos totais. Ou seja, acréscimos e decréscimos desses compostos foram obtidos, dependendo da condição operacional.

Os resultados sugerem que a secagem a 60°C contribui para a extração de fenólicos, fato esse creditado aos tratamentos T11 a T17 (excetuando-se T14) que possuem em comum a temperatura de secagem. Acréscimos em fenólicos também foram obtidos por Silva (2014), em estudos de desidratação de sementes de acerola pulverizadas por etanol. Ressalta-se que as condições operacionais adotadas nos tratamentos T8 ($T=70^{\circ}\text{C}$, $Q/Q_{min}=1,2$, $V=0,65$ mL/g)

e T9 (T=43,2°C, Q/Q_{min}= 1,15, V=0,52 mL/g) acarretaram em maiores decréscimos desses compostos (Figura 4.26).

O diagrama de Pareto representado pela Figura 4.27 apresenta os efeitos da temperatura, vazão de entrada de ar e volume de etanol, bem como suas interações, sobre a resposta teores de fenólicos totais. Ressalta-se que todas as variáveis estatisticamente significativas exercem efeitos negativos sobre o teor de fenólicos. Em destaque o relevante efeito da temperatura sobre a resposta.

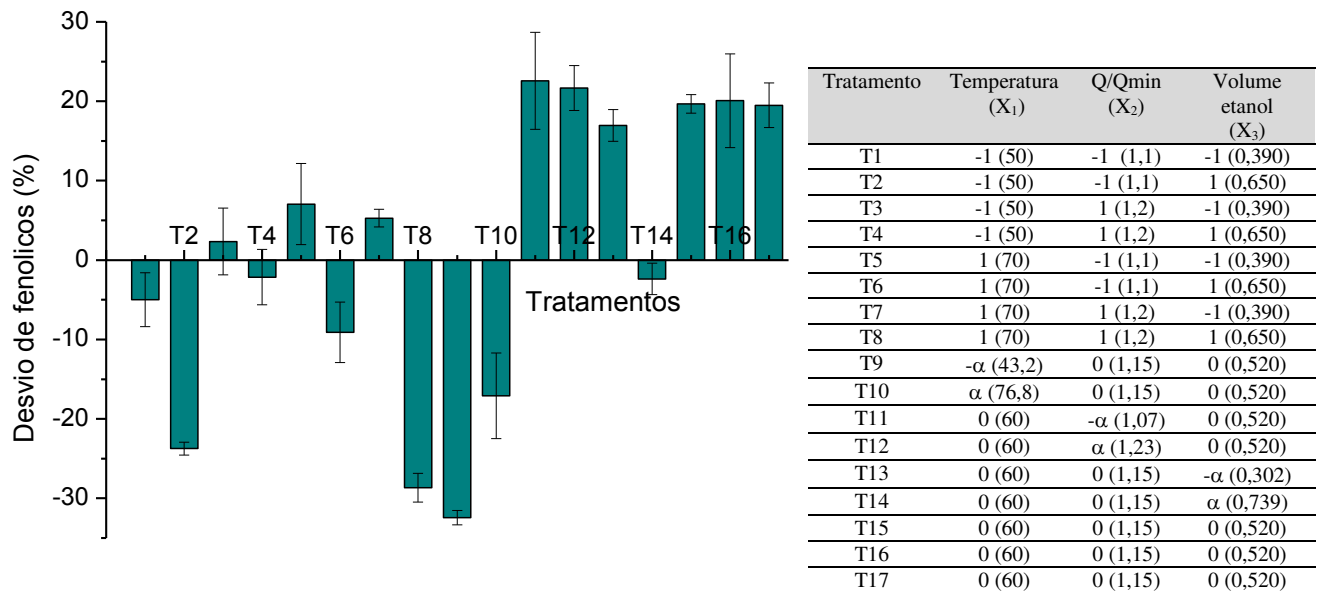


Figura 4.26 - Variações dos teores de fenólicos totais para diferentes condições operacionais de temperatura e Q/Q_{min} e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.

O modelo estatístico ajustado por regressão é dado pela Equação 4.12 levando-se em consideração apenas as variáveis significativas do ponto de vista estatístico.

$$fenólicos\ totais = 1426,95 + x'b + x'Bx \quad (4.12)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \\ -92,71 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -204,77 & -75,22 & 0,00 \\ -75,22 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -69,15 \end{bmatrix}$$

em que X₁=temperatura, X₂= entrada de ar (Q/Q_{min}) e X₃= volume de etanol

O coeficiente de correlação (0,947) aponta o bom ajuste aos dados experimentais. A regressão explica 89,6% da variação desta resposta. A Tabela 4.19 apresenta os resultados da análise de variância, a partir da qual se infere que o modelo estatístico proposto possui significância, pois pelo teste F de regressão a razão entre o F calculado e o F tabelado possui valor maior que 4 a 5 conforme descrito por Box e Wetz (1973). As figuras apresentadas no Anexo 5 não apresentam significativas discordâncias entre os valores preditos e os obtidos experimentalmente.

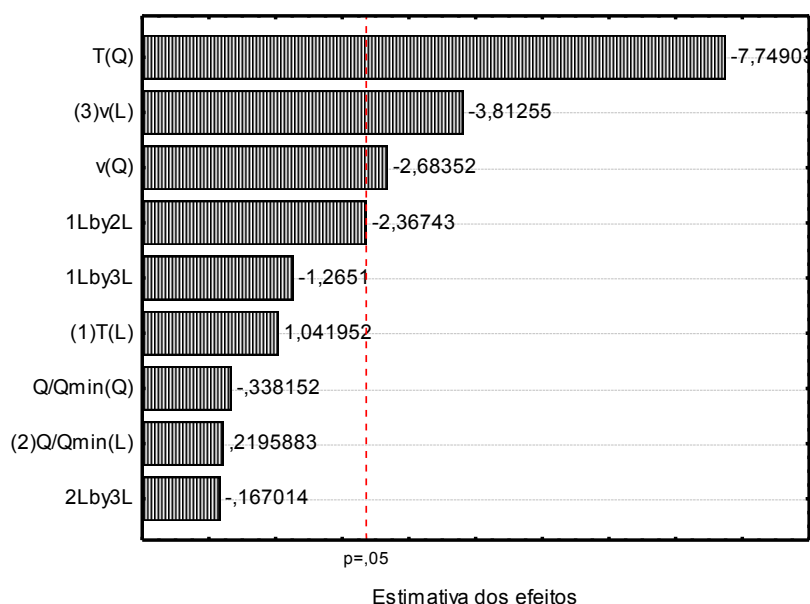


Figura 4.27 - Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de fenólicos totais resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.

Tabela 4.18 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de fenólicos totais.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (95%)	F _{cal} /F _{tab}
0,896	0,947	25,83	3,26	7,92

A representação gráfica do modelo é dada pela Figura 4.28, considerando-se a vazão de entrada de ar fixa no ponto central. A figura apresenta um ponto de máximo situado próximo ao ponto central, ou seja, temperatura de 60°C e volume de etanol de 0,520 mL/g resíduo. Determinadas condições operacionais favorecem a extração de fenólicos pois, teores maiores que o da amostra *in natura* (1196,7±36,4) foram obtidos. Ressalta-se que a adição de 0,739 mL etanol/g resíduo associada à temperatura extrema (76,8°C) acarretou na máxima degradação desse composto.

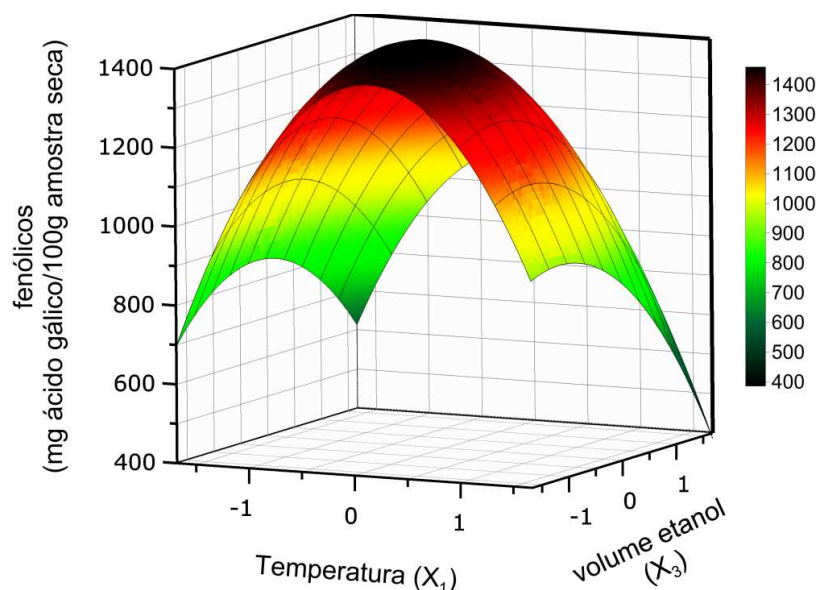
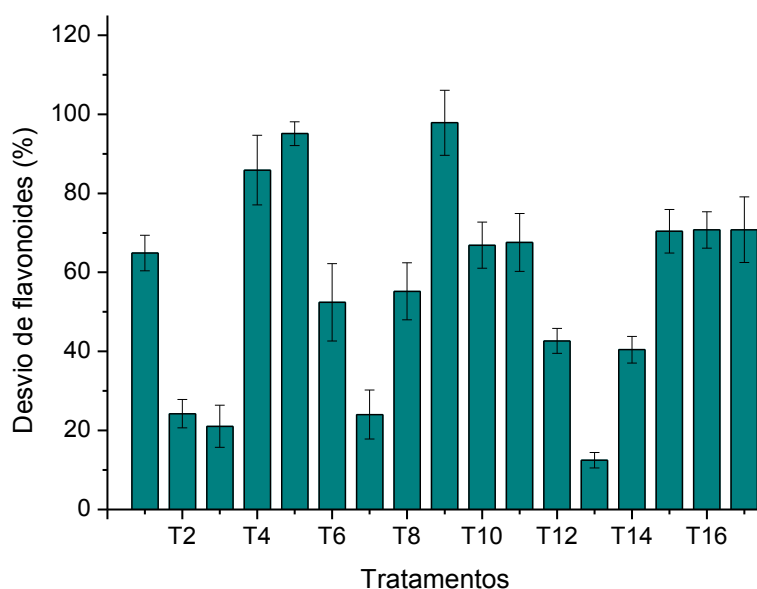


Figura 4.28 - Superfície de resposta ajustada aos teores de fenólicos totais em função da temperatura e do volume de etanol, a uma vazão de ar fixa em 15% acima do jorro mínimo.

A Figura 4.29 exibe os desvios dos teores de flavonoides em relação à amostra *in natura*, onde para todos os tratamentos avaliados a secagem precedida por pulverização de etanol promoveu aumentos das extrações deste composto bioativo.



Tratamento	Temperatura (X ₁)	Q/Qmin (X ₂)	Volume etanol (X ₃)
T1	-1 (50)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T2	-1 (50)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T3	-1 (50)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T4	-1 (50)	1 (1,2)	1 (0,650)
T5	1 (70)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T6	1 (70)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T7	1 (70)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T8	1 (70)	1 (1,2)	1 (0,650)
T9	-α (43,2)	0 (1,15)	0 (0,520)
T10	α (76,8)	0 (1,15)	0 (0,520)
T11	0 (60)	-α (1,07)	0 (0,520)
T12	0 (60)	α (1,23)	0 (0,520)
T13	0 (60)	0 (1,15)	-α (0,302)
T14	0 (60)	0 (1,15)	α (0,739)
T15	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T16	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T17	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)

Figura 4.29 - Variações dos teores de flavonoides para diferentes condições operacionais de temperatura e Q/Qmin e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.

Dentre os tratamentos adotados destacam-se os descritos por T9 (T=43,2°C, Q/Q_{min}=1,15 e V=0,52 mL/g), T5 (70°C, Q/Q_{min}=1,1, V=0,39 mL/g) e T4 (50°C, Q/Q_{min}=1,2 e V=0,39 mL/g), respectivamente. Acréscimos nos teores destes compostos também foram obtidos por Silva (2014) para a secagem de sementes de acerola pré-tratadas com etanol em secador rotoaerado.

Analisando-se a Figura 4.30 a qual explicita o diagrama de Pareto, destacam-se os efeitos das interações vazão de entrada de ar/volume de etanol e temperatura/vazão de entrada de ar, com grau de confiança de 95%.

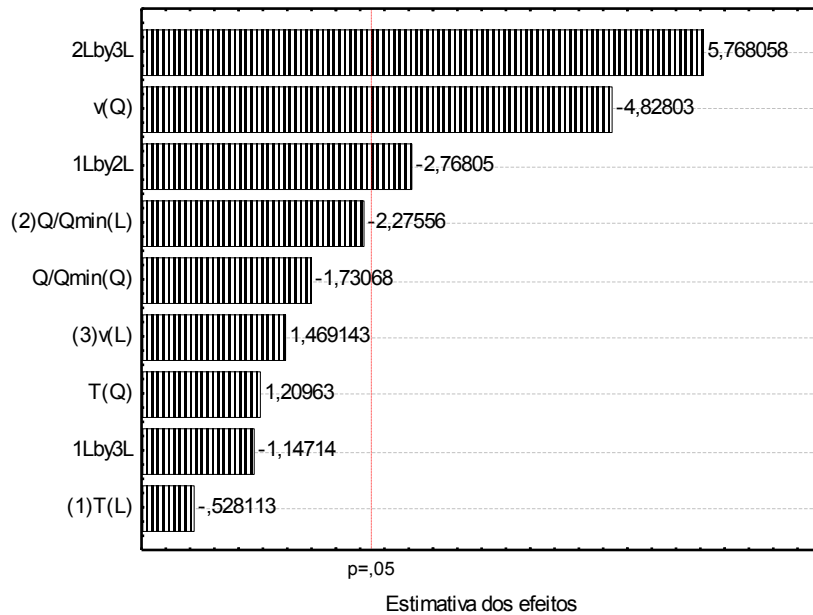


Figura 4.30 - Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de flavonoides totais resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol.

Desprezando-se as variáveis não significativas e após ajuste aos dados experimentais o modelo estatístico preditivo adotado para os teores de flavonoides é apresentado na Equação 4.12 com R² de 0,862 e coeficiente de correlação de 0,929.

$$flavonoides = 4849,6 + x'b + x'Bx \quad (4.13)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,000 \\ -186,7 \\ 0,000 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,00 & -296,8 & 0,00 \\ -296,8 & -188,6 & 618,6 \\ 0,00 & -618,6 & -468,4 \end{bmatrix}$$

em que X₁=temperatura, X₂= entrada de ar (Q/Q_{min}) e X₃= volume de etanol

Realizando a análise de variância para os teores de flavonoides com intuito de verificar a significância do modelo de regressão (Tabela 4.20) verifica-se que o modelo ajustado a essa possui significância do ponto de vista estatístico.

Tabela 4.20 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de flavonoides.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coefficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (95%)	F _{cal} /F _{tab}
0,862	0,929	13,78	3,21	4,29

Os gráficos de valores observados versus valores preditos e de valores normais esperados em função dos resíduos não possuem discrepâncias (Anexo 6).

A partir da Figura 4.31, representativa da superfície de resposta ajustada aos teores de flavonoides, mantendo-se o volume de etanol pulverizado (0,520 mL etanol/g resíduo), constata-se que o aumento da temperatura afeta favoravelmente os teores de flavonoides quando baixas vazões de ar são adotadas durante a secagem no leito de jorro. Entretanto, o aumento da temperatura associado a elevadas vazões de ar reduzem significativamente os teores de flavonoides do resíduo de acerola.

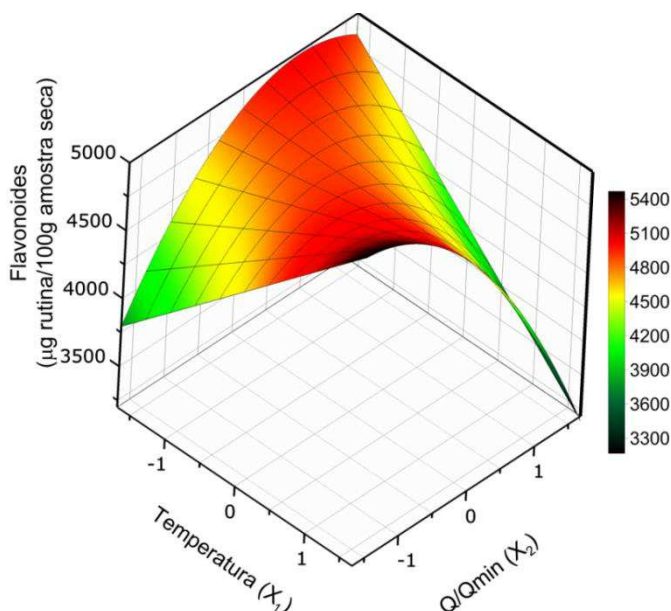


Figura 4.31 - Superfície de resposta ajustada aos teores de flavonoides em função da temperatura e da vazão de entrada de ar, para o volume de etanol fixo em 0,520 mL/g resíduo

Extrações superiores foram obtidas para todos os tratamentos quando confrontados com a amostra *in natura*, que possui teor de flavonoides de $2759,3 \pm 42,8$. No entanto,

mantendo-se a temperatura fixa no ponto central (60°C), infere-se, a partir da Figura 4.32, que para as duas condições experimentais extremas ocorre degradações desses teores.

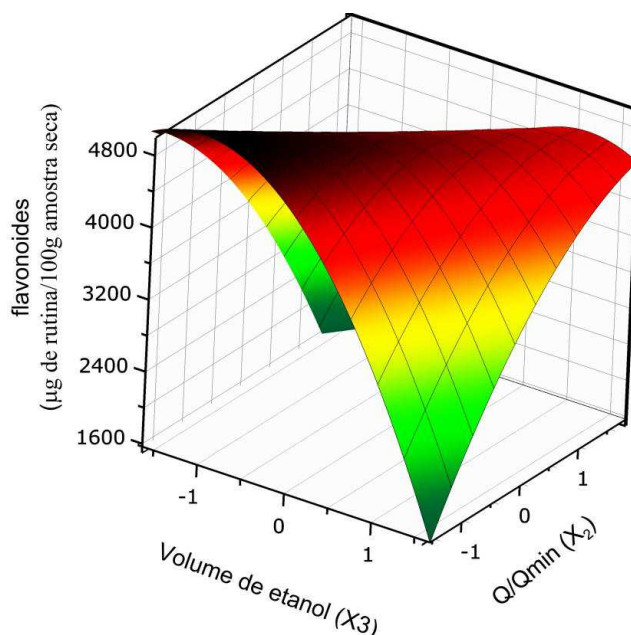


Figura 4.32 - Superfície de resposta ajustada aos teores de flavonoides em função do volume de etanol e da vazão de entrada de ar, para a temperatura fixa a 60°C.

A avaliação do teor proteico das sementes de acerola é apresentada na Figura 4.33 onde a desidratação acarretou para todos os tratamentos a redução dos teores de proteínas das sementes de acerola.

Resultados similares foram obtidos por Rosselló et al. (1994), estudando o efeito da temperatura de estocagem, luz e conteúdo de sulfito sobre a qualidade de damascos branqueados e posteriormente submetidos à desidratação com energia solar, que observou perdas significativas dos teores de proteínas e carboidratos nas amostras estocadas mesmo à temperatura ambiente. O autor atribuiu o resultado à ocorrência de reações não enzimáticas, desencadeadas durante o processamento e a estocagem. As reações não enzimáticas são indesejáveis nas frutas desidratadas, uma vez que causam a desnaturação de proteínas e carboidratos, contribuindo, principalmente, para a perda da qualidade total do produto.

Ressalta-se que as maiores desnaturações ocorreram nos tratamentos T10 ($T=76,8^{\circ}\text{C}$, $Q/Q_{\min}=1,15$, $V=0,52\text{ mL/g}$), T8 ($T=70^{\circ}\text{C}$, $Q/Q_{\min}=1,2$, $V=0,65\text{ mL/g}$) e T7 ($T=70^{\circ}\text{C}$, $Q/Q_{\min}=1,2$, $V=0,39\text{ mL/g}$), condições essas relacionadas à associação de temperatura e vazões de entrada de ar elevadas. Ou seja, bom contato fluido partícula correlacionado à condição de elevada temperatura, contribuem para a redução do teor proteico da semente de

acerola. Segundo Bobbio e Bobbio (1992) a utilização de altas temperaturas promove a desnaturação proteica e a oxidação lipídica, conforme também relatado por Leite et al. (2007).

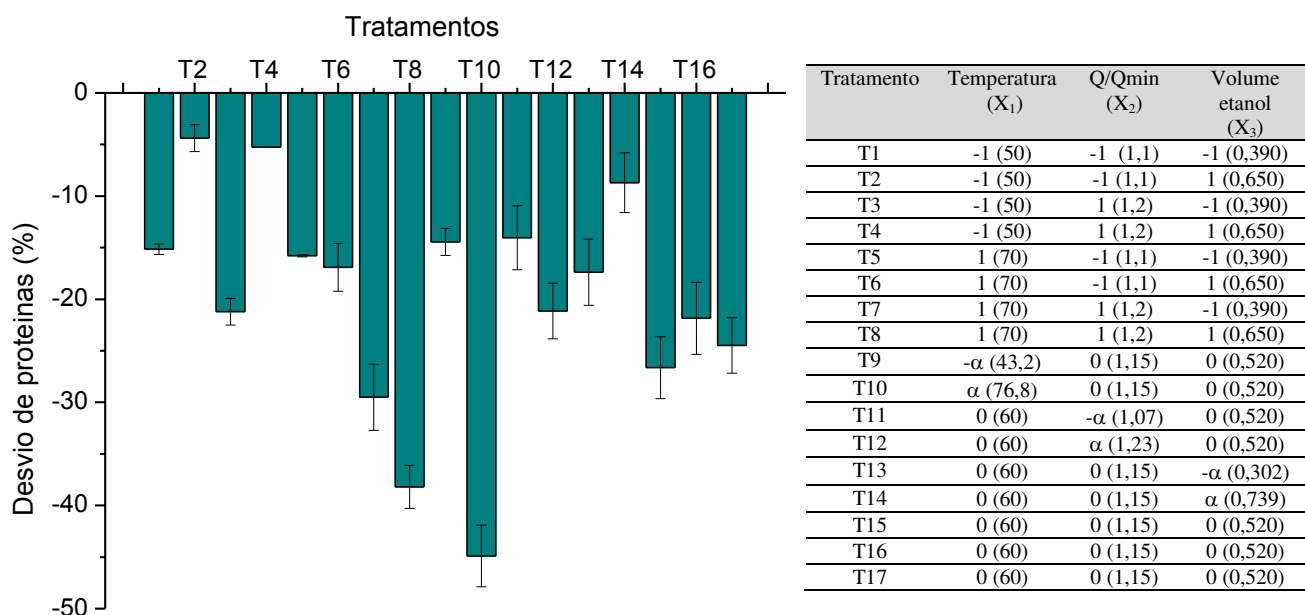


Figura 4.33 - Variações dos teores de proteínas para diferentes condições operacionais de temperatura e Q/Qmin e diferentes condições de pré-tratamento utilizando a pulverização de etanol.

A análise estatística (ANOVA) realizada com 95% de confiança corrobora com os resultados (Figura 4.34). Verifica-se que a temperatura exerce efeito significativo negativo sobre os teores de proteínas. Sendo assim, um aumento desse parâmetro acarreta em desnaturações do teor proteico da semente de acerola. Fato esse também evidenciado pela vazão de ar. Em contrapartida, o acréscimo de etanol adicionado durante a pulverização é benéfico na conservação nutricional das sementes, para o caso de proteínas.

Para a resposta teores de proteínas, após realização de regressão múltipla, considerando apenas os parâmetros significativos, obteve-se o modelo proposto apresentado na equação 4.14.

$$proteína = 9,23 + x'b + x'Bx \quad (4.14)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -0,97 \\ -0,49 \\ 0,29 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,00 & -0,44 & -0,57 \\ -0,44 & 0,40 & -0,78 \\ -0,57 & 0,00 & 0,60 \end{bmatrix}$$

em que X_1 =temperatura, X_2 = vazão de entrada de ar (Q/Q_{min}) e X_3 = volume de etanol

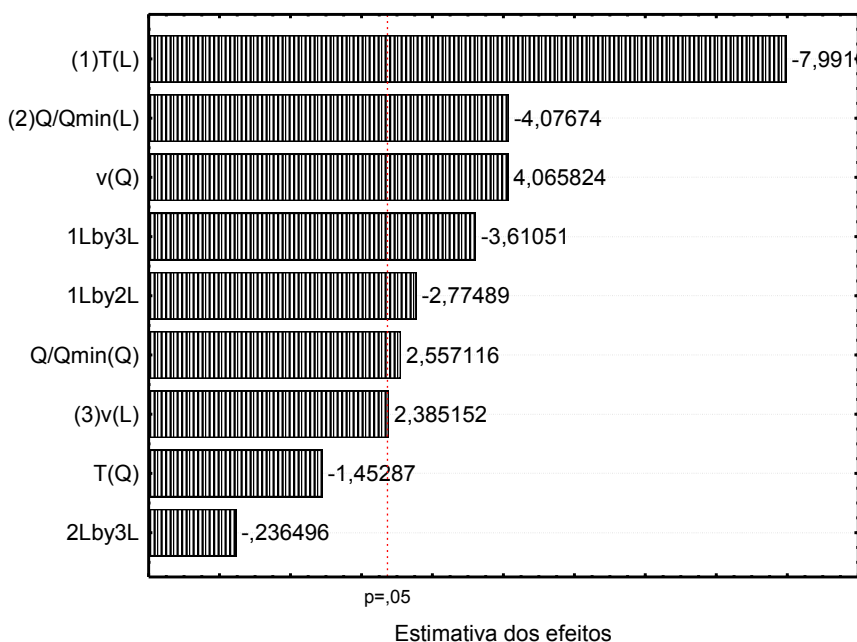


Figura 4.34 - Estimativa dos efeitos das variáveis independentes sobre os teores de proteínas resultantes da secagem precedida pela pulverização de etanol .

Para verificação da significância e predição do modelo proposto realizou-se a análise de variância a qual se encontra descrita na Tabela 4.21. Infere-se, por meio do coeficiente de correlação (0,967) que o modelo possui bom ajuste aos dados experimentais e ainda que 93,6% das variações da resposta foram explicadas pelo modelo proposto. Ressalta-se ainda que de acordo com o teste F para a regressão o modelo se mostra significativo estatisticamente. Os gráficos apresentados no Anexo 7 apontam as proximidades entre os valores observados experimentalmente e os preditos pelo modelo.

Tabela 4.19 - Análise de regressão para o modelo ajustado aos teores de proteínas.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (95%)	F _{cal} /F _{tab}
0,936	0,967	18,72	3,29	5,69

Fixando-se a vazão de entrada de ar em 15% acima do jorro mínimo, a superfície de resposta ajustada ao modelo preditivo é apresentada pela Figura 4.35, na qual se nota que as menores desnaturações proteicas ocorrem na condição de temperatura reduzida e elevada adição de etanol. Nessas condições, a interação entre essas variáveis exerce efeito significativo sobre a resposta. Portanto, os resultados sugerem que a pulverização de etanol

exerce efeito benéfico sobre os teores proteicos da semente de acerola, desde que a baixas temperaturas.

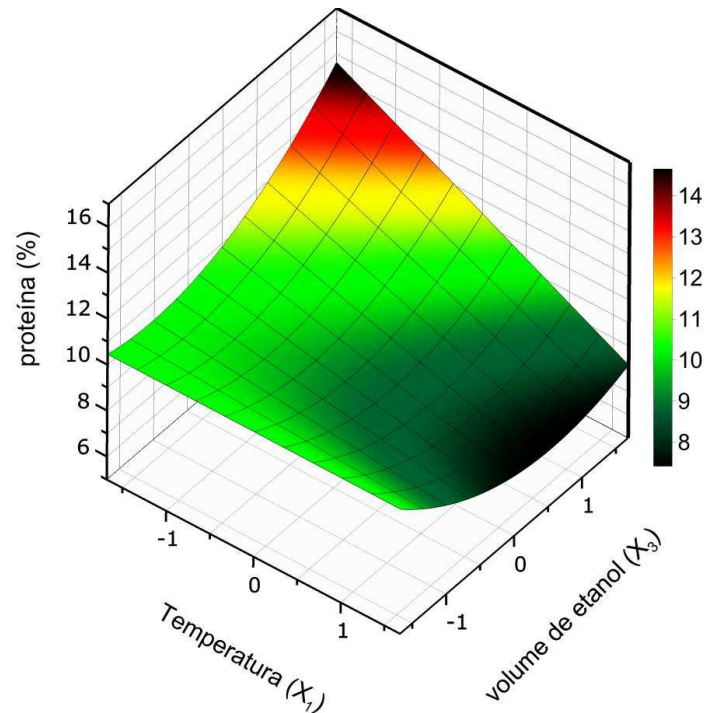


Figura 4.35 - Superfície de resposta ajustada aos teores de proteínas em função da temperatura e do volume de etanol, para a vazão de entrada de ar fixa em 15% acima do jorro mínimo.

Existe um indicativo de presença de um ponto de mínimo quando a superfície de resposta é plotada em função da vazão de entrada de ar e do volume de etanol pulverizado, mantendo-se a temperatura de 60°C (Figura 4.36).

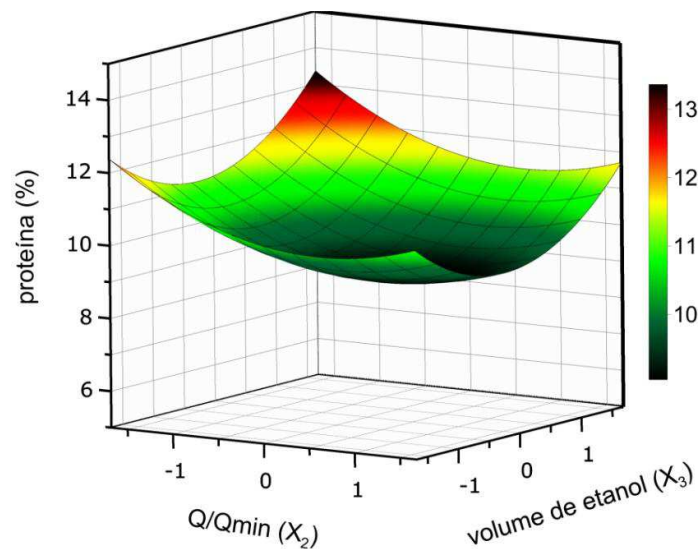
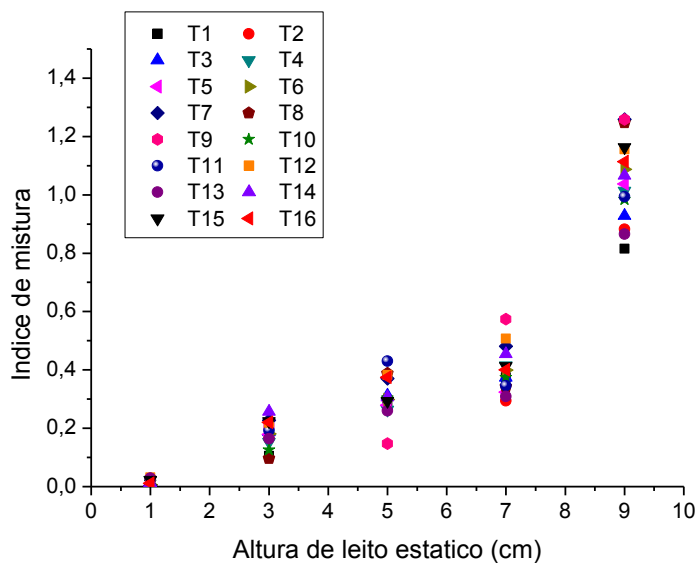


Figura 4.36 - Superfície de resposta ajustada aos teores de proteínas em função da vazão de entrada de ar e do volume de etanol, para a temperatura fixa em 60°C.

Os resultados obtidos para o índice de mistura (Figura 4.37), por meio do qual se avalia a segregação no leito apontam que existe a concentração de acerola, nas regiões mais altas do leito ($I_m > 1$), em contrapartida, nas regiões mais baixas o índice de mistura é menor que 1, indicativo de concentração de soja. Destaca-se que na altura de leito estático de 9 cm existe uma variação maior entre os resultados, provavelmente, proveniente da condição operacional adotada que contribui para uma maior ou menor redução de umidade do material.



Tratamento	Temperatura (X ₁)	Q/Qmin (X ₂)	Volume etanol (X ₃)
T1	-1 (50)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T2	-1 (50)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T3	-1 (50)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T4	-1 (50)	1 (1,2)	1 (0,650)
T5	1 (70)	-1 (1,1)	-1 (0,390)
T6	1 (70)	-1 (1,1)	1 (0,650)
T7	1 (70)	1 (1,2)	-1 (0,390)
T8	1 (70)	1 (1,2)	1 (0,650)
T9	- α (43,2)	0 (1,15)	0 (0,520)
T10	α (76,8)	0 (1,15)	0 (0,520)
T11	0 (60)	- α (1,07)	0 (0,520)
T12	0 (60)	α (1,23)	0 (0,520)
T13	0 (60)	0 (1,15)	- α (0,302)
T14	0 (60)	0 (1,15)	α (0,739)
T15	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T16	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)
T17	0 (60)	0 (1,15)	0 (0,520)

Figura 4.37 - Avaliação da segregação para ensaios realizados com tratamento prévio de pulverização de etanol.

4.2.4 Avaliação morfológica do resíduo de acerola por microscopia eletrônica de varredura.

Com intuito de avaliar as alterações estruturais causadas pelas secagens precedidas ou não por pré-tratamentos, utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV). A técnica permite melhor compreensão das modificações morfológicas oriundas de processos experimentais. Pesquisas correlacionando o uso de ultrassom como tratamento prévio à secagem, com as análises morfológicas foram realizadas por Fernandes (2008) e segundo o autor a técnica permite a visualização de formação de canais e trincas no tecido celular. Desse modo, foram avaliadas as imagens de amostras de resíduo de acerola *in natura* as quais foram confrontadas com as provenientes da secagem precedida ou não por pré-tratamento.

Para avaliar os efeitos dos tratamentos sobre a morfologia do material foram, primeiramente, avaliadas as amostras de sementes de acerola *in natura*. Conforme mostra a fotomicrografia apresentada na Figura 4.38, o tecido da semente *in natura* apresentou-se homogêneo, com pequena presença de poros, possuindo parede celular definida e organizada.

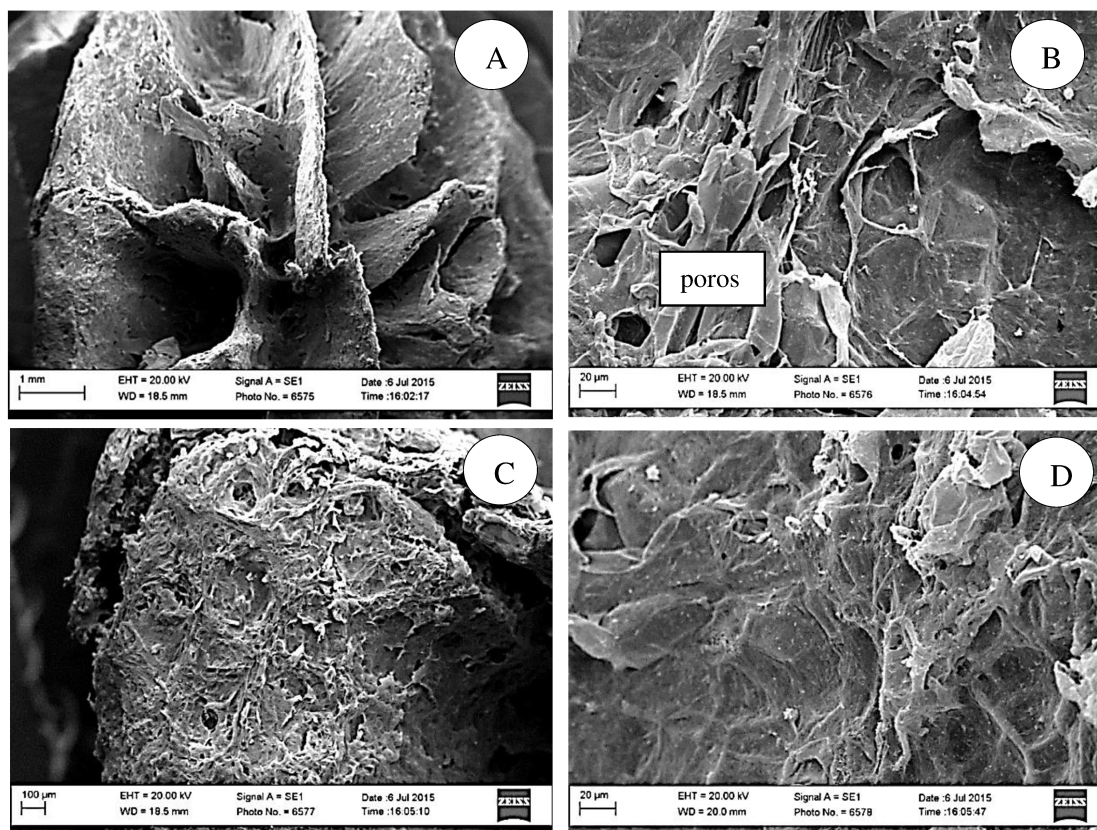


Figura 4.38- Fotomicrografias obtidas pelo microscópio eletrônico de varredura para o resíduo de acerola *in natura* nas ampliações de (A) 36x, (B) 1000x, (C) 130x e (D) 1000x

As alterações celulares provocadas pela secagem sem pré-tratamento foram avaliadas pela microscopia como parâmetro de confronto para verificação de possíveis mudanças causadas pela aplicação de pré-tratamentos.

Dentre as alterações celulares, o encolhimento é um dos fenômenos mais importantes que ocorrem durante a secagem, o que leva a modificações na estrutura do produto (RAMIREZ et al., 2011). As morfologias de amostras de sementes de acerola resultantes de secagens convencionais à 60°C e 40°C são apresentadas nos itens A/B e C/D, respectivamente, da Figura 4.39. Confrontando-se essas imagens com as obtidas para a amostra *in natura* (Figura 4.38) percebe-se que a secagem promoveu alterações no tecido estrutural, onde nota-se o encolhimento celular. No entanto, evidencia-se a ausência de espaços intercelulares visíveis. Percebe-se pelas fotomicrografias apresentadas na Figura 4.39 A, B, C, D e E que a temperatura, na faixa avaliada, exerceu apenas pequenas alterações morfológicas no tecido celular, uma vez que imagens similares foram obtidas para temperatura distintas.

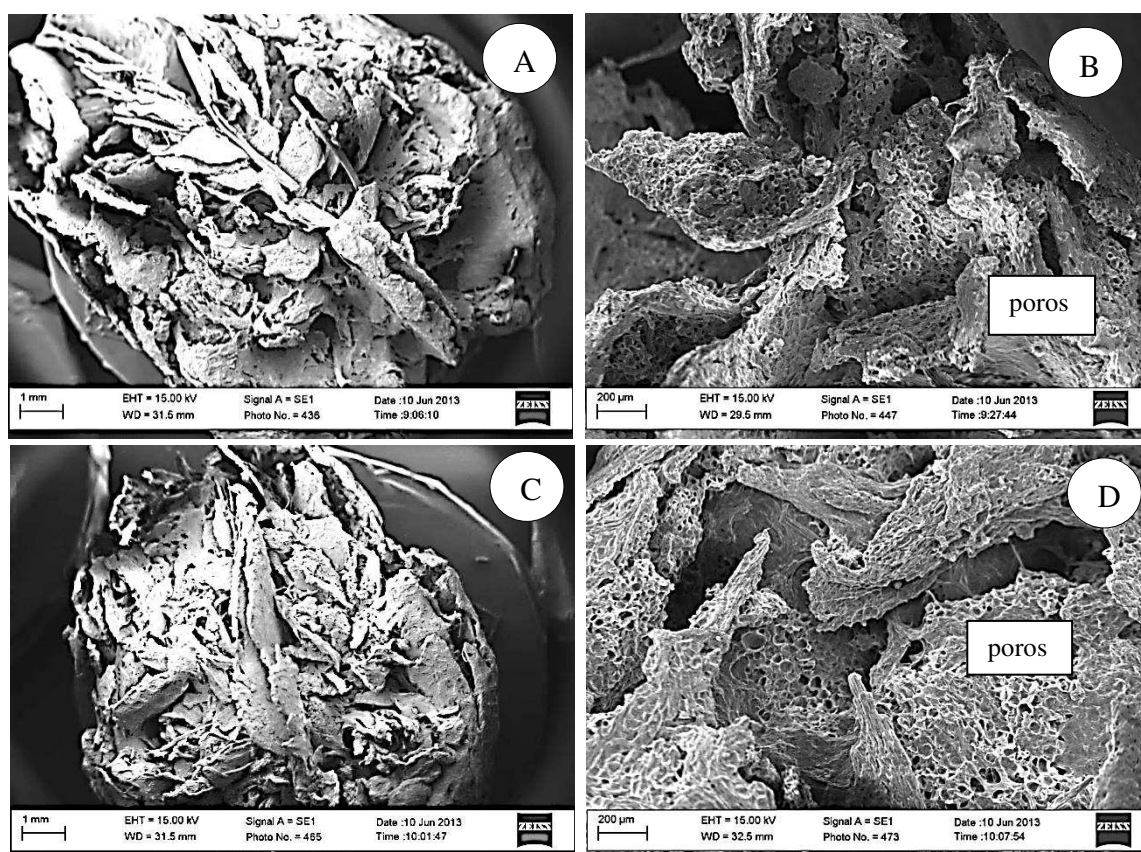


Figura 4.39 - Fotomicrografias obtidas por microscópio eletrônico de varredura para condições distintas de secagem em leito de jorro (A) e (B) 60°C, nas ampliações de 36 e 130x, respectivamente e (C) e (D) a 40°C, nas ampliações de 36x e 130x.

Diversos autores (RODRIGUEZ et al., 2014; FERNANDES, 2008; OLIVEIRA, 2010) destacam mudanças morfológicas provenientes da aplicação de ondas ultrassônicas sobre materiais sólidos imersos em meios líquidos. Para se observar as possíveis alterações morfológicas causadas pelo tratamento ultrassônico no tecido estrutural das sementes de acerola, foram avaliadas as imagens precedidas por tratamento de ultrassônico.

As imagens explicitadas na Figura 4.40 são provenientes de amostras submetidas ao tratamento ultrassônico (potência de 80 W, proporção de volume de água de 2:1), por tempo de sonicação de 10 min, sendo essas amostras analisadas morfolologicamente antes de serem submetidas ao processo de secagem.

Quando confrontada com a secagem sem pré-tratamento verifica-se que a sonicação em meio aquoso por 10 min promoveu severos danos no tecido celular, onde se observam alterações morfológicas, tais como rompimento celular e fraturas ocorreram, possivelmente, provocadas pela aplicação de ultrassom. Ressalta-se que essas amostras não foram submetidas à posterior secagem, no entanto os resultados sugerem que a proporção de volume de 2:1 contribui favoravelmente para a desidratação de sementes de acerola.

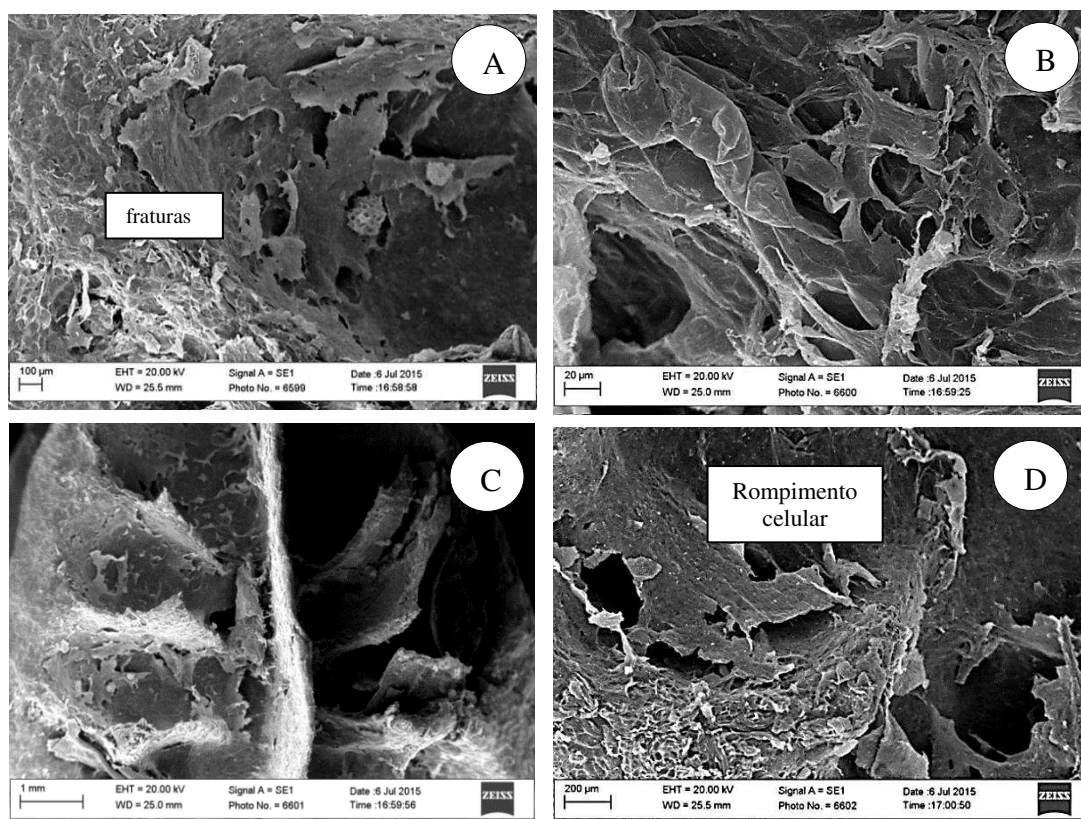


Figura 4.40- Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de amostras de sementes de acerola submetida à sonicação em meio aquoso por 10 min, à potência de 80 W, nas ampliações de (A) 1000x, (B) 130x, (C) 36x e (D) 130x.

A Figura 4.41 (A) e (B) apresenta as fotomicrografias obtidas para as amostras submetidas ao pré-tratamento ultrassônico (80 W e proporção de água de 4:1) por tempo de 30 e 50 min, respectivamente, as quais foram submetidas à secagem em leito de jorro. Observam-se nas amostras a presença de distorções das paredes celulares e possíveis formações de micro canais, que colaboram com o aumento da desidratação da amostra.

A Figura 4.41 (B) mostra que a aplicação de 50 min de ultrassom promoveu modificações morfológicas visíveis, pois as células presentes começam a obter formato bem mais distorcido, evidenciando que o aumento do tempo de ultrassom promove alterações mais significativas da estrutura celular. As alterações celulares foram acompanhadas por reduções maiores de umidade, quando confrontada com os demais tempos de sonicação aplicados.

Resultados similares foram obtidos por Fernandes e Rodrigues (2008, 2007) que também verificaram a presença de microcanais nos tecidos de todas as frutas submetidas ao ultrassom (melão, mamão, abacaxi, morango, maçã e banana). Os autores afirmam que ondas de ultrassom causam uma série rápida de compressões e expansões, de forma semelhante a uma esponja quando apertada e solta repetidamente. Acredita-se que o alongamento celular e a formação de micro canais sejam consequências do efeito esponja decorrente da aplicação de ultrassom.

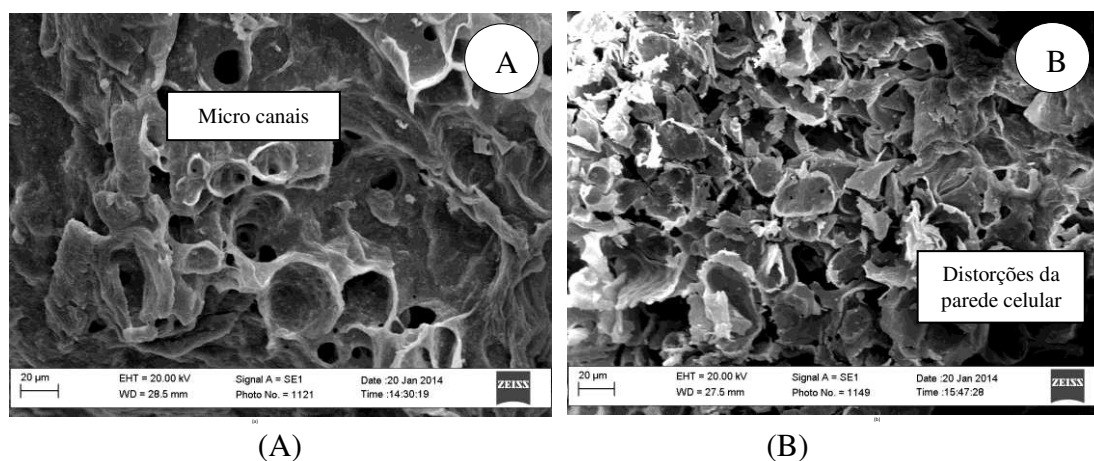


Figura 4.41 - Fotomicrografias provenientes da secagem (A) 30 min de ultrassom e (B) 50 min de ultrassom em meio aquoso, na ampliação de 130x.

Os canais microscópicos facilitam a difusão de água e sólidos solúveis para dentro e fora do material. De acordo com Fernandes e Rodrigues (2007) a quantidade, o comprimento e a largura dos canais microscópicos afetam a transferência de massa entre a fruta e o meio líquido. Acrescenta-se ainda que o tempo necessário para formar longos canais, o que aumenta a taxa de transferência de massa, é dependente do material, ou seja, de sua estrutura morfológica.

Modificações morfológicas (presença de canais, distorções e colapsos celulares) foram também observadas por Rodríguez et al. (2014) em estudos com desidratação de maçãs associadas ao tratamento ultrassônico. O autor ainda associa as alterações estruturais com as perdas de compostos nutricionais tais como fenólicos e flavonoides. Ou seja, a devastação morfológica contribui não somente com a perda de água durante a secagem, mas aumenta a perda de sólidos nutricionais presentes no material. Excetuando-se para os flavonoides, resultados similares foram obtidos neste estudo, onde nota-se que perdas maiores de ácido ascórbico e fenólicos ocorreram para os tempos de 30 e 50 min de ultrassom.

A investigação utilizando etanol como meio de imersão durante a sonicação foi ainda averiguada por meio das imagens apresentadas nas Figuras 4.42, 4.43 e 4.44. A Figura apresenta 4.42 expõe as modificações estruturais obtidas de amostras submetidas à sonicação por tempo de 10 min, a 80 W e proporção de etanol de 2:1, condição essa adotada no Tratamento 2 do planejamento fatorial. Ressalta-se que os resultados apresentados referem-se à amostra antes de ser submetida à secagem.

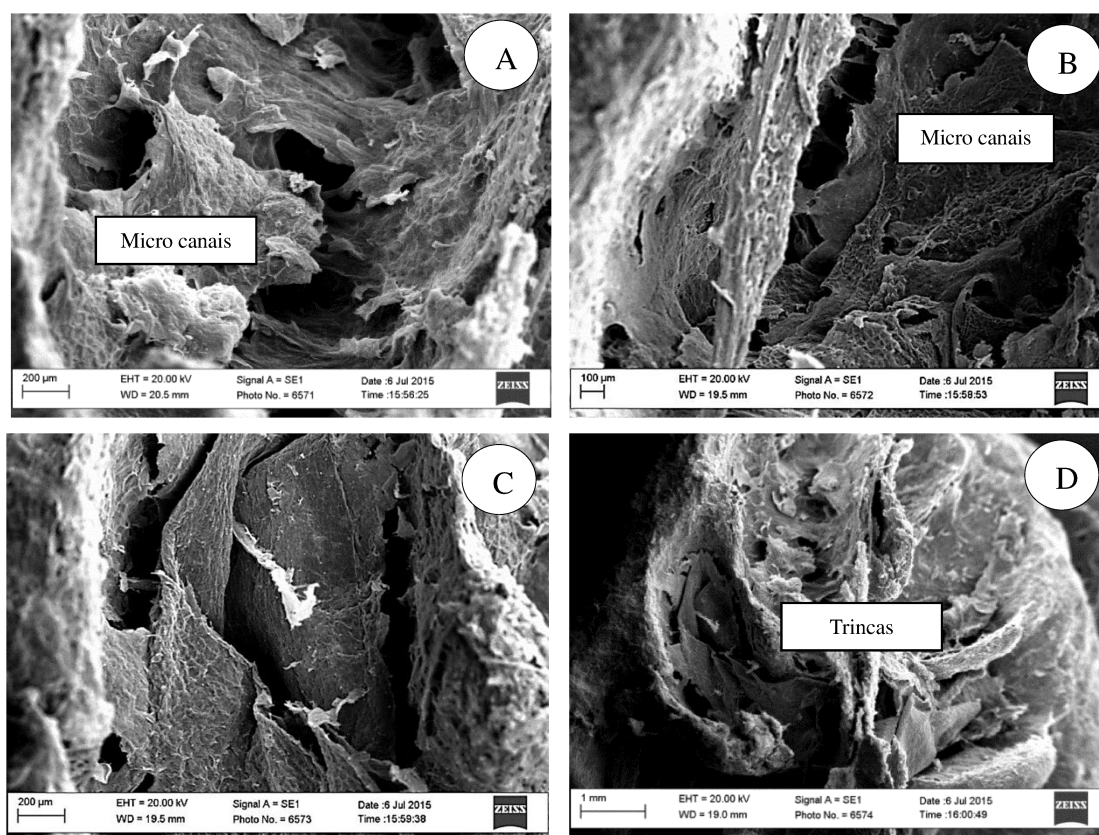


Figura 4.42 - Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de resíduo de acerola submetido a ultrassonicação em meio etanólico, antes da secagem (Condição experimental: Tratamento 2) (A) 130x (B) 130x, (C) 130x e (D) 26x.

A Figura 4.43 explicita a análise morfológica de amostras submetidas à condição supracitada anteriormente, no entanto, após a realização de secagem.

Confrontando as Figuras 4.42 e 4.43 evidenciam-se nas imagens a presença de micro canais e trincas, provavelmente ocasionadas pela sonicação realizada. As amostras encontram-se correlacionadas às maiores reduções de umidade, menores degradações de ácido cítrico e aumentos das extrações de ácido ascórbico, fenólicos e flavonoides.

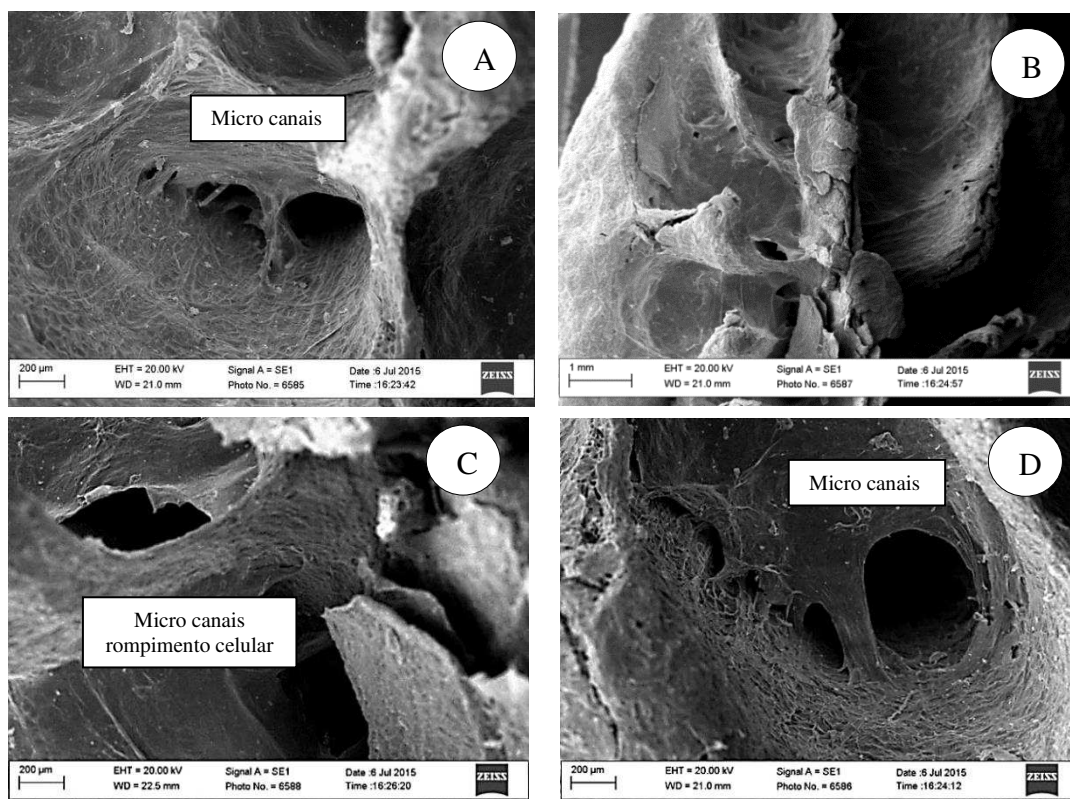


Figura 4.43 - Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de resíduo de acerola submetido a ultrassonicação em meio etanólico, após a secagem (Condição experimental: Tratamento 2) (A) 130x (B) 36x, (C) 130x (D) 130x.

Para validação dos efeitos ultrassônicos sobre a eficácia de secagem e a manutenção do teor nutricional, amostras foram apenas imersas em etanol por tempo de 10 min sem a aplicação de ultrassom. As imagens representativas desse ensaio experimental são apresentadas na Figura 4.44, a qual foi realizada após a secagem. Verifica-se pela Figura 4.44 a formação homogênea do tecido celular e a inexistência de micro canais. No entanto existem indícios de rompimento celular, evidenciado na fotomicrografia D.

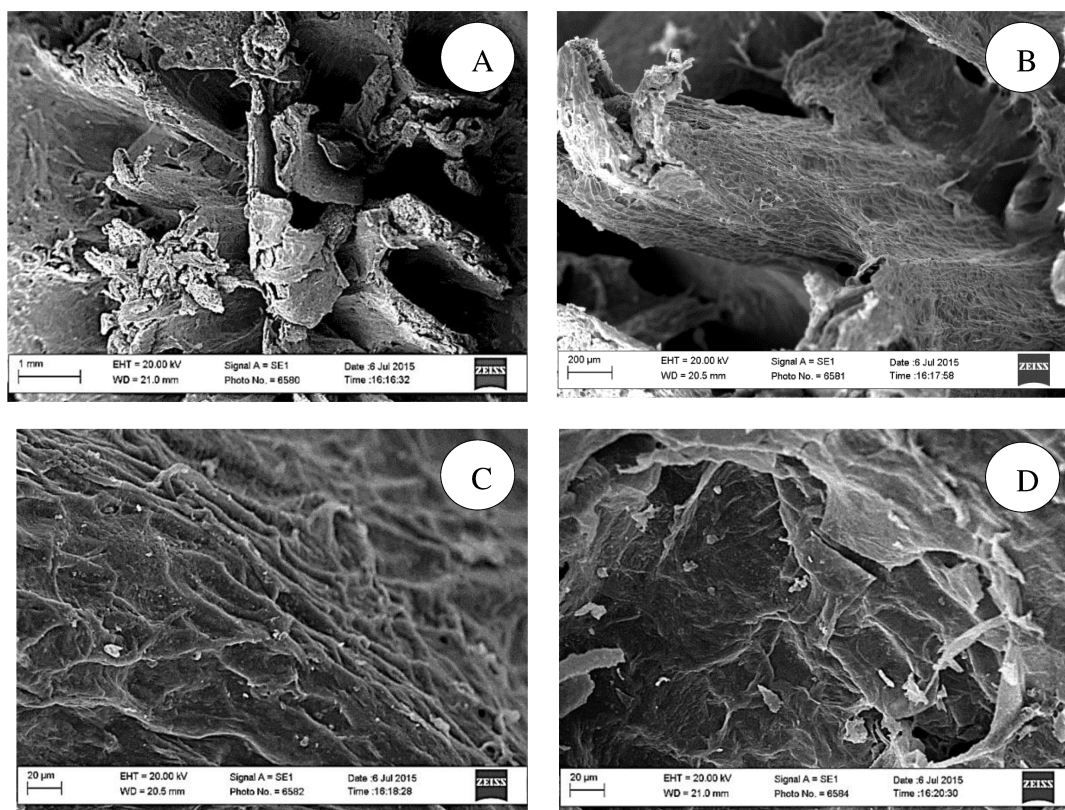


Figura 4.44 – Fotomicrografia obtida por microscópio eletrônico de varredura de resíduo de acerola imerso por 10 min em etanol comercial, nas ampliações de (A) 36x, (B) 130x, (C) 1000x e (D) 1000x.

CAPÍTULO 5

Simulações Numéricas para Estudo de Parâmetros Fluidodinâmicos

A ausência de uma teoria capaz de prever de forma geral o comportamento de sistemas granulares contribui para o crescente uso das simulações numéricas. Entre as variáveis que exercem efeitos sobre a fluidodinâmica no leito de jorro destacam-se os ângulos de repouso estático e dinâmico e a porosidade do leito. Nesse contexto, o presente capítulo destina-se à obtenção de modelos preditores capazes de avaliar o comportamento fluidodinâmico da mistura constituída por resíduo de acerola e soja em leito de jorro. Faz ainda parte do escopo deste capítulo a validação dos modelos, utilizando para tanto os resultados experimentais.

5.1 AVALIAÇÕES NUMÉRICAS DESENVOLVIDAS

5.1.1 Simulação computacional pelo Método dos Elementos Discretos

As simulações apresentam vantagens como o armazenamento de informações sobre cada elemento em todos os instantes de tempo; a realização de diferentes configurações de sistemas através de pequenas modificações; a manipulação e a exploração dos efeitos de diversos parâmetros. O método DEM adotado neste trabalho propõe-se a modelar o material granular por meio de um conjunto de partículas discretas, cujo comportamento é governado por leis físicas e onde os contatos entre elas podem ser criados ou extintos à medida que o conjunto de partículas se deforma como um todo.

O estudo fluidodinâmico computacional foi realizado visando à análise numérica das propriedades físicas, ângulos de repouso estático e dinâmico e empacotamento, variáveis essas que afetam o comportamento fluidodinâmico durante a secagem em leito de jorro. A simulação foi validada por meio de experimentos os quais foram realizados em condições similares.

Como ferramenta computacional foi empregado o EDEM, *software* comercial que utiliza o método dos elementos discretos na simulação de materiais granulares. O *software*

permite a inserção de partículas de formato irregular, no entanto, a mesma pode ser descrita por aglomerado de partículas esféricas, reduzindo a complexidade da simulação (Figura 5.1).

Dentro desse contexto, optou-se pela representação esférica das partículas, levando-se em consideração parâmetros como forma e tamanho do material granular, onde o formato dos grãos de soja foi estabelecido pelo conjunto de três esferas sobrepostas obtendo-se o volume médio de $1,69.10^{-7} \text{ m}^3$ e o resíduo de acerola representado por dezessete esferas, com volume médio de $3,24.10^{-7} \text{ m}^3$. As representações foram definidas a partir das características físicas dos materiais e pelas fotografias provenientes de microscópio eletrônico de varredura (Figura 5.2).

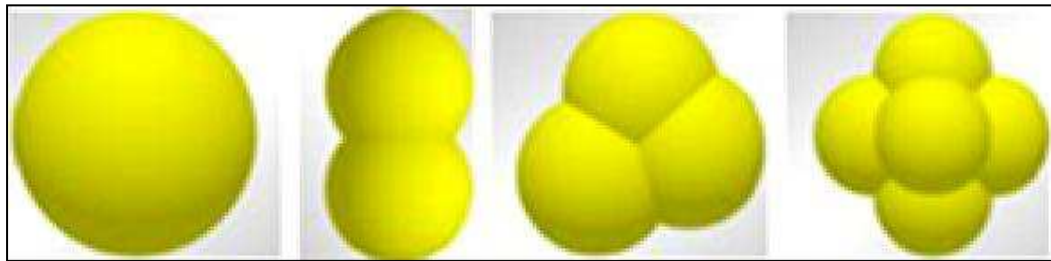


Figura 5.1 - Representação da partícula por meio de coleção de esferas.

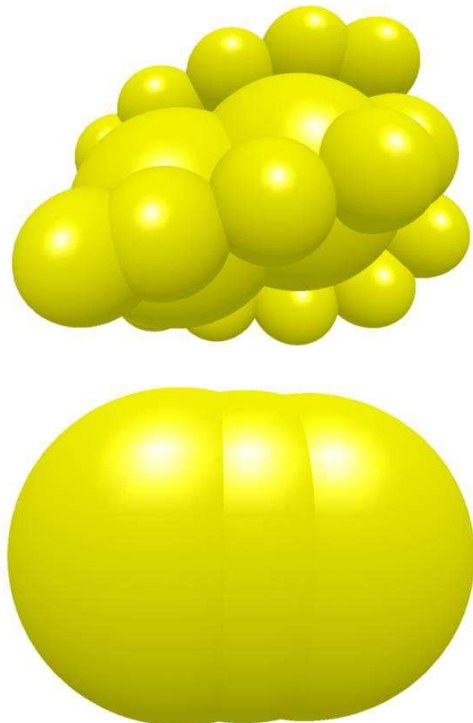
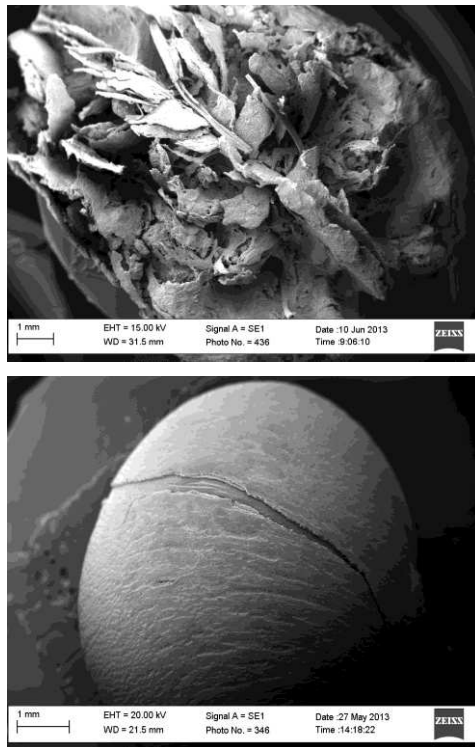


Figura 5.2 - Fotomicrografias da semente de acerola e da soja obtidas pelo MEV e respectivas imagens adotadas nas simulações.

Cabe ressaltar que o aumento do número de esferas na representação gráfica da partícula pode acarretar no aumento da eficiência, entretanto promove acréscimos no tempo de simulação ou seja, redução da velocidade computacional.

Para todas as simulações, adotou-se o mesmo “*time step size*”, o qual foi fixado em 20% do intervalo de tempo crítico, aqui descrito como tempo de Rayleigh, calculado pelo EDEM a partir da Equação 5.1 (SANTOS, 2013).

$$T_R = \frac{\pi R \sqrt{\frac{\rho}{G}}}{0,1631\nu + 0,8766} \quad (5.1)$$

Em que, R é o raio da partícula (m), ρ é a massa específica da partícula (kg/m^3), G é o módulo de cisalhamento (Pa) e ν é o coeficiente de Poisson (adimensional). As unidades de medidas podem ser previamente configuradas no EDEM para outra escala.

As simulações foram desenvolvidas através de ajuste dos coeficientes de Poisson, restituição, atrito estático, atrito de rolamento e coesão, onde o estudo se fez através de Planejamento Composto Central (PCC), cujos parâmetros codificados e na escala original são apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.3 e Equações 5.2 a 5.4. A faixa escolhida para estes parâmetros foi baseada em levantamento de trabalhos da literatura. Salienta-se que para o resíduo de acerola manteve-se para todas as simulações o coeficiente de Poisson constante e igual a 0,25, com o intuito de reduzir o número de simulações. As equações apresentadas a seguir

Tabela 5.1- Parâmetros codificados adotados nas simulações do PCC do resíduo de acerola.

Níveis	Módulo de Cisalhamento (G) [Pa]	Coeficientes			
		Restituição (e)	Atrito estático (μ_e)	Atrito Rolamento (μ_r)	Coesão (γ) [$\frac{J}{m^2}$]
-1,607	$1,18 \cdot 10^6$	0,018	0,018	0,005	0,002
-1,000	$3,00 \cdot 10^6$	0,200	0,2 00	0,05	0,024
0,000	$6,00 \cdot 10^6$	0,500	0,500	0,125	0,060
1,000	$9,00 \cdot 10^6$	0,800	0,800	0,200	0,096
1,607	$10,82 \cdot 10^6$	0,982	0,982	0,246	0,118

$$\begin{aligned} X_1 &= \frac{G[Pa] - 6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} & X_2 &= \frac{e - 0,5}{0,3} & X_3 &= \frac{\mu_e - 0,5}{0,3} \\ X_4 &= \frac{\mu_r - 0,125}{0,075} & X_5 &= \frac{\gamma[J/m^2] - 0,06}{0,036} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Tabela 5.2 - Parâmetros codificados adotados nas simulações do PCC da soja.

Níveis	Módulo de Cisalhamento (G) [Pa]	Coeficientes			
		Poisson (ν)	Restituição (e)	Atrito estático (μ _e)	Atrito Rolamento (μ _r)
-1,607	1,18.10 ⁶	0,009	0,018	0,018	0,004
-1,000	3,00.10 ⁶	0,100	0,200	0,200	0,050
0,000	6,00.10 ⁶	0,250	0,500	0,500	0,125
1,000	9,00.10 ⁶	0,400	0,800	0,800	0,200
1,607	10,82.10 ⁶	0,490	0,982	0,982	0,246

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{G[\text{Pa}] - 6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^6} & X_2 &= \frac{\nu - 0,25}{0,15} & X_3 &= \frac{e - 0,5}{0,3} & X_4 &= \frac{\mu_e - 0,5}{0,3} \\
 X_5 &= \frac{\mu_r - 0,125}{0,075} & & & & & &
 \end{aligned} \quad (5.3)$$

As forças de contato para partículas de soja foram representadas pelo modelo Hertz-Mindlin, que envolve o contato elástico, enquanto que os sistemas envolvendo sementes de acerola foram representados pela associação entre os modelos de contato de Hertz-Mindlin e o modelo de coesão JKR, pois para sistemas constituídos por partículas úmidas, as forças coesivas tornam-se cada vez mais relevantes.

Tabela 5.3 - Parâmetros codificados adotados nas simulações do PCC da mistura constituída por sementes de acerola e grãos de soja (50% em massa).

Níveis	Coeficientes			
	Restituição (e)	Atrito estático (μ _e)	Atrito Rolamento (μ _r)	Coesão (γ) [$\frac{J}{m^2}$]
-1,607	0,018	0,018	0,004	0,002
-,1000	0,200	0,200	0,050	0,024
0,000	0,500	0,500	0,125	0,060
1,000	0,800	0,800	0,200	0,096
1,607	0,982	0,982	0,246	0,118

$$\begin{aligned}
 X_1 &= \frac{e - 0,5}{0,3} & X_2 &= \frac{\mu_e - 0,5}{0,3} & X_3 &= \frac{\mu_r - 0,125}{0,075} & X_4 &= \frac{\gamma[\text{J/m}^2] - 0,06}{0,036} \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Um estudo preliminar paramétrico foi realizado com intuito de se determinar os parâmetros adequados que levariam a melhor concordância entre os dados experimentais e

simulados. Deste modo, nem todas as combinações de parâmetros necessariamente conduzem a resultados consistentes fisicamente, mas podem contribuir para verificar o efeito do parâmetro individual e de suas interações sobre as respostas.

Cabe ressaltar que para os casos de misturas constituídas por sementes de acerola e soja os parâmetros Módulo de Cisalhamento e Razão de Poisson, foram adotados como constantes em todas as simulações, sendo o Módulo de Cisalhamento igual a $9 \cdot 10^6$ para a acerola e $3 \cdot 10^6$ para a soja e, a razão de Poisson, mantida a 0,25 e 0,10 para a acerola e soja, respectivamente. Estas escolhas se basearam nos resultados provenientes das simulações realizadas para o resíduo de acerola e soja, individualmente.

5.1.2. Simulações computacionais na análise do ângulo de repouso dinâmico

No presente estudo foram realizadas simulações computacionais visando o estudo do ângulo de repouso dinâmico tanto dos componentes puros, como da mistura constituída por sementes de acerola e grãos de soja na fração em massa de 50%.

Para todas as simulações foram adotadas rotações fixas de 25,2 rpm sendo os resultados obtidos confrontados com os valores experimentais para validação do estudo computacional.

O número de partículas utilizadas nas simulações foi constante e correspondia ao peso total de partículas nas experiências, como mostra a Tabela 5.4. A simulação computacional consistiu no preenchimento de 50% do vaso cilíndrico com o material a ser avaliado, sendo em seguida submetido à rotação constante. As análises do ângulo de repouso dinâmico foram realizadas por meio das imagens obtidas.

Tabela 5.4 - Condições experimentais adotadas na determinação do ângulo de repouso dinâmico.

Propriedades	Descrição	Especificações
Número de partículas de resíduo de acerola		627
Número de partículas de soja	N	1552
Número de partículas da mistura (50%)		427 (resíduo acerola) e 508 (soja)
Velocidade de rotação	v [rpm]	25,2
Diâmetro do tambor rotativo	D [m]	0,10

5.1.3 Simulações computacionais na análise do ângulo de repouso estático

As simulações para estudo do ângulo de repouso estático foram realizadas apenas para os componentes puros, sendo os resultados obtidos confrontados com os experimentais em condições similares. Para análise numérica do ângulo de repouso estático utilizou-se metodologia similar à experimental, sendo o ângulo de repouso estático avaliado pelas imagens medindo-se o raio e a altura do cone formado pelas partículas.

5.1.4 Simulações computacionais na análise da porosidade do leito estático (empacotamento)

O estudo numérico do empacotamento foi desenvolvida para alturas de leito estático distintas, sendo essa realizada para os componentes puros e para misturas binárias de diferentes frações em massa. Ou seja, foram avaliadas as porosidades dos leitos constituídos por misturas de composições distintas, as quais variaram de $X_d=0,0$ (apenas partículas de soja) até $X_d=1,0$ (apenas partículas de acerola).

O processo de empacotamento consistiu em preencher gradualmente, o cone até a altura de leito estático desejada. Para tanto, as partículas foram dispostas em superfície quadrada virtual, inserida na parte superior/interna do cone e gradualmente foram soltas por meio da ação da gravidade, até obtenção da altura de leito estático definida.

A porosidade foi calculada com base no número de partículas presentes. Para tanto, a composição da mistura foi expressa em termos de frações volumétricas. As verificações das simulações computacionais foram realizadas através do estudo comparativo entre os valores simulados e os experimentais.

5.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.2.1. Simulações numéricas adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola

A simulação numérica do ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola, utilizando o método dos elementos discretos foi concretizada visando o estudo deste parâmetro físico. A Tabela 5.5 apresenta os resultados das simulações realizadas a partir do conjunto de parâmetros definidos pelo planejamento composto central.

Os valores dos parâmetros basearam-se em parametrizações prévias encontradas na literatura. Assim, nem todas as combinações de parâmetros necessariamente conduzem a

resultados consistentes fisicamente, mas pode contribuir para verificar o efeito do parâmetro individual e de suas interações sobre as respostas.

Tabela 5.5 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola. O valor experimental foi de 52,6°. ($\alpha=1,607$)

Corrida	Coeficientes					Ângulo repouso Simulado	Desvio (%)
	Cisalhamento	Restituição	Atrito estático	Atrito de Rolamento	Coesão		
1	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	46,24±0,99	-12,03
2*	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	50,53±0,58	-3,87
3	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	49,63±1,95	-5,57
4	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	61,1±4,00	16,27
5	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	40,03 ±1,13	-23,84
6	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	43,67±1,37	-16,92
7	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	47,19 ±1,98	-10,22
8	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	57,67 ±1,52	9,72
9	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	42,71 ±2,17	-18,73
10*	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	54,29 ±1,82	3,28
11*	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	51,22 ±3,67	-2,55
12	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	61,27 ±2,98	16,58
13	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	47,00 ±3,34	-10,57
14	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	55,88 ±1,13	6,32
15*	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	53,92 ±1,26	2,58
16*	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	52,23 ±3,89	-0,63
17	- α (1,18.10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	60,15 ±2,16	14,44
18	α (10,82.10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	57,41 ±2,37	9,22
19*	0 (6,00x10 ⁶)	- α (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	54,91±3,38	4,46
20*	0 (6,00x10 ⁶)	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	52,94 ±0,70	0,73
21	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	- α (0,018)	0 (0,125)	0 (0,060)	6,88 ±0,45	-86,91
22	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	0 (0,060)	48,68 ±1,54	-7,38
23	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	- α (0,005)	0 (0,060)	47,52 ±2,13	-9,59
24	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	0 (0,060)	63,95 ±1,59	21,68
25*	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	- α (0,002)	52,13 ±3,51	-0,89
26*	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	α (0,118)	53,11 ±2,51	-1,05
27*	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	53,61 ±2,44	1,99
28*	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	55,16 ±2,30	4,94

* simulações que resultaram em valores próximos ao experimental

Percebe-se pelos resultados (Tabela 5.5) que existem diferenças entre os ângulos de repouso dinâmico simulados, indicativo de que os parâmetros adotados influenciam a resposta. Salienta-se que os desvios calculados em percentagem se referem às variações dos valores simulados em relação ao experimental. Percebe-se que as parametrizações adotadas nas simulações marcadas com asterisco (*) acarretaram em desvios menores que 5%, ou seja,

predições próximas ao valor experimental de $52,6^\circ$. Entretanto, as simulações 4, 12, 17, 19, 21, 24 e 28 resultaram em valores inconsistentes. Salienta-se que as simulações 4 e 12 possuem em comum o coeficiente de restituição e os coeficientes de atrito estático e de rolamento, respectivamente fixados nos níveis (0,2; 0,8; 0,2), condição essa que possivelmente favorece a coesão entre as partículas resultando no aumento do ângulo de repouso dinâmico. Já as simulações 17 e 24 possuem coeficientes de cisalhamento e o de rolamento, fixados nas condições extremas.

A parametrização adotada na simulação 21 resultou em ângulo de repouso muito baixo, sendo essa corrida eliminada durante a obtenção do modelo por meio de regressão.

A Figura 5.3 apresenta o estudo comparativo entre (a) o ângulo de repouso experimental obtido para a semente de acerola com os melhores valores preditos pela simulação. São elas as simulações 16 e 25. As imagens confirmam que a parametrização adequada converge para valores muito próximos ao experimental, ou seja, com pequenos desvios. Enquanto que a Figura 5.3 (b) mostra as simulações que apresentam os maiores desvios em relação ao dado experimental.

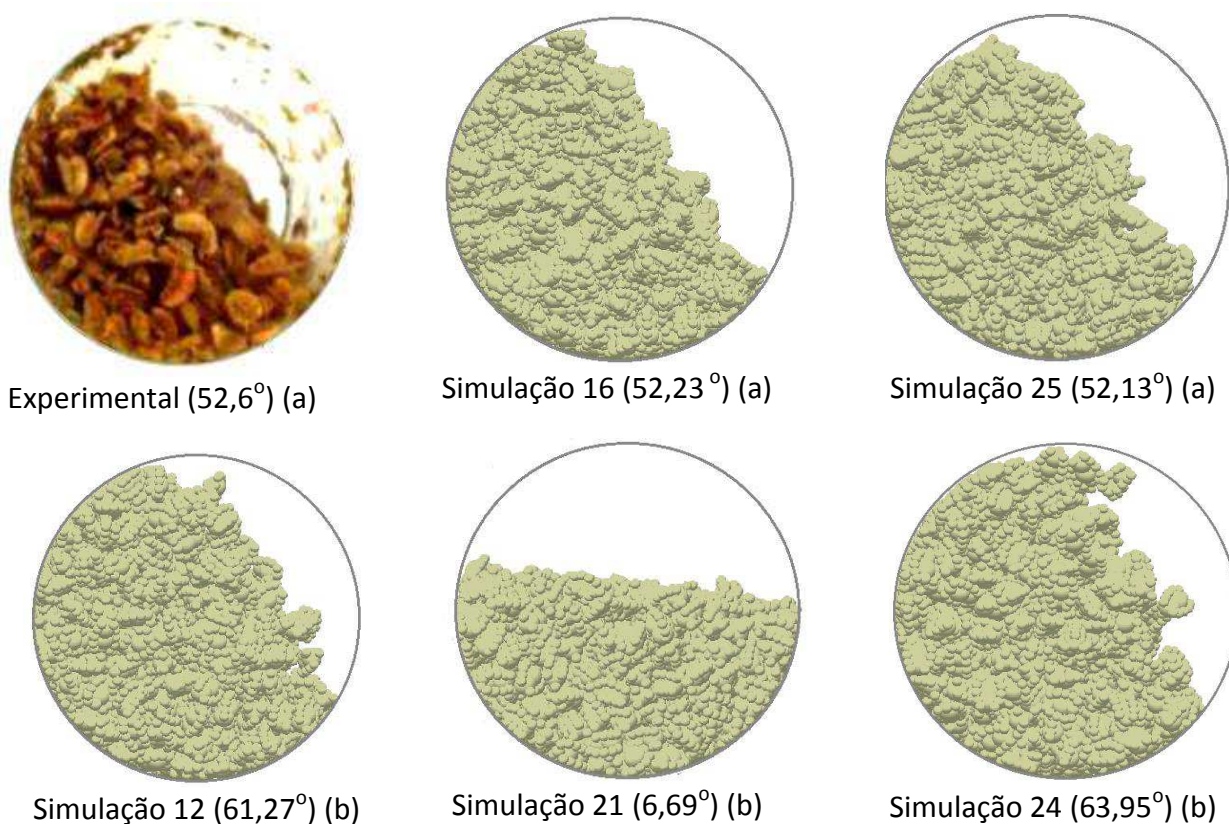


Figura 5.3 - Ângulo de repouso dinâmico da semente de acerola (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.

A análise de regressão múltipla foi realizada para quantificar o efeito dos parâmetros dos modelos de Hertz-Mindlin e JKR sobre o ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola. Para obter a equação que descreve a resposta em função das variáveis independentes, testes de hipóteses foram realizados utilizando a estatística t de Student para identificar os parâmetros significativos. Os parâmetros estimados pelo método dos mínimos quadrados com um nível de significância superior a 10% ($p > 0,1$) foram negligenciados. Portanto, considerando-se apenas as variáveis significativas, o modelo ajustado aos dados experimentais é apresentado na forma matricial (Equação 5.5).

Verifica-se que o parâmetro coesão não se mostrou estatisticamente significativo, entretanto suas interações com outras variáveis promovem alterações no ângulo de repouso dinâmico das sementes de acerola.

Ressalta-se que a variável coesão, no modelo JKR é expressa através da energia de superfície. Segundo Schulze (2007) as forças coesivas/adesivas são causadas por diferentes mecanismos e influenciam fortemente a escoabilidade de um material granular. Em materiais granulares úmidos as forças coesivas são decorrentes principalmente das pontes de líquido presentes entre as partículas. Tais forças dependem do grau de umidade e sua importância no sistema também está relacionada ao diâmetro das partículas. As forças coesivas alteram características importantes como o ângulo de repouso, a segregação de partículas de tamanhos diferentes, além de outros fenômenos responsáveis pela escoabilidade do material.

$$\phi_{DEM} = 54,12 + x'b + x'Bx \quad (5.5)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,85 \\ -1,07 \\ 3,47 \\ 4,02 \\ 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1,61 & 1,16 & -1,00 & 0,00 & 0,00 \\ 1,16 & 0,00 & 0,00 & -1,00 & -1,63 \\ -1,00 & 0,00 & -4,65 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -1,00 & 0,00 & 0,00 & 1,21 \\ 0,00 & -1,63 & 0,00 & 1,21 & 0,00 \end{bmatrix}$$

em que X_1 = cisalhamento, X_2 = restituição, X_3 = atrito estático, X_4 = atrito de rolamento e X_5 = coesão.

Pela Equação 5.5 percebe-se que os coeficientes de atrito estático e de rolamento são parâmetros que mais exercem alterações sobre o ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola. De acordo com Santos (2013), o atrito estático controla o movimento de translação das partículas no escoamento, sendo considerado um parâmetro de resistência. A superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico em função dos coeficientes de atrito estático e de rolamento, mantendo-se as demais variáveis fixas no ponto central é apresentada na

Figura 5.4. À medida que o atrito de rolamento diminui, é observada uma redução do ângulo de repouso. De um modo geral, verifica-se que o ângulo de repouso pode alcançar valores máximos na condição de elevados valores de atrito de rolamento (0,2) associada à condição de atritos estáticos intermediários (0,5).

A partir da análise de variância (Tabela 5.6) ressalta-se o elevado coeficiente de correlação de 96,3%. A Tabela 5.6 explicita através do teste F de regressão, o fato de que o modelo proposto possui significado estatístico.

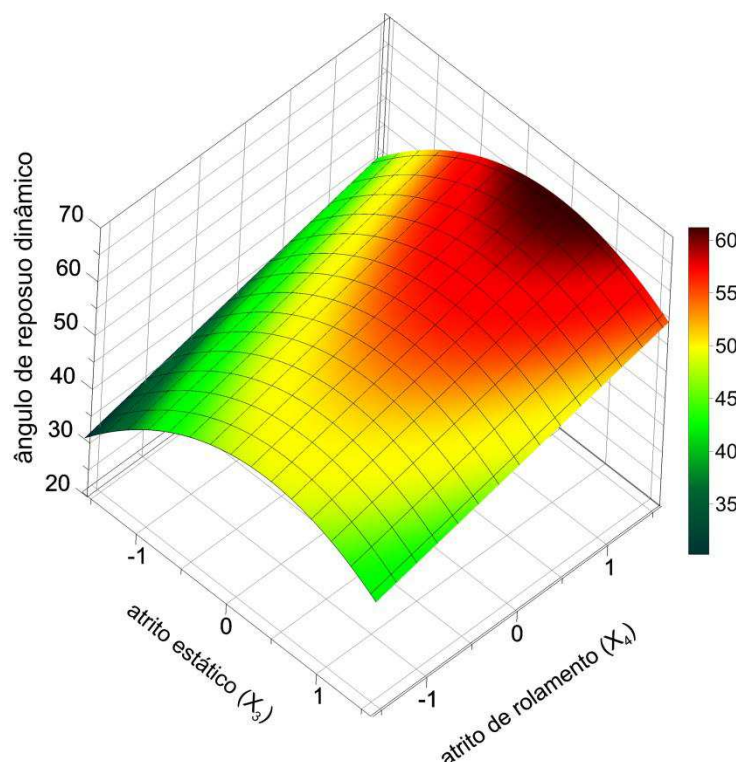


Figura 5.4 – Superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico simulado para o resíduo de acerola em função dos atritos estático e rolamento, mantidos fixos no ponto central os demais parâmetros.

Tabela 5.6 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (90%)	F _{cal} /F _{tab}
0,928	0,963	17,65	2,04	8,65

5.2.2 Simulação numérica adotada na análise do ângulo de repouso dinâmico da soja

A Tabela 5.7 apresenta os valores simulados para estudo do ângulo de repouso dinâmico da soja. Confrontando-se os desvios obtidos para a soja (Tabela 5.7) e para os resíduos de acerola (Tabela 5.5) verifica-se que, desvios maiores foram obtidos para a soja.

Tabela 5.7 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico da soja (valor experimental de $41,10 \pm 2,0$). ($\alpha=1,607$)

Corrida	Coeficientes					Ângulo repouso Simulado	Desvio (%)
	Módulo Cisalhamento	Poisson	Restituição	Atrito Estático	Atrito Rolamento		
1*	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$39,82 \pm 0,79$	-3,11
2	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$47,31 \pm 0,90$	15,11
3	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$38,49 \pm 0,34$	-6,35
4	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	$58,36 \pm 0,88$	41,99
5	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$38,10 \pm 1,42$	-7,30
6	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	$60,14 \pm 2,41$	46,33
7*	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$39,62 \pm 0,61$	-3,60
8	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$45,95 \pm 1,99$	11,80
9*	1 ($9,00 \times 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,20)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$39,99 \pm 1,29$	-4,53
10	1 ($9,00 \times 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	$58,01 \pm 0,75$	41,14
11*	1 ($9,00 \times 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$39,41 \pm 2,03$	-4,11
12*	1 ($9,00 \times 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$39,24 \pm 2,34$	-4,53
13*	1 ($9,00 \times 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$39,22 \pm 1,12$	-4,57
14	1 ($9,00 \times 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$49,47 \pm 0,77$	20,36
15	1 ($9,00 \times 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$37,41 \pm 0,34$	-8,97
16	1 ($9,00 \times 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	$56,14 \pm 1,53$	36,59
17	$-\alpha$ ($1,18 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$53,28 \pm 1,05$	29,64
18	α ($10,82 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$51,82 \pm 2,10$	26,08
19	0 ($6,00 \times 10^6$)	$-\alpha$ (0,009)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$53,53 \pm 1,25$	30,24
20	0 ($6,00 \times 10^6$)	α (0,490)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$53,95 \pm 0,89$	31,27
21	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	$54,52 \pm 2,03$	32,65
22	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	$51,34 \pm 2,17$	24,91
23	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,125)	$10,84 \pm 3,25$	-73,63
24	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	$54,68 \pm 2,21$	33,04
25	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,002)	$46,99 \pm 2,62$	14,33
26	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	$61,51 \pm 2,46$	49,65
27	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$55,17 \pm 2,40$	34,23
28	0 ($6,00 \times 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$55,02 \pm 3,25$	33,87

* simulações que resultaram em valores próximos ao experimental

Ressalta-se que os sistemas envolvendo sementes de acerola foram representados pela associação entre os modelos de contato de Hertz-Mindlin e o modelo de coesão JKR, devido ao elevado teor de umidade deste material. No entanto, as simulações para estudo do

ângulo de repouso dinâmico da soja foram realizadas considerando-se apenas o modelo Hertz-Mindlin. Fato esse que pode ter contribuído para o aumento dos desvios.

Observa-se ainda pela Tabela 5.7 que para determinadas corridas, desvios pequenos foram obtidos em relação ao valor experimental ($41,1^\circ \pm 2,0$), dentre elas as simulações maracadas por asterisco (*). São elas as simulações 1, 7, 9 11, 12 e 13, conforme explicitado na Figura 5.5. No entanto, para as condições adotadas nas simulações 4, 6, 10, 23 e 26 obtiveram-se grandes divergências entre os valores simulados e o experimental (Tabela 5.7 e Figura 5.5).

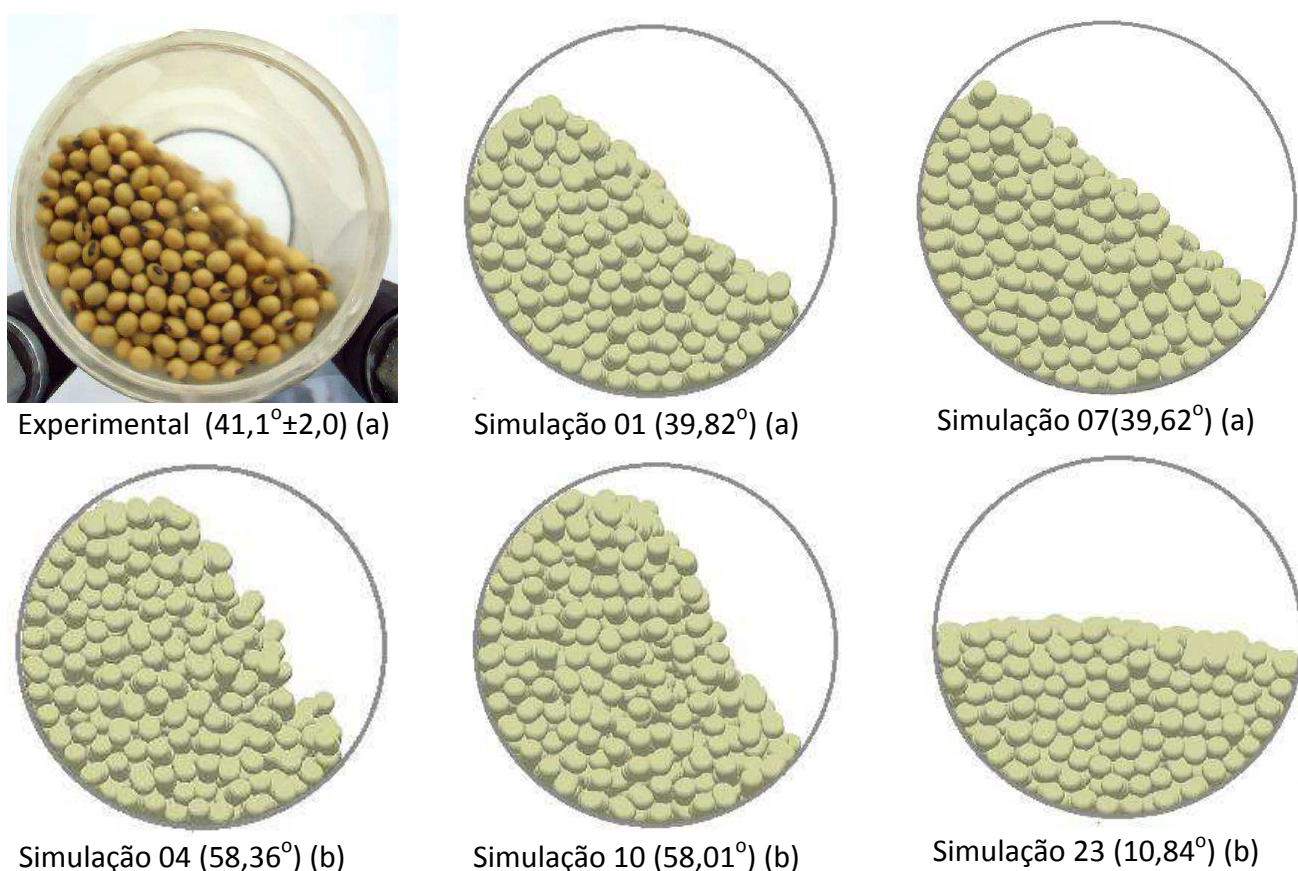


Figura 5.5 - Ângulo de repouso dinâmico da soja (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.

Negligenciando-se, na análise estatística, a simulação 23, devido à sua elevada inconsistência numérica, o modelo de regressão proposto para os resultados simulados é apresentado pela Equação 5.6, dada na forma matricial. A Figura 5.6 apresenta a superfície de resposta ajustada para o ângulo de repouso dinâmico da soja em função dos atritos, estático

e de rolamento, mantendo-se fixos no ponto central os demais parâmetros. Através desta, percebe-se que a simulação prediz valores elevados, e portanto elevada coesão entre as partículas, quando os coeficientes de atrito estático e de rolamento encontram-se em seus valores máximos, 0,8 e 0,2, respectivamente.

Segundo Zhou et al. (2002), o atrito de rolamento e o atrito estático controlam os movimentos de translação e rotação e exercem efeitos significativos sobre o ângulo de repouso. De acordo com Brilliantov e Pöschel (1998), o atrito de rolamento ou resistência ao rolamento, é uma manifestação da perda de energia devido à histerese sobre o material forçado ou devido à dissipação viscosa, durante o movimento de rolamento de uma partícula sob uma carga normal.

$$\phi_{DEM} = 56,47 + x'b + x'Bx \quad (5.6)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,00 \\ -1,03 \\ 6,57 \\ 3,72 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -1,74 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & -1,28 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -1,59 & -0,86 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -0,86 & -5,22 & 2,87 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 2,87 & -1,08 \end{bmatrix}$$

em que X_1 = módulo de cisalhamento; X_2 = Poisson; X_3 = restituição; X_4 = Atrito estático e X_5 = atrito de rolamento.

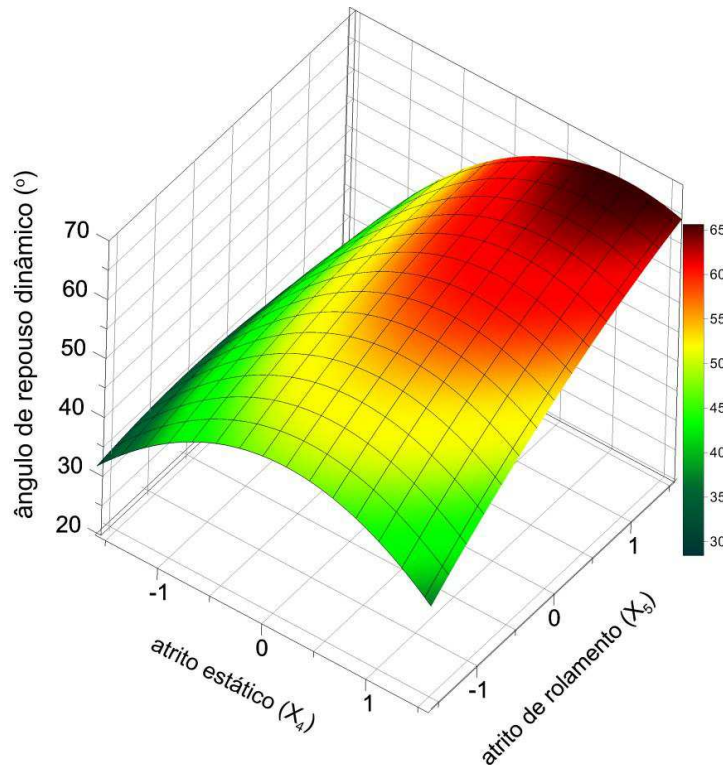


Figura 5.6 - Superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico simulado para a soja em função do atrito estático e de rolamento, mantidos fixos no ponto central os demais parâmetros.

A partir da análise de variância (Tabela 5.8) tem-se que o modelo apresenta elevado índice de qualidade de ajuste e ainda expressivo coeficiente de correlação. A partir da razão entre os valores de F_{cal} e F_{tab} nota-se que o modelo é significativo. E que, de modo similar os coeficientes de atrito estático e de rolamento exercem efeitos significativos sobre o ângulo de repouso dinâmico da soja.

Tabela 5.8 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso dinâmico da soja.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F_{cal}	F_{tab} (95%)	F_{cal}/F_{tab}
0,968	0,984	47,96	2,03	23,63

5.2.3 Simulação numérica adotada na análise do ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por soja e acerola a 50%

Após realização dos ensaios experimentais, obteve-se o valor de $44,96 \pm 2,50$ para o ângulo de repouso dinâmico da mistura de iguais frações mássicas de soja e acerola. Os resultados obtidos nas simulações computacionais conduzidas por meio de planejamento experimental envolvendo os parâmetros estabelecidos são apresentados na Tabela 5.9.

Verifica-se que desvios inferiores a 5% foram obtidos para determinadas combinações entre os parâmetros, o que se confirma pelas imagens apresentadas na Figura 5.7. Nota-se que a maioria destas simulações foram parametrizadas com níveis baixos de atrito de rolamento (0,050) e coeficiente de coesão (0,024).

Verifica-se pelas imagens simuladas que existe a segregação das partículas de soja no centro do cilindro. Segundo Ottino e Khakhar (2002) a segregação por cisalhamento, é frequentemente observada em recipientes cilíndricos preenchidos parcialmente com uma mistura de diferentes grãos e rotacionados em torno de seu eixo.

De acordo com Ottino e Khakhar (2002), na segregação radial, as partículas menores ou mais densas migram em direção ao centro do cilindro após poucas rotações. Para baixas velocidades de rotação, a percolação domina. Assim, as menores partículas seguem para os níveis inferiores da camada e para o interior, formando um aglomerado de pequenas partículas no centro do recipiente. No entanto, para altas velocidades de rotação, acontece o contrário, com as maiores partículas no centro, e as menores, na periferia do cilindro.

Tabela 5.9 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por resíduo de acerola e soja a 50% (valor experimental de $44,96 \pm 2,5$). ($\alpha=1,607$)

Corrida	Coeficientes				Ângulo repouso Simulado	Desvio (%)
	Restituição	Atrito Estático	Atrito Rolamento	Coesão		
1*	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	$45,00 \pm 1,56$	0,09
2*	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	$43,81 \pm 2,43$	-2,57
3	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	$49,68 \pm 2,77$	10,51
4	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	$51,34 \pm 0,94$	14,19
5*	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	$46,35 \pm 2,41$	3,09
6	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	$48,10 \pm 1,43$	6,99
7	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	$50,52 \pm 1,45$	12,37
8	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	$52,05 \pm 1,65$	15,76
9*	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	$46,20 \pm 1,93$	2,77
10*	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	$47,20 \pm 1,12$	4,97
11	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	$51,26 \pm 1,82$	14,02
12	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	$51,65 \pm 0,67$	14,88
13*	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	$46,62 \pm 2,49$	3,69
14	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	$48,32 \pm 1,88$	7,49
15	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	$48,22 \pm 2,06$	7,24
16	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	$49,04 \pm 2,80$	9,07
17	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	$49,76 \pm 3,57$	10,68
18	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	$50,51 \pm 2,10$	12,33
19*	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,125)	0 (0,060)	$46,95 \pm 1,85$	4,43
20	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	0 (0,060)	$48,80 \pm 1,71$	8,55
21*	0 (0,500)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,004)	0 (0,060)	$46,48 \pm 2,47$	3,39
22	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	0 (0,060)	$52,98 \pm 1,92$	17,83
23	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$-\alpha$ (0,002)	$49,97 \pm 4,01$	11,15
24	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	α (0,118)	$52,04 \pm 2,80$	15,75
25	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	$52,43 \pm 1,73$	16,62
26	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	$51,25 \pm 3,42$	13,99
27	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	$51,66 \pm 3,85$	14,90
28	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	$51,67 \pm 1,89$	14,96

* simulações que resultaram em valores próximos ao experimental

O modelo proposto ajustado aos dados simulados é apresentado na equação 5.7, na sua forma matricial, onde o parâmetro isolado, coeficiente de restituição, não se apresenta como significativo do ponto de vista estatístico. De modo similar as interações da coesão com os demais parâmetros também não são consideradas significativas, no nível de significância de 5%.

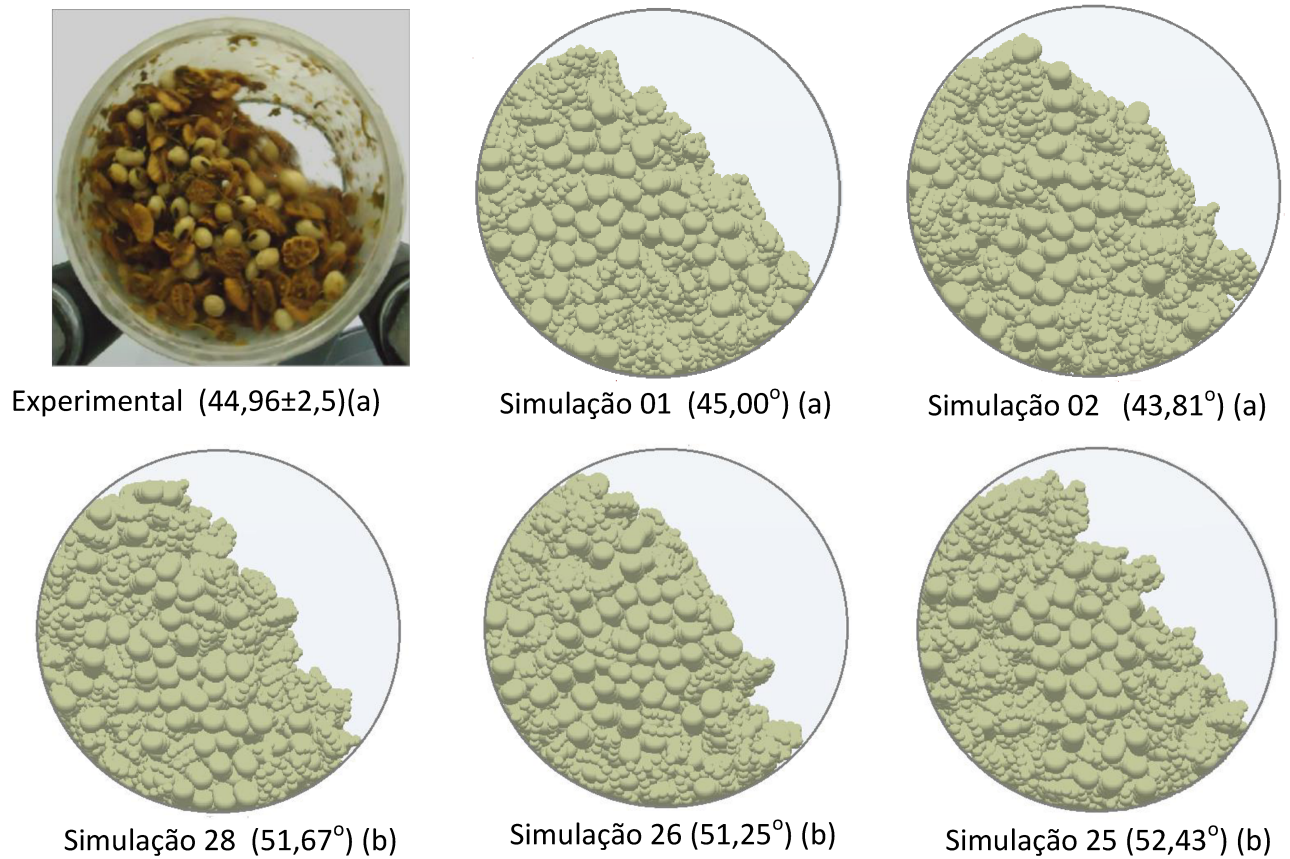


Figura 5.7 - Ângulo de repouso dinâmico da mistura resíduo de acerola e soja (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.

$$\phi_{DEM} = 51,55 + x'b + x'Bx \quad (5.7)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,00 \\ 0,29 \\ 2,01 \\ 0,52 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} -0,65 & -0,71 & -0,53 & 0,00 \\ -0,71 & -1,53 & -0,71 & 0,00 \\ -0,53 & -0,71 & -0,81 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix}$$

em que X_1 = restituição, X_2 = atrito estático, X_3 = atrito de rolamento e X_4 = coesão.

A partir do modelo proposto são apresentadas as superfícies de resposta ajustadas ao ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por 50% de soja e resíduo de acerola. De modo similar aos anteriores, valores elevados de ângulo de repouso são preditos para valores elevados de coeficientes de atrito de rolamento (0,2) (Figura 5.8a).

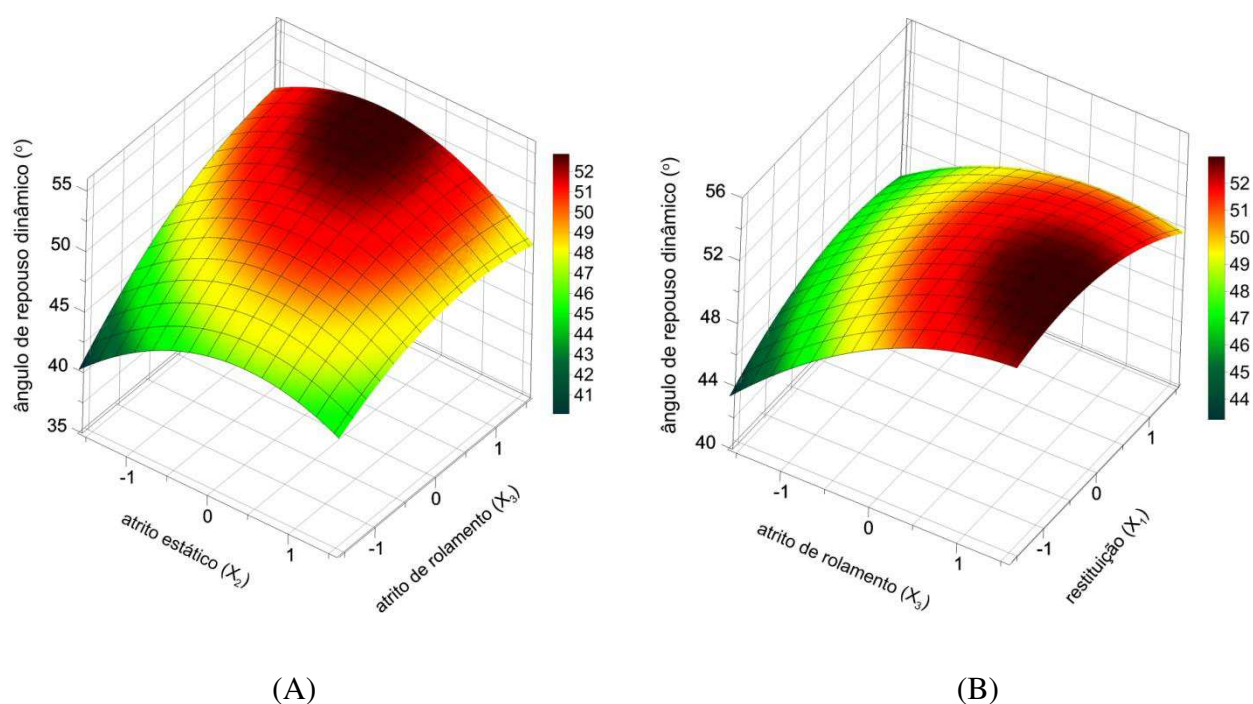


Figura 5.8 - Superfície de resposta ajustada ao ângulo de repouso dinâmico simulado para a mistura constituída por soja e resíduo de acerola.

A análise de variância aponta que o modelo possui bom ajuste aos dados simulados, sendo esse significativo estatisticamente com confiabilidade de 95% (Tabela 5.10).

Tabela 5.10 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso dinâmico da mistura constituída por soja e resíduo de acerola.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coefficiente da correlação	F_{cal}	F_{tab} (95%)	F_{cal}/F_{tab}
0,956	0,978	43,59	2,46	17,72

Dentre as simulações realizadas é possível inferir que a simulação 1 caracteriza-se pelo menor desvio entre os resultados experimentais e os simulados (Tabela 5.9). Destaca-se, no entanto, que apesar da combinação de parâmetros adotada neste experimento ser satisfatória, não se pode garantir que os valores individuais estabelecidos para os parâmetros sejam os melhores para a mistura resíduo de acerola e soja. No entanto, a combinação entre esses parâmetros representa satisfatoriamente o ângulo de repouso da mistura proposta.

A Tabela 5.11 mostra o estudo comparativo entre os melhores resultados simulados obtidos para os componentes puros e para a mistura a 50%. Verifica-se que os parâmetros

propostos para a mistura em questão são inferiores aos obtidos para os componentes puros, denotando-se comportamentos fluidodinâmicos distintos.

Tabela 5.11- Estudo comparativo entre os parâmetros aplicados à soja e acerola puros e em mistura.

Parâmetros	Resíduo Acerola	Soja	Mistura resíduo acerola/soja
Módulo de Cisalhamento	$9,00 \times 10^6$	$3,00 \times 10^6$	$9,00 \times 10^6$ (acerola) 3×10^6 (soja)
Razão de Poisson	0,250	0,10	0,25 (acerola) 0,1 (soja)
Coeficiente de Restituição	0,800	0,20	0,200
Coeficiente de Atrito	0,800	0,20	0,200
Coeficiente de Rolamento	0,200	0,20	0,050
Coesão [J/m^2]	0,096	-	0,024
Número de partículas	627	1552	427(acerola) 508 (soja)

A Tabela 5.12 apresenta o estudo comparativo entre os valores experimental e simulado, em que se verifica que os valores simulados se aproximam muito dos experimentais, o que demonstra a eficácia da análise numérica.

Tabela 5.12 - Estudo comparativo entre os valores simulados e os experimentais, para o ângulo de repouso dinâmico.

Material	Experimental	Simulado
Resíduo de acerola	$52,60 \pm 3,8$	$52,20 \pm 3,9$
Soja	$41,10 \pm 2,0$	$39,80 \pm 0,8$
Mistura resíduo de acerola e soja a 50%	$44,96 \pm 2,5$	$45,00 \pm 1,6$

5.2.4 Simulações na análise do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola

O ângulo de repouso estático é um dos principais parâmetros de análise da escoabilidade de materiais granulares. Reimbert e Reimbert (1976) citado por Silva (2003) concordam ao afirmar que as principais características de fluxo dos materiais armazenados são atrito interno (partícula/partícula), atrito externo (partícula/parede), ângulo de repouso e massa específica aparente. Em escoamentos de materiais granulares, o ângulo de repouso estático, também conhecido como ângulo da pilha, fornece uma compreensão dos atritos e da coesão (SILVA, 2003).

A análise do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola foi realizada por meio de avaliação numérica utilizando a metodologia de superfície de resposta, sendo determinados os efeitos dos parâmetros dos modelos de Hertz-Mindlin e JKR.

A Tabela 5.13 apresenta os ângulos obtidos pela simulação e os desvios desses em relação ao experimental ($39,20 \pm 1,40$). Pelos desvios obtidos tem-se que a parametrização realizada, para a maioria das simulações, acarretou em valores próximos ao experimental, sendo essa satisfatória. Ressalta-se que para as simulações 8, 16, 20, 23 e 27 os desvios em relação ao experimental foram menores ou próximos a 5%, sendo essas as melhores parametrizações dos modelos propostos. Em contrapartida, simulações tais como 2, 15, 19 e 21 não resultaram em estimativas aceitáveis para o ângulo de repouso estático (Figura 5.9).

Tabela 5.13 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso estático do resíduo de acerola (valor experimental de $39,20 \pm 1,4$).

Corrida	Coeficientes					Ângulo repouso φ_{DEM}	Desvio (%)
	Cisalhamento	Restituição	Atrito estático	Atrito de Rolamento	Coesão		
1	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	30,78±0,58	-21,41
2	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	28,39±1,89	-27,52
3	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	33,62±0,91	-14,16
4	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	43,41±2,67	10,83
5	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	31,39±3,65	-19,86
6	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	30,76±0,99	-21,45
7	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	42,97±0,87	9,71
8*	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	39,89±1,46	1,84
9	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	29,99±1,37	-23,44
10	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	31,87±1,71	-18,63
11	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	35,05±0,24	-10,51
12	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	44,92±1,92	14,69
13	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	34,69±0,51	-11,44
14	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	29,89±0,35	-23,68
15	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	49,26±3,07	25,78
16*	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	39,75±3,03	1,49
17	$-\alpha$ ($1,18 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	33,75±1,45	-13,84
18	α ($10,82 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	35,59±1,15	-9,13
19	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,00±0,00	100,00
20*	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	39,09±3,79	-0,20
21	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,125)	0 (0,060)	24,60±0,15	-37,19
22	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	0 (0,060)	47,29±5,15	20,74
23*	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,005)	0 (0,060)	37,15±0,20	-5,14
24	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	0 (0,060)	34,24±0,26	-12,57
25	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$-\alpha$ (0,002)	36,00±0,11	-8,09
26	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	α (0,118)	36,71±0,20	-6,27
27*	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	36,97±1,27	-5,61
28	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	36,56±0,69	-6,65

* simulações que resultaram em valores próximos ao experimental



Experimental (39.2 °) (a)



Simulação 20 (39,09°) (a)



Simulação 16 (39,75°) (a)



Simulação 08 (39,89°) (a)



Simulação 02 (28,39°) (b)



Simulação 15 (49,26°) (b)



Simulação 19 (0,0°) (b)

Figura 5.9 - Ângulo de repouso estático para o resíduo de acerola (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.

A adoção de valor próximo de zero para o coeficiente de restituição (simulação 19) acarretou na não formação de pilha (Figura 5.9). No entanto, valores elevados do coeficiente de restituição (simulação 20) conduziram a valores próximos ao experimental. Segundo Bharadwaj et al. (2010) o coeficiente de restituição é uma medida da perda de energia durante uma colisão. Por definição, é a razão entre a velocidade relativa de dois corpos antes e após a colisão. O coeficiente de restituição é utilizado na simulação para estimar a força de amortecimento (normal e tangencial) durante uma colisão.

Desprezando-se a simulação 19, o modelo proposto para a análise do ângulo de repouso estático para o resíduo de acerola é explicitado em sua forma matricial pela Equação 5.8. Percebe-se que dentre os parâmetros avaliados o coeficiente de atrito estático exerce efeito de elevação sobre essa resposta, ou seja, aumentos desse parâmetro contribuem para o aumento do ângulo de repouso estático.

Nota-se pela Tabela 5.14 que o modelo exibe elevado significado estatístico e possui significativa qualidade de ajuste.

$$\varphi_{DEM} = 36,01 + x'b + x'Bx \quad (5.8)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,81 \\ 1,37 \\ 5,56 \\ 0,00 \\ 0,00 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -1,71 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & -2,32 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,82 & -0,93 \\ 0,00 & -2,32 & 0,82 & 0,00 & 0,00 \\ -1,71 & 0,00 & -0,93 & 0,00 & 0,00 \end{bmatrix}$$

em que X_1 = cisalhamento, X_2 = restituição, X_3 = atritos estático, X_4 = atrito de rolamento e X_5 = coesão.

Tabela 5.14 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso estático do resíduo de acerola.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (95%)	F _{cal} /F _{tab}
0,956	0,978	59,22	2,54	23,31

A superfície de resposta ajustadas ao modelo proposto é apresentada na Figura 5.10 a partir da qual se infere o significativo efeito do atrito estático sobre o ângulo de repouso estático do resíduo de acerola. Ou seja, a formação do ângulo de repouso estático depende do comportamento do sólido, frente a fatores como atrito estático e de rolamento. Resultados similares foram obtidos por Nakashima (2011) em estudos simulacionais de ângulos de

repouso estático de areia, onde o mesmo obteve aumentos do ângulos de repouso em função do atrito estático.

A Figura 5.10 expõe ainda a dependência do ângulo de repouso estático com o atrito de rolamento, na qual se percebe que esse parâmetro exerce efeito menos pronunciado sobre essa resposta. Nakashima (2011) afirma que o efeito do atrito de rolamento é menos sensível do que o acarretado pelo atrito estático, ou seja a formação da pilha depende mais da translação de partículas do que de sua rotação.

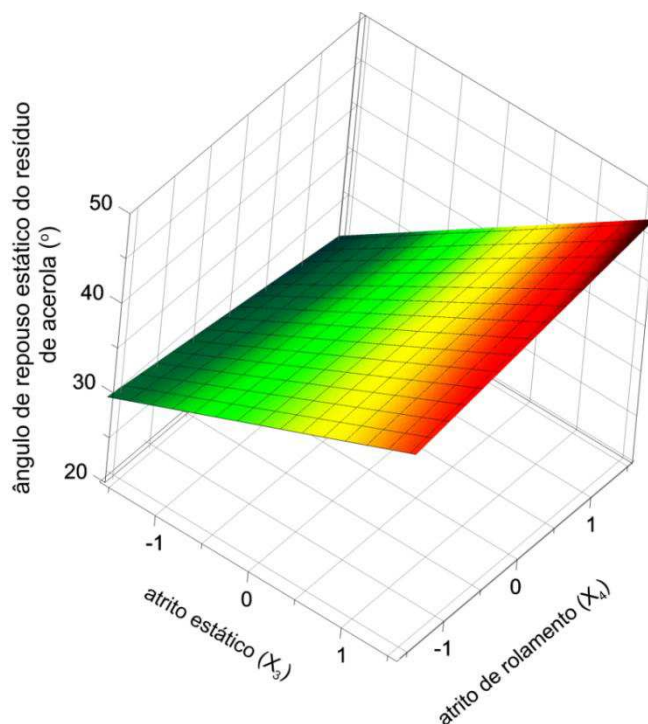


Figura 5.10 - Superfície de resposta ajustadas ao ângulo de repouso estático simulado para o resíduo de acerola.

5.2.5 Simulações numéricas adotadas na análise do ângulo de repouso estático da soja

Os efeitos dos parâmetros do Modelo Hertz-Mindlin sobre o ângulo de repouso estático da soja foram avaliados através da técnica de superfície de resposta, a qual se baseia no planejamento composto central. A Tabela 5.15 apresenta o PCC adotado e os ângulo de repouso estático simulados, bem como os desvios obtidos entre os valores simulados e experimental (21,40°).

Verifica-se pela Tabela 5.15 uma variabilidade elevada entre os valores dos ângulos de repouso simulados, onde dependendo das parametrizações adotadas o mesmo varia entre 0° e 34,6°. A simulação 23 resultou na não formação de pilha de soja, indicativo de que valores de coeficiente de atrito estático próximos de zero não permitem o atrito entre as partículas, fazendo com que elas deslizem umas sobre as outras com velocidade acima da real. Em

contrapartida, o nível mais elevado do coeficiente de atrito de rolamento (0,246) (Simulação 26) levou ao maior ângulo de repouso simulado. As imagens apresentadas na Figura 5.11 confirmam os resultados obtidos.

Tabela 5.15 - Simulações adotadas na análise do ângulo de repouso estático da soja (valor experimental de $21,40 \pm 0,9$).

Corrida	Coeficientes					Ângulo repouso φ_{DEM}	Desvio (%)
	Módulo Cisalhamento	Poisson	Restituição	Atrito Estático	Atrito Rolamento		
1	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$13,46 \pm 0,15$	-37,08
2*	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$19,94 \pm 1,20$	-6,84
3	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$12,99 \pm 0,18$	-39,29
4*	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	$23,12 \pm 1,07$	8,02
5	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$12,78 \pm 1,35$	-40,28
6	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	$33,60 \pm 0,29$	57,02
7	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$17,89 \pm 0,12$	-16,42
8*	-1 ($3,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$21,47 \pm 0,40$	0,34
9	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,20)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$14,92 \pm 0,04$	-30,30
10	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	$33,03 \pm 1,37$	54,35
11	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$18,47 \pm 0,34$	-13,69
12	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	-1 (0,100)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$23,20 \pm 1,02$	8,40
13	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	$18,62 \pm 0,22$	-12,99
14	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,004)	$32,21 \pm 0,10$	50,51
15	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	$14,64 \pm 0,43$	-31,59
16	1 ($9,00 \cdot 10^6$)	1 (0,400)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	$32,12 \pm 0,73$	50,09
17	$-\alpha$ ($1,18 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$28,33 \pm 0,84$	32,40
18	α ($10,82 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$29,75 \pm 0,71$	39,02
19	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	$-\alpha$ (0,009)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$29,84 \pm 0,62$	39,44
20	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	α (0,490)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$27,33 \pm 0,78$	27,71
21	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	$26,34 \pm 0,39$	23,08
22	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	$26,73 \pm 2,04$	24,91
23	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,125)	$0,00 \pm 0,00$	100,00
24	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	$26,87 \pm 1,43$	25,55
25	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,002)	$17,82 \pm 0,94$	-16,73
26	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	$34,59 \pm 0,15$	61,63
27	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$29,42 \pm 0,01$	37,49
28	0 ($6,00 \cdot 10^6$)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$29,94 \pm 0,08$	39,91

* simulações que resultaram em valores próximos ao experimental

Percebe-se que as condições de parametrização adotadas nas simulações 2, 4 e 8 resultaram em ângulos de repouso estático próximos ao experimental, fato evidenciado pelos desvios obtidos e pela Figura 5.11. Salienta-se que a maioria destas simulações foram parametrizadas adotando-se coeficiente de atrito estático no nível +1, ou seja, valor real de 0,800.

Os efeitos dos parâmetros do modelo adotado sobre o ângulo de repouso estático da soja foram avaliados por meio de regressão múltipla, utilizando apenas os parâmetros significativos no nível de significância de 10%, sendo os demais negligenciados (Equação 5.9).



Experimental (21,4°) (a)



Simulação 08 (21,5°) (a)



Simulação 02 (19,9°) (a)



Simulação 04 (23,1°) (a)



Simulação 16 (32,1°) (b)



Simulação 26 (34,6°) (b)



Simulação 23 (0°) (b)

Figura 5.11 - Ângulo de repouso estático para a soja (a) estudo comparativo entre o resultado experimental e os melhores valores preditos pela simulação e (b) simulações com elevados desvios em relação ao experimental.

$$\varphi_{DEM} = 29,17 + x'b + x'Bx \quad (5.9)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 1,62 \\ 0,95 \\ 0,00 \\ 6,03 \\ 3,07 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -1,22 & -1,44 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & -1,44 & -5,04 & 0,00 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & -1,35 \end{bmatrix}$$

em que X_1 =cisalhamento, X_2 =Poisson, X_3 = restituição, X_4 = atrito estático e X_5 = atrito de rolamento.

A Equação 5.9 explicita que os parâmetros mais significativos foram os coeficientes de atrito estático e de rolamento, sendo o coeficiente de restituição não significativo sobre a resposta. A razão de Poisson por meio das interações com os demais parâmetros não exerce efeito estatístico sobre a resposta, apesar de exercer influência na forma isolada. Ressalta-se que o módulo de cisalhamento, a razão de Poisson e o módulo de cisalhamento não são significativos na forma quadrática.

A análise de variância confirma a significância estatística do modelo, onde a razão F_{cal}/F_{tab} é de 8,26 (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 - Análise de regressão para o modelo ajustado ao ângulo de repouso estático da soja.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coefficiente da correlação	F_{cal}	F_{tab} (95%)	F_{cal}/F_{tab}
0,902	0,950	20,74	2,51	8,26

Considerando-se o elevado número de parâmetros do Modelo de Hertz-Mindlin, infere-se que existe, portanto uma região envolvendo combinações de parâmetros que levam a respostas próximas à experimental, a qual pode ser melhor descrita pelas superfícies de resposta. Assim, as superfícies de respostas ajustadas ao modelo proposto são apresentadas na Figura 5.12 (A) e (B).

A Figura 5.12 (A) apresenta o comportamento do ângulo de repouso estático da soja em função dos atritos estático e de rolamento, onde se verifica um aumento da resposta em função do aumento desses coeficientes. Resultados similares foram obtidos por Santos (2013) em estudos que avaliam os efeitos da forma das partículas sobre o ângulo de repouso estático, utilizando o método DEM. Segundo o autor observa-se que o ângulo de repouso é diretamente proporcional aos atritos estático e de rolamento, ou seja, é possível combinar os atritos

estático e de rolamento para se obter valores crescentes do ângulo de repouso (SANTOS, 2013). Verifica-se pela Figura 5.12 (B) que o ângulo de repouso estático da soja sofre pouca influência do coeficiente de restituição.

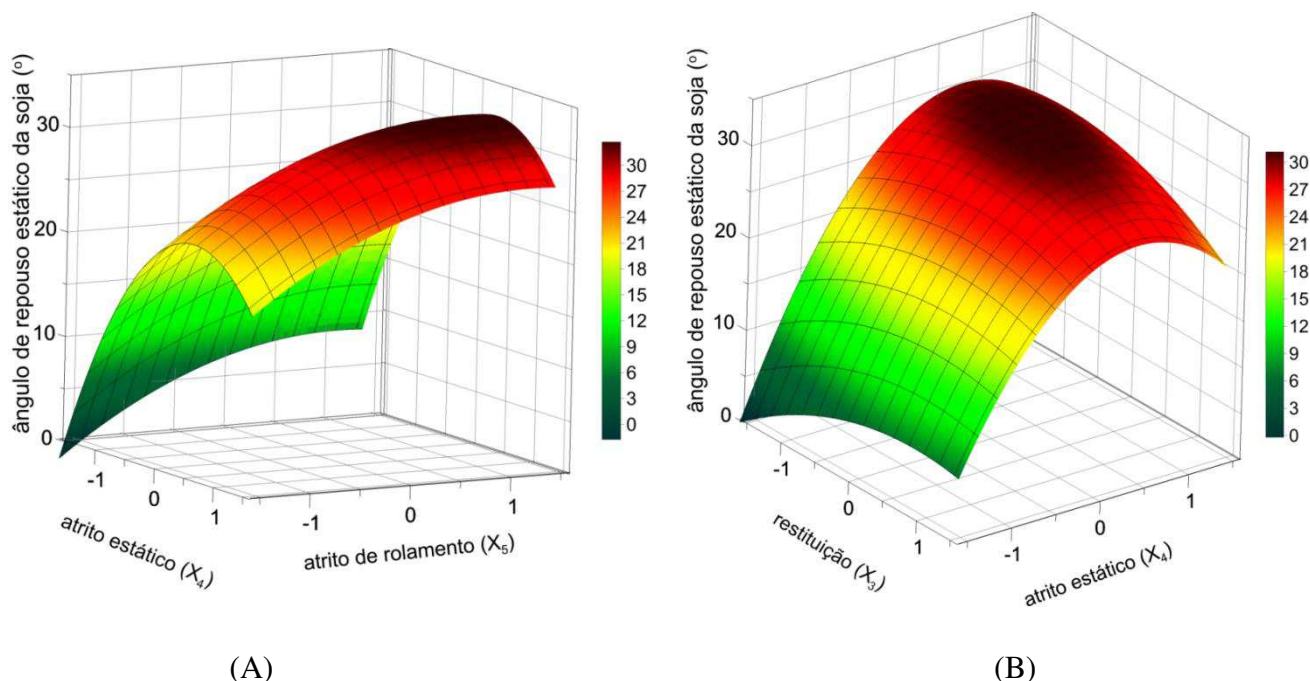


Figura 5.12 - Superfícies de resposta ajustadas ao ângulo de repouso estático simulado para a soja.

O estudo comparativo entre os parâmetros adotados à soja e ao resíduo de acerola é apresentado na Tabela 5.17, parametrização essa que conduziu à melhor conformidade entre os valores simulados e os experimentais. Percebe-se que parametrizações distintas conduzem a valores próximos aos experimentais, pois os materiais possuem propriedades diferentes, dentre elas o formato, a rugosidade e a umidade.

Tabela 5.17 – Parâmetros dos modelos aplicados à soja e acerola que conduziram a menores desvios para o ângulo de repouso estático

Parâmetros	Resíduo Acerola	Soja
Módulo de Cisalhamento	$6,00 \times 10^6$	$3,00 \times 10^6$
Razão de Poisson	0,250	0,40
Coeficiente de Restituição	0,982	0,80
Coeficiente de Atrito Estático	0,500	0,80
Coeficiente de Rolamento	0,125	0,05
Coesão [J/m^2]	0,050	-

A Tabela 5.18 apresenta a análise comparativa entre os valores experimental e simulado, onde se verifica que os valores simulados se aproximam dos experimentais, resultado da eficácia da análise numérica.

Tabela 5.18 - Comparação entre os valores simulados e os experimentais, para o ângulo de repouso estático.

Material	Experimental	Simulado
Resíduo de acerola	$39,20 \pm 1,4$	$39,10 \pm 3,8$
Soja	$21,40 \pm 0,9$	$21,50 \pm 0,4$

5.2.6 Avaliação numérica da porosidade do leito estático (empacotamento do leito) composto por resíduo de acerola

Dentre os parâmetros necessários à modelagem e simulação do leito de jorro, a velocidade de mínimo jorro se destaca pois, caracteriza o início do regime de fluidização no leito. Na prática, é comum operar o leito de jorro com velocidades ligeiramente acima do mínimo jorro para garantir a formação de jorro estável. Parâmetro como a porosidade da mistura binária influencia de modo expressivo a velocidade de mínimo jorro, variável precípua utilizada na modelagem e simulação do leito de jorro.

Dentro desse contexto a porosidade do leito estático foi determinada a partir do número de partículas presentes na altura de leito estático de 8 cm. O processo de simulação consistiu no enchimento gradual do cone de dimensões similares ao do leito de jorro adotado, onde a entrada de partículas foi realizada a partir de uma superfície quadrada virtual situada na parte superior do vaso. A queda das partículas no cone se fez pela ação da gravidade obtendo-se desse modo uma posição estática final.

Para avaliação dos parâmetros da simulação DEM para a porosidade de leito composto por resíduo de acerola, utilizou-se o planejamento composto central tendo-se como parâmetros: o módulo de cisalhamento, e os coeficientes de restituição, de atrito estático e de rolamento e o módulo da coesão, apresentada na Tabela 5.19. A tabela explicita que as simulações adotando-se os modelos de Hertz-Mindlin e JKR resultaram em porosidades do leito próximas à experimental (0,548), com desvios pequenos, em destaque as simulações 3, 6, 7, 10 e 25. Percebe-se ainda a elevada reprodutibilidade das simulações, onde valores próximos foram obtidos para as simulações com repetição no ponto central. Em contrapartida, as simulações 4, 5, 21 acarretaram em maiores desvios para a análise da porosidade em relação aos demais.

Tabela 5.19 - Simulações adotadas na análise da porosidade do leito estático constituído por resíduo de acerola (valor experimental de 0,548).

Simulação	Cisalhamento	Coeficientes					Desvio (%)
		Restituição	Atrito estático	Atrito de rolamento	Coesão	Porosidade (ϵ)	
1	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	0,529	-5,30
2	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	0,533	-2,74
3*	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	0,558	1,88
4	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	0,601	9,71
5	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	0,484	-11,59
6*	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	0,539	-1,58
7*	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	0,544	-0,68
8	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	0,567	3,94
9	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	0,501	-8,64
10*	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	1 (0,096)	0,558	1,88
11	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,050)	1 (0,096)	0,574	4,71
12	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	-1 (0,024)	0,594	8,43
13	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,050)	1 (0,096)	0,504	-8,00
14	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	-1 (0,024)	0,521	-4,92
15	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,050)	-1 (0,024)	0,537	-2,09
16	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	1 (0,096)	0,572	4,32
17	$-\alpha$ (1,18.10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,567	3,42
18	α (10,82.10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,570	3,94
19	0 (6,00x10 ⁶)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,580	5,86
20	0 (6,00x10 ⁶)	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,535	-2,35
21	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,466	-14,93
22	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,571	4,19
23	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,005)	0 (0,060)	0,534	-2,61
24	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	0 (0,060)	0,575	4,96
25*	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	$-\alpha$ (0,002)	0,543	-0,94
26	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	α (0,118)	0,562	2,53
27	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,570	3,94
28	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0 (0,060)	0,561	2,40

*Valores simulados próximos ao experimental

A partir da regressão múltipla obteve-se o modelo proposto pela Equação 5.10, onde se infere que apenas o parâmetro cisalhamento não exerce efeito sobre a porosidade. Entretanto, entre os parâmetros avaliados o coeficiente de atrito estático se destaca sobre a porosidade do leito, sendo esse efeito positivo. Portanto acréscimos no coeficiente de atrito estático resultam em aumentos da porosidade. Em contrapartida, acréscimos do coeficiente de restituição ocasionam decréscimos da porosidade no leito. Salienta-se ainda que apenas as interações atrito estático/coesão e atrito estático/restituição se revelaram parâmetros significativos, no nível de significância de 10%.

$$\varepsilon_{DEM} = 0,557 + x'b + x'Bx \quad (5.10)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,000 \\ -0,011 \\ 0,026 \\ 0,016 \\ 0,007 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,004 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & -0,016 & -0,003 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & -0,003 & 0,000 & -0,003 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,003 & 0,000 \end{bmatrix}$$

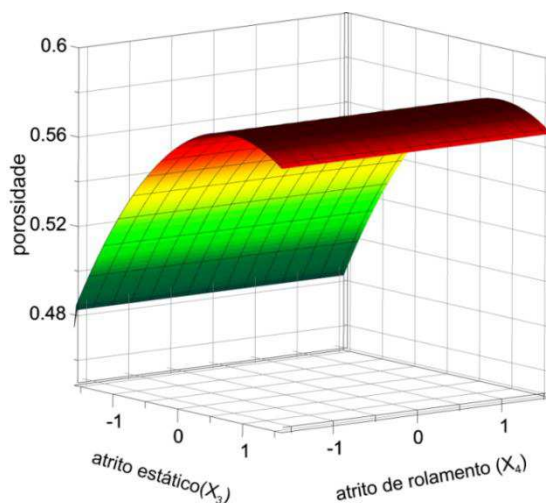
em que X_1 = cisalhamento, X_2 = restituição, X_3 = atrito estático, X_4 = atrito de rolamento e X_5 = coesão.

A análise de variância confirma a significância do modelo proposto e a qualidade do ajuste aos dados simulados (Tabela 5.20).

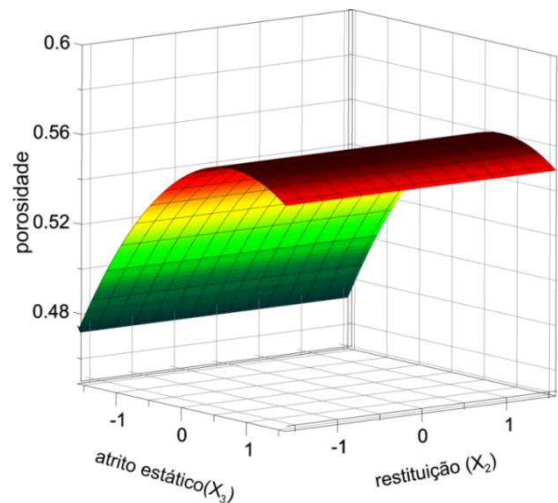
Tabela 5.20 - Análise de regressão para o modelo ajustado a porosidade do leito constituído por resíduo de acerola.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coefficiente da correlação	F _{cal}	F _{tab} (90%)	F _{cal} /F _{tab}
0,974	0,987	87,81	2,02	43,47

A superfície de resposta ajustada ao modelo proposto (Figura 5.13A) para a análise da porosidade do leito de resíduo de acerola expõe o comportamento da resposta frente aos coeficientes de atrito estático e de rolamento. Acrescenta-se que não existe interação entre esses parâmetros e que apenas o coeficiente de atrito estático contribui de modo expressivo sobre a porosidade do leito. Comportamento similar foi obtido para a superfície de resposta em função do atrito estático e do coeficiente de restituição (Figura 5.13B).



(A)



(B)

Figura 5.13 - Superfície de resposta ajustada à porosidade do leito estático constituído por resíduo de acerola.

5.2.7 Avaliação numérica da porosidade do leito estático (empacotamento do leito) composto por soja

O estudo da porosidade do leito estático constituído por soja se fez por meio do planejamento composto central apresentado pela Tabela 5.21, que explicita os desvios obtidos em relação à porosidade experimental (0,402). Em destaque as simulações 3, 5, 7, 11 e 25, que resultaram em desvios menores que 2%, que possuem em comum parametrização do atrito estático no nível -1. No entanto, as parametrizações adotadas para o coeficiente estático de +1 conduz a elevados desvios, são elas as simulações 2, 4, 6, 10, 16, 24 e 26.

Tabela 5.21 - Simulações adotadas na análise da porosidade do leito estático constituído por soja (valor experimental de 0,402).

Simulação	Coeficientes					Porosidade (ϵ)	Desvio (%)
	Módulo Cisalhamento	Poisson	Restituição	Atrito Estático	Atrito Rolamento		
1	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	0,390	2,84
2	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,004)	0,455	-13,18
3*	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,100)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	0,398	0,92
4	-1 (3,00.10 ⁶)	-1 (0,100)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	0,452	-12,63
5*	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,400)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	0,402	-0,09
6	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,400)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	0,469	-16,84
7*	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,400)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	0,406	-1,19
8	-1 (3,00.10 ⁶)	1 (0,400)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,004)	0,413	-2,93
9	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,100)	-1 (0,20)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	0,385	4,12
10	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,100)	-1 (0,200)	1 (0,800)	1 (0,200)	0,460	-14,46
11*	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,100)	1 (0,800)	-1 (0,200)	1 (0,200)	0,405	-0,73
12	1 (9,00x10 ⁶)	-1 (0,100)	1 (0,800)	1 (0,800)	-1 (0,004)	0,419	-4,39
13	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,400)	-1 (0,200)	-1 (0,200)	1 (0,200)	0,417	-3,75
14	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,400)	-1 (0,200)	1 (0,800)	-1 (0,004)	0,440	-9,61
15	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,400)	1 (0,800)	-1 (0,200)	-1 (0,004)	0,381	5,03
16	1 (9,00x10 ⁶)	1 (0,400)	1 (0,800)	1 (0,800)	1 (0,200)	0,456	-13,63
17	$-\alpha$ (1,18.10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,430	-7,14
18	α (10,82.10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,438	-9,15
19	0 (6,00x10 ⁶)	$-\alpha$ (0,009)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,441	-9,88
20	0 (6,00x10 ⁶)	α (0,490)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,440	-9,43
21	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,436	-8,60
22	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	α (0,982)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,420	-4,48
23	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,018)	0 (0,125)	0,365	9,15
24	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	α (0,982)	0 (0,125)	0,458	-14,09
25*	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	$-\alpha$ (0,002)	0,401	0,18
26	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	α (0,246)	0,460	-14,55
27	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,434	-8,05
28	0 (6,00x10 ⁶)	0 (0,250)	0 (0,500)	0 (0,500)	0 (0,125)	0,432	-7,60

*Valores simulados próximos ao experimental

O modelo ajustado à porosidade do leito constituído apenas por soja é apresentado pela Equação 5.11.

$$\varepsilon_{DEM} = 0,432 + x'b + x'Bx \quad (5.11)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} 0,000 \\ 0,000 \\ -0,005 \\ 0,025 \\ 0,012 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,004 \\ 0,000 & 0,000 & -0,004 & 0,000 & 0,004 \\ 0,000 & -0,004 & 0,000 & -0,005 & 0,003 \\ 0,000 & 0,000 & -0,005 & -0,009 & 0,004 \\ 0,004 & 0,004 & 0,003 & 0,004 & 0,000 \end{bmatrix}$$

em que X_1 = módulo de cisalhamento; X_2 = Poisson; X_3 = restituição; X_4 = Atrito estático e X_5 = atrito de rolamento.

Observa-se que, apesar da simulação adotada para a soja se basear apenas no Modelo de Hertz-Mindlin tem-se que o comportamento da soja se assemelha muito ao do resíduo de acerola, pois o coeficiente de atrito estático exerce efeito significativo sobre a resposta, sendo esse efeito positivo.

De modo similar o coeficiente de restituição reduz a porosidade do leito, fato esse também evidenciado para o resíduo de acerola. A Tabela 5.22 evidencia que o modelo proposto possui considerável qualidade de ajuste e significância estatística, comprovados pelo R^2 e pela razão entre o F_{cal}/F_{tab} .

Tabela 5.22 - Análise de regressão para o modelo ajustado à porosidade do leito estático constituído por soja.

Variável resposta umidade		Teste F (Regressão)		
Qualidade do ajuste (%)	Coeficiente da correlação	F_{cal}	F_{tab} (90%)	F_{cal}/F_{tab}
0,959	0,979	40,08	2,00	20,04

As superfícies de respostas (Figura 5.14) ajustadas à porosidade do leito constituído por soja comprovam as semelhanças com as obtidas para o resíduo de acerola, tendo em vista similaridades de comportamento entre essas superfícies.

Ressalta-se portanto, que a porosidade do leito estático depende dos parâmetros coeficientes de atrito estático e de rolamento e do coeficiente de restituição, parâmetros esses relacionados aos movimentos de translação e rotação da partícula e ainda da perda de energia após a colisão.

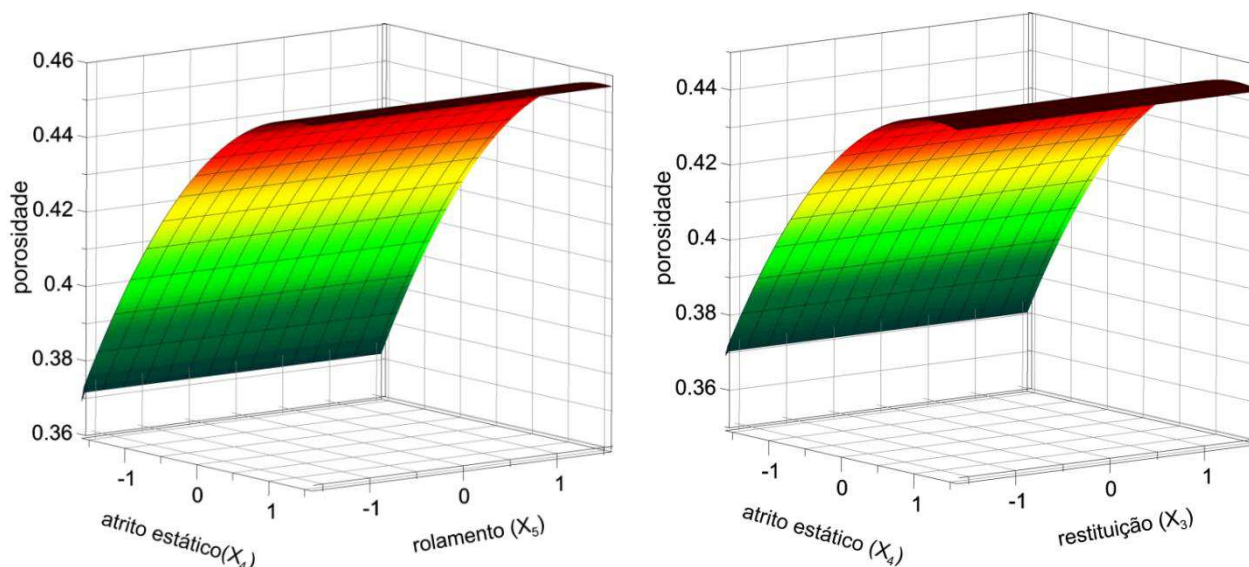


Figura 5.14 - Superfícies de respostas ajustadas à porosidade de leito estático constituído por soja.

5.2.8 Avaliação numérica para a porosidade do leito estático constituído por mistura de soja e resíduo de acerola.

As simulações de porosidade do leito estático para as misturas constituídas por resíduo de acerola e soja foram realizadas baseando-se nos resultados obtidos para os constituintes puros, conforme Tabela 5.23, que apresenta uma das parametrizações adotadas que resultaram em valores próximos ao experimental, sendo essa a parametrização escolhida. As simulações foram realizadas para alturas de leito estático variando de 0,06 a 0,1 m e frações de acerola entre 0 a 1.

Tabela 5.23 - Estudo comparativo entre os parâmetros aplicados à soja e acerola para a porosidade do leito estático.

Parâmetros	Porosidade do leito estático	
	Resíduo acerola	Soja
Módulo de Cisalhamento	$3,00 \times 10^6$	$3,00 \times 10^6$
Razão de Poisson	0,250	0,40
Coefficiente de restituição	0,800	0,20
Coefficiente de atrito estático	0,800	0,20
Coefficiente de atrito de rolamento	0,050	0,05
Energia de Interface (coesão)	0,096	-

A Figura 5.15 apresenta as porosidades simuladas para as misturas constituídas por diferentes frações de resíduo de acerola, para a altura de leito estático fixa de 0,08 m. Leitos compostos apenas por soja possuem porosidade de 0,402, enquanto que leitos constituídos por acerola possuem porosidade de 0,548. Portanto, a adição de soja a uma matriz composta por resíduo de acerola tende a reduzir a porosidade do leito estático, caracterizando um empacotamento do leito. Santos (2011) obteve comportamento similar, em estudo de uma mistura de areia e bagaço de cana de açúcar. Salienta-se ainda que os resultados simulados sejam próximos aos experimentais para toda a composição de mistura avaliada.

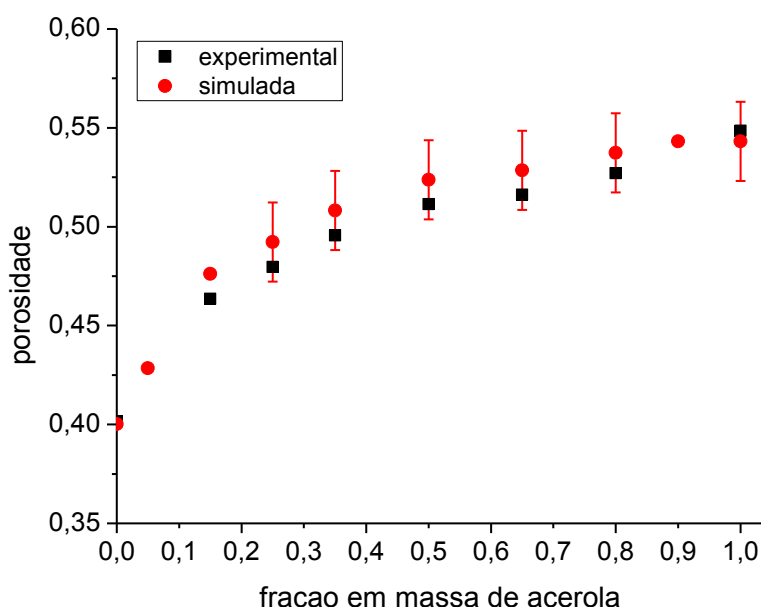


Figura 5.15 - Avaliação comparativa entre a porosidade de leito estático simulada e experimental, para diversas frações de acerola.

A Figura 5.16 explicita a porosidade simulada para diferentes composições de mistura em leito estático em diferentes alturas, isto é, frações em massa variando de 0 a 1. Os resultados apontam a redução da porosidade com o aumento da altura do leito estático, o que ocorre para todas as frações avaliadas. A razão para isto é que, quando se reduz a altura de leito estático, obtém-se a redução de seu diâmetro superior, deixando uma maior fração de vazios próximos à superfície do leito devido ao efeito de parede. Assim, a altura do leito estático é uma variável importante na previsão da velocidade de jorro mínima da mistura, uma vez que a diminuição da altura estática do leito aumenta a porosidade da mistura.

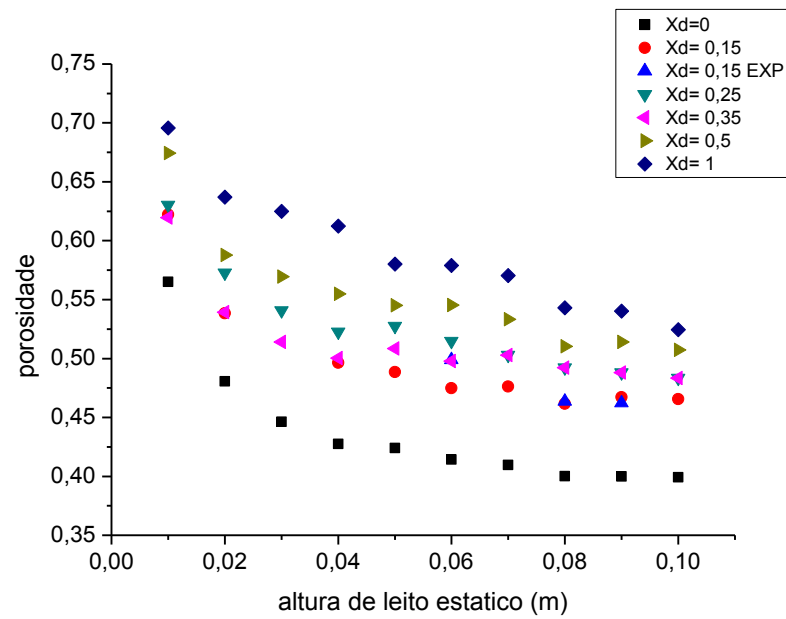


Figura 5.16 - Avaliação do efeito da altura de leito estático sobre a porosidade do leito constituído por diversas frações de acerola.

A Figura 5.17 explicita de modo qualitativo, por meio das imagens obtidas pelas simulações, as porosidades no leito estático em função das frações de acerola, conforme análise gráfica supracitada.

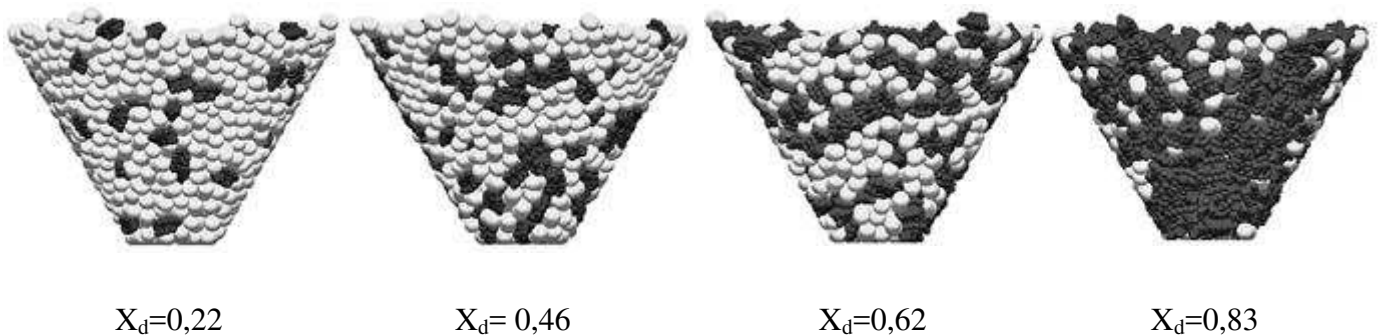


Figura 5.17 - Avaliação qualitativa do comportamento da porosidade frente a distintas frações de acerola.

Conclusões

Os significativos teores de vitamina C e de compostos bioativos, fenólicos e flavonoides, obtidos no resíduo de acerola corroboram com a proposição de aproveitamento de sementes de acerola na forma de farinha para enriquecimento nutricional de outros produtos. Aliado a esse fato, análises químicas nutricionais de sementes de acerola sugerem que o mesmo possui quantidades consideráveis de proteínas, lipídios e fibras, macro nutrientes essenciais ao organismo. Ressalta-se a importância dos macro nutrientes e dos compostos bioativos na prevenção de doenças.

O elevado teor de umidade obtido no resíduo justifica a realização de secagem, pois o mesmo poderia contribuir para a proliferação microbiana e reações químicas de degradação, reduzindo o tempo de vida útil da farinha.

Conclui-se que o uso de grãos de soja como material inerte na secagem de resíduos de acerola em leito de jorro somente foi possível devido às suas características físicas (elevada esfericidade e ângulos de repouso dinâmico e estático, menores que da semente de acerola). Características essas que contribuíram para o auxílio fluidodinâmico no leito, uma vez que o acréscimo de soja promoveu a redução da porosidade do leito, acarretando em alterações da queda de pressão e da vazão de mínimo jorro. Salienta-se que os grãos de soja possuem ainda a vantagem de serem atóxicos.

O tempo de secagem da mistura de resíduo de acerola e soja em leito de jorro (sem pré-tratamentos) mostrou-se satisfatório, para a maioria das condições experimentais adotadas. Obtiveram-se, para quase todos os tratamentos, sementes de acerola com teores de umidade menores que 15%, dentro dos padrões exigidos para farináceos. Entretanto, levando-se em consideração os teores nutricionais verifica-se que para a maioria das condições operacionais a secagem promoveu a redução dos teores de acidez e de fenólicos e, acréscimos na extração de ácido ascórbico e flavonoides. Portanto, os resultados obtidos sugerem que a desidratação altera a composição nutricional dos resíduos de acerola, no entanto, efeitos benéficos podem ser obtidos dependendo das condições operacionais adotadas. Dentre as condições favoráveis destaca-se o ensaio realizado com vazão de ar 7% acima do jorro mínimo, temperatura de 60°C e fração de acerola de 35% que resultou em extrações maiores de vitamina C e flavonoides e degradações pouco expressivas de fenólicos.

A partir de tratamentos prévios utilizando sonicação em meio aquoso conclui-se que o uso de ultrassom contribuiu para a redução de umidade do resíduo de acerola. Em

contrapartida, para todos os tempos e potência de sonicação avaliados obtiveram-se degradações dos teores de ácido ascórbico e de fenólicos.

A troca do meio de imersão de água para etanol mostrou-se favorável, sendo possível a redução do tempo de secagem em 25%, o que contribui para a viabilidade econômica, em termos de custos energéticos. Extrações maiores foram alcançadas na condição experimental de tempo de sonicação de 10 min, potência de 80 W e proporção de etanol de 2:1. Nessas condições a aplicação de ultrassom promoveu a liberação de ácido ascórbico, fenólicos e flavonoides, o que colabora para a sua implementação como pré-tratamento na desidratação de resíduos de acerola.

A pulverização de etanol, como pré-tratamento na secagem de sementes de acerola mostrou-se eficaz na redução de umidade, permitindo o uso de tempo de secagem de apenas 30 min, ou seja economicamente mais viável. Confrontando-se com os demais tratamentos, percebe-se que a pulverização de etanol foi o único tratamento que resultou em aumentos das extrações de ácido ascórbico, fenólicos e flavonoides. A utilização de planejamento central composto utilizando as variáveis independentes (temperatura, vazão de ar e volume de etanol) permitiu a obtenção de modelos significativos e preditivos do ponto de vista estatístico. Sendo assim foi possível obter as superfícies de respostas preditivas.

Através da superfície de resposta ajustada aos teores de vitamina C, verificou-se que a temperatura exerce efeito positivo, ou seja, acréscimos desse fator geram aumentos na extração de vitamina C. Infere-se também que apenas a interação entre a temperatura e o volume de etanol é estatisticamente significativa. Os resultados sugerem que a secagem à 60°C contribuiu para a extração de fenólicos. Ressalta-se que as variáveis temperatura, vazão de entrada de ar e volume de etanol, bem como suas interações exercem efeitos negativos sobre esse composto bioativo.

A desidratação precedida por pulverização de etanol acarretou para todos os tratamentos a desnaturação proteica das sementes de acerola. Observou-se que elevadas temperaturas associadas a altas vazões de ar contribuem para a desnaturação. Em contrapartida, o acréscimo de etanol durante a pulverização mostrou-se benéfico na conservação nutricional das sementes, quando se trata de proteínas.

A avaliação fluidodinâmica realizada através do índice de mistura aponta que o uso de pré-tratamentos, aplicação de ultrassom ou pulverização de etanol não exercem efeitos significativos sobre o índice de mistura. Desse modo, a segregação da mistura mantém-se ao longo do leito independentemente da utilização de tratamento prévio.

Com relação à análise morfológica realizada por meio de microscópio eletrônico de varredura, é possível inferir que o uso de ultrassom promoveu para determinadas condições experimentais alterações morfológicas na estrutura celular (trincas, rompimento celular, fraturas), o que pode ter contribuído para o aumento da taxa de secagem. Entretanto, as amostras pulverizadas por etanol não sofreram mudanças morfológicas visíveis.

Entre as variáveis que exercem efeitos sobre a fluidodinâmica no leito de jorro destacam-se os ângulos de repouso estático e dinâmico e a porosidade estática do leito. As parametrizações adotadas nas simulações numéricas para análise dos ângulos de repouso estático e dinâmico tanto do resíduo de acerola quanto da soja se revelaram satisfatórias, pois valores próximos aos experimentais foram obtidos para determinadas parametrizações.

A partir dos modelos preditivos obtidos foi possível avaliar os efeitos dos parâmetros e de suas interações sobre as respostas. Confrontados-se as simulações dos ângulos de repouso dinâmico para o resíduo de acerola e a soja, infere-se que desvios maiores foram obtidos para a soja. Ressalta-se que as simulações para a soja foram realizadas considerando-se apenas o modelo Hertz-Mindlin, o que pode ter contribuído para o aumento dos desvios. A partir dos estudos realizados conclui-se que, dentre os parâmetros avaliados, os coeficientes de atrito estático e de rolamento foram os que mais exerceram alterações sobre o ângulo de repouso dinâmico do resíduo de acerola e da soja. Os atritos contribuíram para a dissipação da energia cinética, na interação entre partícula/partículas e partícula/parede.

Efeitos positivos do coeficiente de atrito estático também foram obtidos sobre o ângulo de repouso estático do resíduo de acerola e da soja. Ressalta-se que o coeficiente de restituição não exerceu efeito estatístico significativo sobre essa resposta.

Entre os parâmetros que influenciam a fluidodinâmica de misturas binárias em leito de jorro, destaca-se a porosidade. A velocidade de mínimo jorro, variável precípua utilizada na modelagem e simulação do leito de jorro depende do grau de empacotamento do leito estático. Os resultados obtidos comprovam que a adição de soja a uma matriz composta por resíduo de acerola tende a reduzir a porosidade do leito estático.

Embora modelos distintos tenham sido utilizados na simulação do empacotamento do leito constituído apenas por resíduo de acerola e soja, os efeitos das variáveis independentes sobre a porosidade foram os mesmos. Entre os parâmetros avaliados o coeficiente de atrito estático destaca-se sobre a porosidade do leito, sendo seu efeito positivo. Em contrapartida, acréscimos do coeficiente de restituição ocasionam decréscimos da porosidade no leito.

Através das simulações realizadas constatou-se que a representação esférica das partículas mostrou-se viável na análise dos ângulos de repouso estático e dinâmico e da porosidade de leito estático, com a vantagem do menor esforço computacional.

Em síntese, o estudo fluidodinâmico das propriedades físicas das partículas contribuiu de modo satisfatório no esclarecimento de problemas correlacionados à instabilidade no leito de modo a evitar transtornos durante a desidratação.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Perante os benefícios nutricionais presentes nos resíduos de acerola, aliado ao considerável volume de resíduos gerados pelo processamento desse fruto e de outros, o presente trabalho poderá ainda ter continuidade em diversos segmentos. Dentre as sugestões para trabalhos futuros destacam-se:

- Avaliar os teores de compostos bioativos pela técnica de cromatografia líquida de alta eficiência, o que poderia colaborar na quantificação e na identificação de um maior número de compostos;
- Realizar a secagem utilizando a pulverização de etanol dentro do leito de jorro, visando à redução do tempo de secagem convectiva e dos custos operacionais sem comprometer a composição nutricional do alimento;
- Realizar a secagem de outros resíduos sólidos provenientes do processamento de frutas, visando comprovar a metodologia utilizada nesse trabalho e contribuir para o aproveitamento de resíduos sólidos;
- Investigar experimentalmente possíveis alterações acarretadas pela secagem às variáveis, ângulo de repouso e porosidade do leito estático.
- Desenvolver estudos mais detalhados envolvendo a fluidodinâmica de secagem de mistura constituída por resíduos de acerola e soja em leito de jorro. Modelagens do leito envolvendo os materiais granulares e o fluido, ou seja utilizando os softwares FLUENT e EDEM.

Referências Bibliográficas

- AACC. The definition of dietary fiber. **Cereal Foods World**, v.46, n.3, p. 112-126, 2001.
Disponível em <http://www.aaccnet.org>. Acesso em janeiro de 2015.
- AADIL, R. M. et al. Effects of ultrasound treatments on quality of grapefruit juice. **Food Chemistry**, v. 141, n. 3, p. 3201-3206, dez 2013.
- ABUD, A. K.S.; NARAIN N. Incorporação da farinha de resíduo do processamento de polpa de fruta em biscoitos: uma alternativa de combate ao desperdício. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 12, n. 4, p. 257-265, out./dez. 2009.
- _____. Ácido cítrico ou citrato de hidrogênio. **Revista Aditivos e Ingredientes**. n.76. março.2011.
- ASTN (Associação das Indústrias Processadoras de Frutos Tropicais); APEX (Programa Setorial Integrado de Promoção de Exportações de Sucos Tropicais). Brasília, 2001.
Disponível em: < <http://periodicos.ufpel.edu.br>>. Acesso em: 04 jan. 2015.
- AGOSTINI-COSTA, T. DA S.; ABREU, L. N. DE; ROSSETTI, A. G. Effect of freezing and storing time of pulp of acerola on the carotenoid contents. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, n. 1, p. 56-58, abr. 2003.
- AGUIAR, T. M. et al. Chemical characterization and evaluation of the nutritional value of *Malpighia puniceifolia* seeds. **Jornal Brazilian Society Food Nutrire**, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 91-102, ago. 2010.
- AJILA, K. L. Improvement of dietary fiber content and antioxidant properties in soft dough biscuits with the incorporation of mango peel powder. **Journal of Cereal Science**, n.2, p. 319-326, 2008.
- ALDRIGUE, M. L. **Aspectos da Ciência e Tecnologia de Alimentos e Nutrição**. João Pessoa: Editora UFPB, v. 1, p.198, 2002.
- ALMEIDA E. M et al. Extração de antioxidantes de resíduos agroindustriais de acerola . **Braz. J. Food Technology**, v. 12, n. 2, p. 155-160, abr./jun. 2009
- ALMEIDA, J.I.L.; LOPES, J.G.V.; OLIVEIRA, F.M.M. **Produtor de acerola**. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, Instituto Centro de Ensino Tecnológico, 2002. 40p.
- 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.

- ANGELO, P. M.; JORGE, N. Compostos fenólicos em alimentos: uma breve revisão. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 66, n. 1, p. 1-9, abr. 2007.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA. Santa Cruz: Editora Gazetra Santa Cruz, 2013. Disponível em: <http://www.grupogaz.com.br>. Acesso em: 4 dez. 2014.
- ARAÚJO, P.S.R de; MINAMI, K. **Acerola**. Campinas: Fundação Cargill, 81p, 1994.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS - AOAC. Official methods of analysis. 16 ed. AOAC, Washington, DC, 1995.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2001.
- BHARADWAJ, R; KETTERHAGEN, W. R.; HANCOCK, B. C. Discrete element simulation study of a Freeman powder rheometer. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 21, p. 5747-5756, nov. 2010.
- BOBBIO, A. P.; BOBBIO, F. O. **Química do processamento de alimentos**. Sao Paulo: Livraria Varela, 2 ed.,1992.
- BORGES, K. C. **Estudo das características físico-químicas e funcionalidade de bagaços de frutas tropicais desidratados em leito de jorro**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011, 153p.
- BORTOLOTTI, C. T. **Estudo experimental da fluidodinâmica de uma mistura de resíduo de acerola e soja em leito de jorro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2012, 120p.
- BOX, G.E.P.; WETZ, J. **Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function**. University of Wisconsin Technical Report, n.9, 1973.
- BRAGA, A. C. D. et al. Caracterização e obtenção de farinha do resíduo gerado no processo industrial de clarificação do suco de acerola. **Revista Semiárido De Visu**, v. 1, n. 2, p.126–133, 28 dez. 2011.
- BRAGA, A. M. P. **Estudo da retenção de constituintes voláteis na secagem de abacaxi sob atmosfera modificada**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. 2007,129 p.
- BRAGA, A. M. P.; SILVA, M. A. Effect of ethanol on the drying kinetics and on the quality of pineapple slices. In: **International Drying Symposium**. Anais... Magdeburg: Dechema, 2010. p. 1492-1497.

- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria n.27. Regulamento técnico referente à informação nutricional complementar, 1998. Disponível em: <http://anvisa.gov.br>. Acesso em junho de 2015.
- BRILLIANTOV, N. V.; PÖSCHEL, T. Rolling friction of a viscous sphere on a hard plane. **Europhysics Letters**, v. 42, n.511, p.511-516, 1998.
- BRITO, J.G. et al. Propriedades físicas do cominho em pó comercializado nas feiras livres da Paraíba. **Revista Verde**, v.7, n.1, p. 206-211, 2012
- CAETANO, A. C. S. et al. Extração de antioxidantes de resíduos agroindustriais de acerola. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 12, n. 2, p. 155-160, abr./jun. 2009.
- CARVALHO, L.C.S. **Análise de modelos de coesão capilar para simulação de fluxo de materiais granulares aplicada ao manuseio do minério de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. 2013, 124p.
- CARVALHO, R. A. et al. **Análise econômica da produção de acerola no município de Tomé-Açu**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 21p.
- CECÍLIO, R. A. et al. Elaboração de zoneamento agroclimático da região nordeste para a cultura de acerola. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.4, n.3, p.26-32, julho/setembro 2009. Disponível em: <http://www.gvaa.com.br/revista>. Acesso em: 05 dez 2014.
- CERQUEIRA, F. M.; MEDEIROS, M. H. G. DE; AUGUSTO, O. Dietetic antioxidants: controversies and perspectives. **Química Nova**, v. 30, n. 2, p. 441-449, abr. 2007.
- CERQUEIRA, P. M. de et al. The pumpkin (*Cucurbita maxima*, L.) seed flour effect on the rat glucose and lipid metabolism. **Revista de Nutrição**, v. 21, n. 2, p. 129–136, abr. 2008.
- CHANG, C. H., et al. Comparisons on the Antioxidant Properties of Fresh, Freeze-Dried and Hot-Air-Dried Tomatoes. **Journal of Food Engineering**, v.77, p. 478-485, 2006.
- CHANTARO, P.; DEVAHASTIN, S.; CHIEWCHAN, N. Production of antioxidant highdietary fiber powder from carrot peels. **Food Science Technology**, v. 41, n.10, p.1987–1994, 2008.
- CHAVES, M. C. V; et al. Caracterização físico-química do suco de acerola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n.2, 2004.
- CHEN, J et al. Effects of different factors of ultrasound treatment on the extraction yield of the all-*trans*- β -carotene from citrus peels. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.18, n.1, p.243-249, January 2011.

- CHIOCCHETTI, G.M. **Potencial de utilização de subprodutos agroindustriais na alimentação: estudo da disponibilidade de nutrientes**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Centro de Energia Nuclear na Agricultura. 2013, 103p.
- CHOU, S.H. et al. An experimental study on the effect of liquid content and viscosity on particle segregation in a rotating drum, **Powder Technology**, v. 201, p. 266–272, 2010.
- CHAVES, M.C.V. Caracterização físico-química do suco da acerola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, n. 2, 2004.
- CLEARY, P. DEM prediction of industrial and geophysical particle flows, **Particuology**, v.8, p. 106-118, 2010.
- COMARELLA, C. G. et al. Phenolic compounds and sensory evaluation of juice from Isabel grapes treated with ultrasound. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, n.SPE, p. 69-73, maio 2012.
- CORRÊA, J. L. G. et al. The influence of ethanol on the convective drying of unripe, ripe and overripe bananas. **Drying Technology**, v.30, p.817-826, 2012.
- COSTA, M. G. M. et al. High-Intensity Ultrasound Processing of Pineapple Juice. **Food and Bioprocess Technology**, v. 6, n. 4, p. 997–1006, 1 abr. 2013.
- COURRECH DU PONT, S. et al. Granular Avalanches in Fluids. **Physical Review Letters**, v. 90, n. 4, p. 244-301, 28 jan. 2003.
- CUNDALL, P. A., STRACK, O. D. L. A discrete numerical model for granular assemblies. **Geotechnique**, v. 29, n. 1, p. 47- 65, 1979.
- D'ARCHIVIO, M. et al. Polyphenols, dietary sources and bioavailability. **Annali dell'Istituto Superiore Di Sanità**, v. 43, n. 4, p. 348-361, 2007.
- DANTAS, T. N. P. et al. Propriedades físicas e físico-químicas de pós de misturas de polpas de frutas com diferentes fontes lipídicas. In: **Congresso Brasileiro De Engenharia Química em Iniciação Científica**. 2009, Minas Gerais. Anais... Uberlândia: CBEQ - IC, 2009.
- DAVIES, M.B.; AUSTIN, J. e PARTRIDGE, D.A. Vitamin C: in chemistry and biochemistry. Cambridge: **Royal Society of Chemistry**. p.7-25 e 74-82, 1991.
- DEGASPARI, C. H.; WASZCZYNSKY, N. Propriedades antioxidantes de compostos fenólicos. **Visão Acadêmica**, v.5 , n. 1, p. 33-40, 2004.
- DEVIC, E. et al. Kinetics of polyphenol losses during soaking and drying of cider apples. **Food Bioprocess Technology**, v. 3, p. 867-877, 2010.

- DJENDOUBI, M. N. et al. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pears. **Food and bioproduct processing**, v. 90, p. 433-441, 2012.
- 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**, v.45, n. 2, p. 261–268 mar. 2012.
- DUARTE, C. R., **Estudo Experimental e de Simulação da Fluidodinâmica e Recobrimento em Leito de Jorro**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2006, 197p.
- DURY, C. M. et al. Boundary effects on the angle of repose in rotating cylinders. **Physical Review E**, v. 57, n. 4, p. 4491–4497, Abril 1998.
- DUZZIONI, A. G., LENTON, V. M., SILVA, D. I. S., BARROZO, M. A. S. Effect of drying kinetics on mais bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) residue. **International Journal of Food Science & Technology**, v.48, p. 1041-1047, 2013.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. Adubando para alta produtividade e qualidade, fruteiras tropicais do Brasil. Fortaleza: Embrapa Agroindustrial tropical, 2009.
- FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos**: Princípios e prática. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- FERNANDES, F. A. N.; OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES, S. Use of Ultrasound for Dehydration of Papayas. **Food and Bioprocess Technology**, v. 1, n. 4, p. 339–345, 1 dez. 2008.
- FERNANDES, F.; RODRIGUES, S. Ultrasound as Pre-Treatment for Drying of Genipap (*Genipa americana* L.). **International Journal of Food Engineering**, v.8, n.3, 2012.
- FERNANDES, F.A.N. et al. Improvement on functionality of dried cashew apples subjected to ultrasonic treatment. In: **19th International Drying Symposium**. France. Anais...Lyon, IDS, 2014. CD-ROM.
- FERNANDES, F.A.N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 261–267, 2007.
- FERREIRA, M.F.P; PENA R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, n.1, p.15–28, 2010.

- FORNARO A. e COICHEV N. Ácido l-ascórbico: reações de complexação e de óxido-redução com alguns íons metálicos de transição. **Revista Química Nova**, v.5, p.21, 1998.
- FREITAS, L. A. P.; FREIRE, J. T. Heat transfer in a draft tube spouted bed with bottom solids feed. **Powder Technology**, v. 114, n. 1-3, p. 152-162, 15 jan. 2001.
- FREITAS, C. A. S. et al. Acerola: produção, composição, aspectos nutricionais e produtos. **Revista Brasileira Agrociência**, v. 12, n. 4, p. 395-400, out-dez, 2006.
- FUENTE-BLANCO, S. DE LA *et al.* Food drying process by power ultrasound. **Ultrasonics. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU)**, v. 44, Supplement, p. e523–e52722 dez. 2006.
- GAMBOA-SANTOS, J. et al. Vitamin C content and sensorial properties of dehydrated carrots blanched conventionally or by ultrasound. **Food Chemistry**, v. 136, n. 2, p. 782–788, 15 jan. 2013.
- GANESAN, V.; ROSENTRATER, K.A.; MUTHUKUMARAPPAN, K. Flowability and handling characteristics of bulk solids and powders- a review with implications for DDGS. **Biosystems Engineering**, v.101, p.425-435, 2008.
- GARCÍA-PÉREZ, J. V. *et al.* Ultrasonic drying of foodstuff in a fluidized bed: Parametric study. **Ultrasonics. Proceedings of Ultrasonics International (UI'05) and World Congress on Ultrasonics (WCU)**, v. 44, Supplement, p. e539–e543, 22 dez. 2006.
- GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. [s.l.] NBL Editora, 1978.
- GIUNTINI, E. B.; LAJOLO, F. M.; MENEZES, E. W. DE. Potencial de fibra alimentar em países ibero-americanos: alimentos, produtos e resíduos. **Archivos Latino Americanos de Nutrición**, v. 53, n. 1, p. 14–20, mar. 2003.
- GONZE, E. et al. Wastewater pretreatment with ultrasonic irradiation to reduce toxicity. **Chemical Engineering Journal**, v. 73, n. 2, p. 93-100, May 1999.
- GRIMA, A. P.; WYPYCH, P. W. Investigation into calibration of discrete element model parameters for scale-up and validation of particle-structure iterations under impact conditions. **Powder Technology**, v. 212, n. 1, pp. 198-209, Sept., 2011.
- HAARD, N.F.; CHISM, G.W. Characteristics of edible plant tissues. In: DAMODARAN, S. *Fennema's food chemistry*. New York: Marcel Dekker, 1996. p.943-1011.
- HARBORNE JB, BAXTER H, MOSS GP, editores. **Phytochemical dictionary: handbook of bioactive compounds from plants**. 2 ed. London: Taylor & Francis; 1999.
- HATHCOCK, J. N. Vitamins and minerals: efficacy and safety. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 66, n. 2, p. 427-437, 1 ago. 1997.

- HILL, K. M.; CAPRIHAN, A.; KAKALIOS, J. Axial segregation of granular media rotated in a drum mixer: Pattern evolution. **Physical Review E**, v. 56, n. 4, p. 4386–4393, Outubro 1997.
- HOLLMAN, P. C.; KATAN, M. B. Dietary flavonoids: intake, health effects and bioavailability. **Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association**, v. 37, n. 9-10, p. 937-942, out. 1999.
- IBGE de 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em: 10 de jan de 2015.
- IBRAF. Produção de frutas no Brasil. Disponível em: <http://www.ibraf.org.br>. Acesso em: 5 dez, 2014.
- INSTITUTE OF MEDICINE. **Dietary reference intakes**. Whashington: National Academy, 2000.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3 ed. São Paulo, 1985, v.1, 533p.
- INSTITUTE OF MEDICINE (IOM). Dietary Reference Intakes: applications in dietary assessment. Washington DC; 2000. 306p Disponível em: <http://iom.edu/Activities/Nutrition/SummaryDRIs>. Acesso em janeiro 2015.
- ISHIKURA, T. NAGASHIMA, H. IDE, M. Hydrodynamics of spouted bed with a porous draft tube containing a small amount of finer particles. **Powder Technology**, v.131, p.56-65, 2003.
- JACOB, R. A.; BURRI, B. Oxidative damage and defense. **American Journal of Clinical Nutrition**, v. 63, n. 6, p. 985-990, 1996.
- JESUS M. F. et al. Produção de passas de acerola em secador de bandeja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.5, n.1, p.81-87, 2003.
- JIN, X. et al. A review of degradation kinetics of nutritional components during drying of fresh foods. In: **19th International Drying Symposium**. France. Anais...Lyon, IDS, 2014. CD-ROM.
- JOHNSON, K. L; KENDALL, K; ROBERTS, A. D. Surface Energy and the Contact of Elastic Solid. **The Royal Society**, v.324, n.1558, p. 301-313, Sept. 1971.
- JOHNSTONE, M. W. **Calibration of DEM models for granular materials using bulk physical tests**. Ph.D. Thesis (Doctor of Philosophy). University of Edinburgh. 2010. 242 p.

- JONG, J.A.H.; HOFFMANN, A.C.; FINKERS, H.J. Properly determine powder flowability to maximize plant output. **Chem. Eng. Progress**. Powder flowability, v. 95, n.4, abril, 1999.
- JÚNIOR, J. E. L. et al. Caracterização físico-química de subprodutos obtidos do processamento de frutas tropicais visando seu aproveitamento na alimentação animal. **Revista Ciência Agronômica**, v. 37, n. 1, p. 70–76, 19 nov. 2006.
- KAUR, C.; KAPOOR, H. C. Antioxidants in fruits and vegetables- the millennium's health. **International Journal Food Science Technology**, v. 36, n. 7, p. 703-725, 2001.
- KNORR, D. et al. Applications and potential of ultrasonics in food processing. Trends in Food Science & Technology, v. 15, n. 5, p. 261–266, Maio 2004.
- KRAUSE, M.V.; MAHAN, L.K. Alimentos, nutrição e dietoterapia. 11a. ed. São Paulo: Livraria Roca. 2005, 981p.
- KRINSKY, N. I. Effects of carotenoids in cellular and animal systems. **The American Journal of Clinical Nutrition**, v. 53, n. 1, p. 238S-246S, 1 jan. 1991.
- LEITE, J.B.; MANCINI, M.C.; BORGES, S.V. Effect of drying temperature on the quality of dried bananas cv. prata and d'água. **Technology**, v. 40, n. 2, p.319-323, 2007
- LELAS, V. et al. Accelerated drying of button mushrooms, Brussels sprouts and cauliflower by applying power ultrasound and its rehydration properties. **Journal of Food Engineering**, v.81, p.88-97, 2006.
- LEONELLI, C.; MASON, T. J. Microwave and ultrasonic processing: Now a realistic option for industry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v.49, n. 9, p. 885-900, set. 2010.
- LI, B.B.; SMITH, B.; HOSSAIN, M. Extraction of phenolics from citrus peels II. Enzyme assisted extraction method. **Separation and Purification Technology**, v.48, p.189-196, 2006.
- LIMA, M.F.M. et al. Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leite de jorro. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. Anais...UNICAMP, 2000a.
- LIMA, V. L. A. G. et al. Flavonoids in acerola (*Malpighia sp L.*) selections. 1- Anthocyanins and flavonols content. **Ciência Rural**, v. 30, n. 6, p. 1063–1068, dez. 2000b.
- LIMA, V.L.A.; MÉLO, E.A.; MACIEL, M.I.S. et al. Avaliação do teor de antocianinas em polpa de acerola congelada proveniente de frutos de 12 diferentes aceroleiras (*Malpighia emarginata* D. C.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.23, n.1, p.101-103, 2003.

- LOPEZ, J. et al. Effect of air temperature on drying kinetics, vitamin C, antioxidant activity, total phenolic content, non-enzymatic browning and firmness of blueberries variety O'Neil. **Food Bioprocess Technology**, v.3, n.5, p. 772–777, 2010.
- LOURENÇO, R. O. **Identificação e monitoramento de regimes em leito de jorro convencional**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2006, 62p.
- LOUSADA, J.E.J. et al. Caracterização físico-química de subprodutos obtidos do processamento de frutas tropicais visando seu aproveitamento na alimentação animal. **Revista Ciência Agronômica**, v.37, n.1, p.70-76, 2006.
- LUMAY, G. et al. Measuring the flowing properties of powders and grains. **Powder Technology**, v. 224, p.19-27, 2012.
- LURIE, S. et al. Modified ethanol atmosphere to control decay of table grapes during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 42, n. 3, p. 222-227, 2006.
- M'HIRI, N. et al. Effect of air drying temperature on individual phenolic compounds and antioxidant activity kinetics of orange peel In: **19th International Drying Symposium**. France. Anais...Lyon, IDS, 2014. CD-ROM.
- MAMEDE, M.E.O.; PASTORE, G.M. **Compostos Fenólicos do Vinho: Estrutura e Ação Antioxidante**. Curitiba: Boletim CEPPA, v.22, p.233-252, 2004.
- MARTINEZ, O.L.A.; BRENNAM, J.G.; NIRAJAM, K. Estudio del secado de alimentos en um secador de fuente com partículas inertes. In: Congresso Ibero-americano de Alimentos. Anais...UNICAMP, 1995, p.72-81.
- MARZZOCO, A.; TORRES, B .B. **Bioquímica básica**. 3ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2007.
- MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. New York: Academic Press Inc. LTD, 304p, 1974.
- MATSUURA, F. C. A. U. et al Avaliações físico-químicas em frutos de diferentes genótipos de acerola (*Malpighia puniceifolia* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 23, n. 3, p. 602-606, 2001.
- MEDEIROS, M. F. D et al. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**, v.20, p. 855–881, 2002.
- MEDEIROS, F D. et al. Flowability of inert particle beds with fruit pulp: effects on the drying in spouted bed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 3, p. 475–480, dez. 2001.

- MELO, E. A. et al. Capacidade antioxidante de frutas. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v.44, n.2, Apr./June 2008.
- MENDES, B. A. B.. Obtenção, caracterização e aplicação de farinha das cascas de abacaxi e de manga. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. 2013, 77p.
- MERKEN, H. M.; BEECHER, G. R. Measurement of food flavonoids by high-performance liquid chromatography: A review. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.48, n. 3, p. 577-599, mar. 2000.
- MERTENS, D.R. Análise da fibra e sua utilização na avaliação de alimentos e formulação de rações. In: **Simpósio Internacional de Ruminantes**. Anais...SBZ-ESAL, 188, MG.,1992.
- MESQUITA A.L.A. et al. Uso do método dos elementos discretos em manuseio de minérios e sua contribuição para a pós-graduação e graduação no curso de engenharia mecânica da UFPA. In: **XL CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA**, Anais....2012.
- MINDLIN, R. D., 1949, Compliance of elastic bodies in contact. **Journal of Applied Mechanics**, v. 16, p.259-268, 1949.
- MINDLIN, R. D.; DERESIEWICZ, H..Elastic spheres in contact under varying oblique forces. **ASME**, p. 327-344, 1953.
- MONTEIRO et al. Curva de secagem do mesocarpo do maracujá amarelo. **Revista Ceciliana**, v.2, n.1,p. 42-44, Junho, 2010.
- MOREIRA, A. V. B.; MANCINI-FILHO, J. Influência dos compostos fenólicos de especiarias sobre a lipoperoxidação e o perfil lipídico de ratos. **Revista de nutrição**, [S.l], v.17, n. 4, p. 411-24, 2004
- MOREIRA, G. E. G. **Obtenção e caracterização de extrato microencapsulado de resíduo Agroindustrial de acerola**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2007, 86p.
- MORTOLA, V. B. et al. Análise das condições de secagem de cebola em pasta e gelatina em leite de jorro. **XVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica Engenharia de Alimentos**, Anais...,2003.
- NACZK, M.; SHAHIDI, F. Extraction and analysis of phenolics in food. **Journal of Chromatography A**, Food Science. v. 1054, n. 1-2, p. 95-111, Outubro 2004.

- 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, n. 6, p. 674-677, dez. 2010.
- NAKASHIMA, H. *et al.* Determining the angle of repose of sand under low-gravity conditions using discrete element method. **Journal of Terramechanics**, v. 48, n. 1, p.17–26, fev. 2011.
- NASATO, D. S. **Desenvolvimento de acoplamento numérico entre o método dos elementos discretos (DEM) e o método dos elementos Finitos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Campinas. 2011, 94p.
- NASCIMENTO, E. L. et al. Aplicação do método de elementos discretos na análise de estabilidade de taludes. **CMNE/CILAMCE**, 2007
- NASCIMENTO, L. C. DO et al. Ozônio e ultra-som: processos alternativos para o tratamento do café despulpado. **Food Science and Technology**, v. 28, n. 2, p. 282–294, jun. 2008.
- NETO, F. T. **Nutrição clínica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003.
- NETZEL, M. et al. Cancer cell antiproliferation activity and metabolism of black carrot anthocyanins. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, 4th International Congress on Pigments in Food: Pigments in Food - A Challenge to Life Sciences. v. 8, n. 3, p. 365–372, Setembro 2007.
- NUÑEZ-MANCILLA, Y. et al. Osmotic dehydration under high hydrostatic pressure: Effects on antioxidant activity, total phenolics compounds, vitamin C and colour of strawberry (*Fragaria vesca*). **LWT - Food Science and Technology**, v. 52, n. 2, p. 151-156, jul. 2013.
- OLIVEIRA, F. I. P. et al. Dehydration of Malay Apple (*Syzygium malaccense* L.) Using Ultrasound as Pre-treatment. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 4, p. 610-615, 1 maio 2011.
- OLIVEIRA, F. I.P. **Estudo do processo de produção de jambo desidratado sob aplicação de ultra-som**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. 2010, 96 p.
- OLIVEIRA, M. E. B. DE et al. Physico chemical parameters evaluation of acerola, yellow mombin and cashew apple frozen pulps. **Food Science and Technology**, v. 19, n. 3, p. 326–332, dez. 1999.
- OLIVEIRA, M. L. N. **Estudo experimental das solubilidades de alguns ácidos em misturas hidro-alcoólicas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2009, 340p.

- OPIE, L.H.; LECOUR, S. The red wine hypothesis: from concepts to protective signalling molecules. **European Heart Journal**, v.28, p.1683-1693, 2007.
- OTTINO, J. M.; KHAKHAR, D. V. Mixing and segregation of granular materials. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 32, p. 55–91, 2002.
- OZGUR, M., OZCAN, T., AKPINAR-BAYIZIT, YILMAZ-ERSAN, L. Functional compounds and antioxidant properties of dried green and red peppers. **African Journal of Agricultural Research**, v.6 , p.5638-5644, 2011.
- PALLAI-VARSÁNYI, E.; TÓTH, J.; GYENIS, J. Drying of suspensions and solutions on inert particle surface in mechanically spouted bed dryer. **China Particuology**, v. 5, n. 5, p. 337–344, Outubro 2007.
- 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.
- PELLEGRINI, N. et al. Evaluation of antioxidant capacity of some fruit and vegetable foods: efficiency of extraction of a sequence of solvents. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 87, n. 1, p. 103-111, 2007.
- PENTEADO, Marilene de Vuono Cargo. **Vitaminas: aspectos nutricionais, bioquímicos, clínicos e analíticos**. São Paulo: Manole, 2003.
- PEREIRA, C. T. M. Obtenção, caracterização físico-química e avaliação da capacidade antioxidante *in vitro* da farinha de resíduo de acerola (*Malpighia Glabra L.*). **Acta Tecnológica**, v. 8, n. 2, p. 50-56, 28 fev. 2014.
- PHILIPP, S. T. **Pirâmide dos Alimentos: Fundamentos básicos da nutrição**. Barueri: Manole, 2008.
- PIMENTEL, C. V. M. B.; FRANCKI, V. M.; GOLLÜCKE, A. P. B. **Alimentos funcionais: introdução as principais substâncias bioativas em alimentos**. São Paulo: Ed. Varela, 2005. 95 p
- PINGRET, D.; FABIANO-TIXIER, A.-S.; CHEMAT, F. Degradation during application of ultrasound in food processing: A review. **Food Control**, v. 31, n. 2, p. 593–606, jun. 2013.
- PODSEDEK, A. Natural Antioxidants and Antioxidant Capacity of Brassica Vegetables: A review. **LWT: Journal of Food Composition and Analysis**, 40, p.1-11, 2007.
- POKHARKAR, S. M.; PRASAD, S.; DAS, H. A model for osmotic concentration of banana slices. **Journal of food science and technology**, 1997. v. 34, n. 3, p. 230–232.

- POZITANO, M.; ROCHA, S.C.S. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE *Senna macranthera*. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 33, n.4, p.777 - 784, 2011
- RAMARATHNAM, N et al. The contribution of plant food antioxidants to human health. **Trends in Food Science & Technology**, v.6, n.3, p.75-82, March 1995.
- RAMIREZ, C. et al. Microstructure analysis on pre-treated apple slices and its effect on water release during air drying. **Journal Food Engineering**, v.106, n.3, p. 253–261, 2011.
- RESOLUÇÃO RDC N. 360 DE 23 DE DEZEMBRO DE 2003, DA ANVISA. Disponível em: <http://portal.anvisa.gov.br>. Acesso em: 22 de maio 2015.
- _____. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.1, p.15-28, 2010.
- RICE-EVANS, C.; MILLER, N.; PAGANGA, G. Antioxidant properties of phenolic compounds. **Trends in Plant Science**, v. 2, n. 4, p. 152-159, Abril 1997.
- RITZINGER, R.;RITZINGER, C.H.S.P. Informe Agropecuário. Belo Horizonte, v.32, n.264, p.17-25, set/out, 2011.
- RODRIGUES, S. et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 89, n. 4, p. 665–670, 2009.
- RODRIGUES, S. et al. Evaluation of vitamin preservation and availability on ultrasound-assisted air drying of apples (royal gala var.) In: **19th International Drying Symposium**. France. Anais...Lyon, IDS, 2014. CD-ROM.
- RODRÍGUEZ, Ó. et al. Influence of power ultrasound application on drying kinetics of apple and its antioxidant and microstructural properties. **Journal of Food Engineering**, v. 129, p. 21–29, Maio 2014.
- ROIG, M. G.; RIVERA, Z. S.; KENNEDY, J. G. L. Ascorbic acid: an overview, **International Journal of Food Science and Nutrition**, v. 44, p. 59-72, 1993.
- ROMERO J., C. A.; YÉPEZ V., B. D. Ultrasound as pretreatment to convective drying of Andean blackberry (*Rubus glaucus* Benth). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 22, p. 205–210, jan. 2015.
- RUDOLF, J. L.; RESURRECCION, A. V. A. Optimization of trans-Resveratrol Concentration and Sensory Properties of Peanut Kernels by Slicing and Ultrasound Treatment, Using Response Surface Methodology. **Journal of Food Science**, v. 72, n. 7, p. S450–S462, 2007.

- RUFINO, M.S.M. **Propriedades funcionais de frutas tropicais brasileiras não tradicionais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. 2008, 237p.
- SALINAS, R.D. Alimento e Nutrição: Introdução a Bromatologia. In:____. Alimentos e vegetais. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2002. P.164-181.
- SANTANA, M.F.S. **Caracterização físico-química de fibra alimentar de laranja e maracujá**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas. 2005, 168p.
- SANTOS, E. G. Análise da forma da partícula na aplicação do Método dos Elementos Discretos (DEM). Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará. 2013, 126p.
- SANTOS, E. G. et al.. Análise da forma geométrica da partícula na aplicação do método dos elementos discretos - DEM. In: **VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Anais....São Luis, 2012
- 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, 261p.
- SANTOS, K. O. et al. **Obtenção de farinha com o resíduo de acerola (*Malpighia Glabra* L.)**. In: Congresso de pesquisa e Inovação da rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, Anais.....,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.
- SCHULZE, D. Flow Properties of Powders and Bulk Solids. Disponível em: www.dietmar-schulze.de/grdle1.pdf. Acesso em: setembro 2014.
- SCHULZE, D. Powders and Bulk solids: behavior, characterization, storage and Flow. Germany, Springer, 2007
- SCHWEDES, J. Measurement of low properties of bulk solids. **Powder Technology**, v. 88, p. 285–290, 1996.
- SENA, R. F.; NUNES, M. L. Utilização de resíduos agroindustriais no processamento de rações destinadas ao camarão “*Penaeus vannamei*”. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 7, n. 2, 26 mar. 2007.
- SHAHIDI, F.; NACZK, M. **Food Phenolics- Sources, Chemistry, Effect, Applications**. Pennsylvania: Technomic. 1995. p. 321.
- SILVA, D.J. **Análises de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2004. 235p.

- SILVA F. S. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, n.1, p.17-23, 2006.
- SILVA, F S. **Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 2003, 127p.
- SILVA, I. F. B. et al. Elaboração de biscoitos tipo cookies com farinha de resíduos do processamento de polpa de acerola. In: **Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia**. Anais...UEPB, 2012.
- 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. 2000, p.21-37.
- SILVA, P.B. **Secagem de resíduos de frutas em Secador roto-aerado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. 2014, 107p.
- SILVA, V. M.; VIOTTO, L. A. Drying of sicilian lemon residue: influence of process variables on the evaluation of the dietary fiber produced. **Food Science and Technology**, v. 30, n. 2, p. 421–428, jun. 2010.
- SILVA, D.I.S. **Estudo da transferência de calor e massa na secagem em leito fixo visando o aproveitamento de resíduo de acerola (*malpighia emarginata* dc)**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 2015, 252p.
- SILVÉRIO, B.C. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores rotatórios**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. 2012, 192p.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 3, p. 144–158, 1 jan. 1965.
- SOARES, M. et al. Compostos fenólicos e atividade antioxidante da casca de Uvas Niágara e Isabel. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 30, n. 1, p. 059-064, Março 2008.
- SOBRINHO I.S. B. **Propriedades nutricionais e funcionais de resíduos de abacaxi, acerola e cajá oriundos da indústria produtora de polpas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. 2014, 166p.
- SOTERRONI, A. C. **Simulação e análise da dinâmica de fluidos granulares**. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada. Instituto Nacional em Pesquisas Espaciais. 2007, 133p.

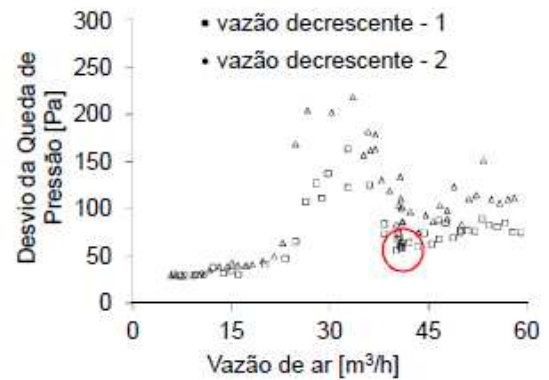
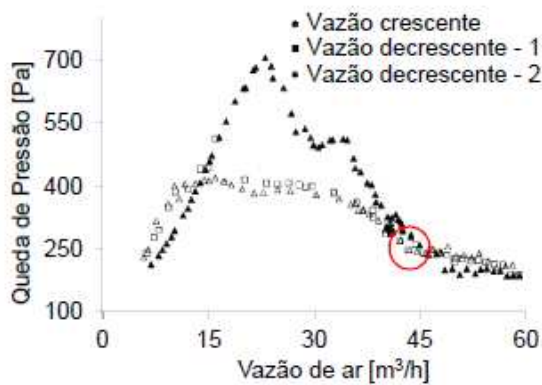
- SOUSA, M. S. B. et al. Nutritional characterization and antioxidant compounds in pulp residues of tropical fruits. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 3, p. 554–559, jun. 2011(a).
- SOUSA, M. S. B.; VIEIRA, L. M.; LIMA, A. DE. Total phenolics and in vitro antioxidant capacity of tropical fruit pulp wastes. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 14, n. 3, p. 202–210, set. 2011(b).
- SOUZA F. E. et al. Efeito das condições de processo na secagem de mistura de polpas de frutas utilizando um planejamento fatorial completo. In: **XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**, Anais... ENEMP, 2009.
- SOUZA, F. P. de; CAMPOS, G. R.; PACKER, J. F. Determinação da atividade fotoprotetora e antioxidante em emulsões contendo extrato de *Malpighia glabra* L.-Acerola. **Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada**, v. 34, n. 1, p. 69–77, 13 abr. 2013.
- SOUZA, J. S. **Secagem de misturas de polpa de frutas tropicais em leite de jorro**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009, 155p.
- SPIVAKOVSKAYA, D.; HEEMINK, A. W.; SCHOENMAKERS, J.G. M. Two-particle models for the estimation of the mean and standard deviation of concentrations in coastal waters. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 21, p. 235–251, 2007.
- SUSLICK, K. S. 1.41 - Sonochemistry. In: MEYER, J. A. M. J. (Ed.). **Comprehensive Coordination Chemistry II**. Oxford: Pergamon, 2003. p. 731–739.
- TANAKA L. D. **Influência da desidratação por spray drying sobre o teor ácido ascórbico no suco de acerola (malpighia ssp)**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista “Professor Júlio de Mesquita Filho”. 2007, 73p.
- TARLETON, E.S.; WAKEMAN, R.J. Ultrasonically assisted separation process. In: Povey, M.J.W.; Mason, T.J. (Eds.). **Ultrasounds in Food Processing**. Blackie Academic and Professional, Glasgow, 1998.
- TATE e LYLE. Dossiê: Fibras Alimentares, **Food Ingredients Brasil**, n.3, 2008.
- TIWARI, B.K. et al. Anthocyanin and ascorbic acid degradation in sonicated strawberry juice. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 56, p. 10071-10077, 2008.
- TORREGGIANI, D. Osmotic dehydration in fruit and vegetable processing. **Food Research International**, v. 26, n. 1, p. 59-68, 1993.
- TOSATO, P.G. **Influência do etanol na secagem de maçã Fuji**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras. 2012, 158p.

- TULEY, Robert James. **Modelling Dry Powder Inhaler Operation with the Discrete Element Method**. Phd. Thesis (Phd. in Mechanical Engineering), Department of Mechanical Engineering, Imperial College, London. 2007. 167 p.
- UENOJO, M. et al. Carotenoids: properties, applications and biotransformation in flavor compounds. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 616–622, jun. 2007.
- USDA. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *National Nutrient Database for Standard*. Release 14, julho 2001. Disponível em: <http://www.nal.usda.gov>. Acesso em jan 2015.
- VASCONCELOS, V. R. Utilização de Subprodutos do Processamento de Frutas na Alimentação de Caprinos e Ovinos. In: **Seminário Nordeste de Pecuária – Pecnordeste**, Anais... FAEC, p. 83-99, Fortaleza, 2002.
- VIEIRA, C. R.; CABRAL, L. C.; PAULA, A. C. O. De. Proximate composition and amino acid, fatty acid and mineral contents of six soybean cultivars for human consumption. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 7, p. 1277–1283, jul. 1999.
- WOLK, F. **Three-dimensional Lagrangian Tracer Modelling in Wadden Sea Areas**. Diploma Thesis: University Oldenburg, 2003.
- YOUNES, G., HATAMIPOU, S. M.; RAHIMI A..Experimental and parametric study on drying of green peas in spouted bed. **International Journal of Food Science and Technology**, v.45,p.2546-2552, 2010.
- YOUSEF, A. E; KIM, J. G.; DAVE, S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. **Journal of Food Protection**, v.62, p. 1071-1087, 1999.
- YU, A.B.; ZOU, R.P. STANDISH, N. Modifying tyhe llinear packing model for predicting the porosity of non-spherical particle mixtures. **Ind. Eng. Chem. Res**, v.35, p.3730-3741, 1996.
- YU, D.; DAHEGREN, R.A. Evaluation of methods for measuring polyphenol in coniter foliage. **Journal Ecology**, v.26, p. 2119-2140, 2000.
- ZAMBIAZI, R.C. **Análise Físico Química de Alimentos**. Pelotas: Editora Universitária/UFPEL, 202p. 2010. SAS Institute. System for Information, versão 8.0. Cary, 2007.
- ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The determination of flavonoid contentes in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. **Food Chemistry**, v.64, p.555-559, 1999.

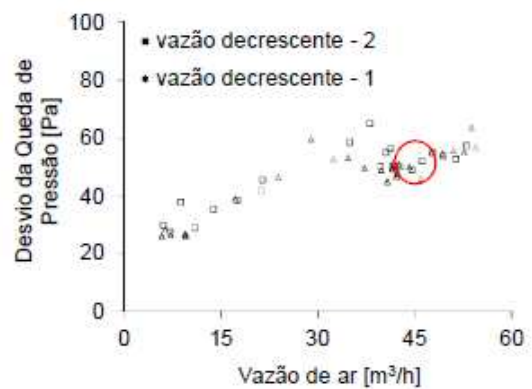
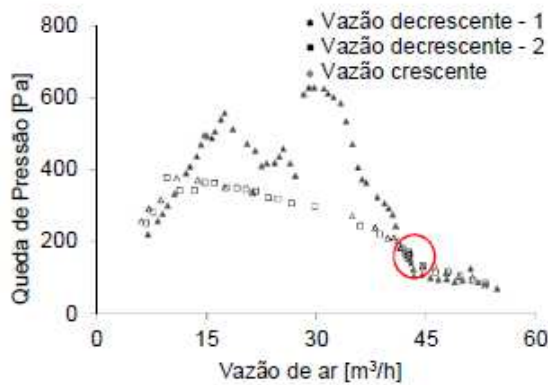
- ZHOU, Y. C. et al. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres. **Powder Technology**, v. 125, n. 1, p. 45–54, Maio 2002.
- ZHU, H.P., ZHOU, Z.Y., YANG, R.Y., YU, A.B. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings. **Chemical Engineering Science**, V.63, p. 5728-5770, 2008.

Apêndices

Anexo 1

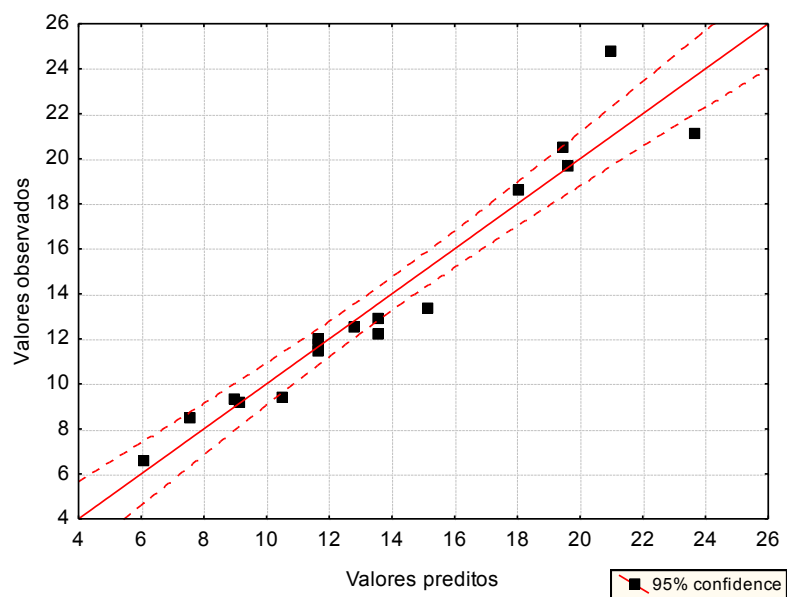


Curva característica da relação vazão de ar e queda de pressão para a altura de leito estático de 8cm e fração de sementes de acerola de 35%.



Curva característica da relação vazão de ar e queda de pressão para a altura de leito estático de 8cm e fração de sementes de acerola de 50%.

Anexo 2



Valores preditos versus valores observados para a unidade resultante da desidratação precedida por pulverização de etanol

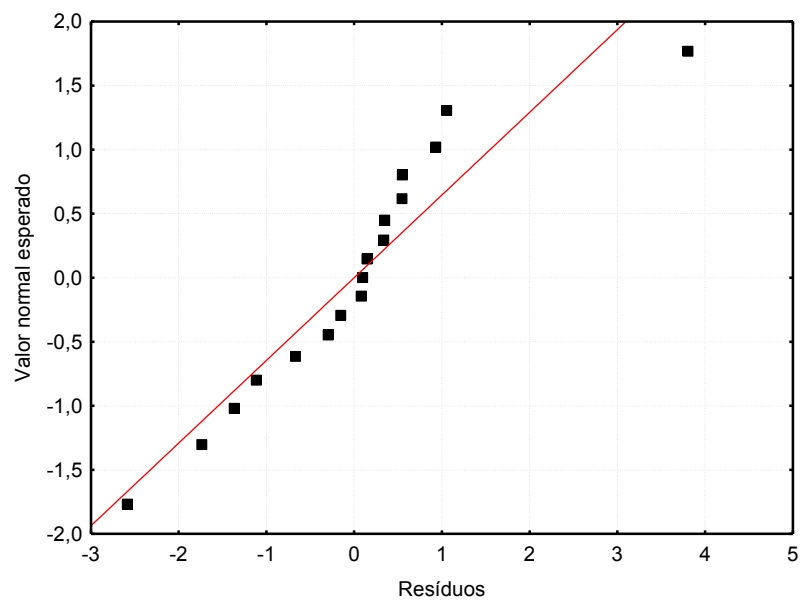
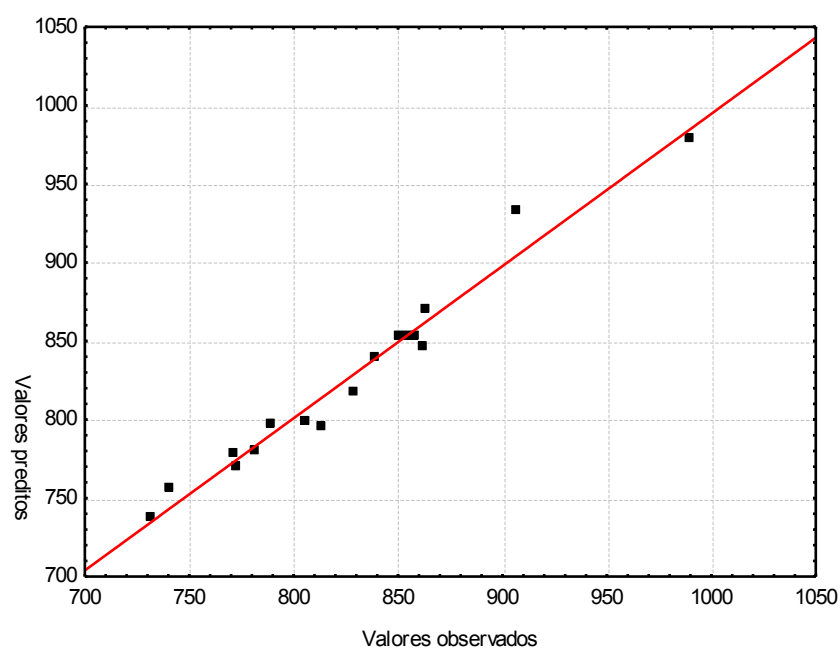
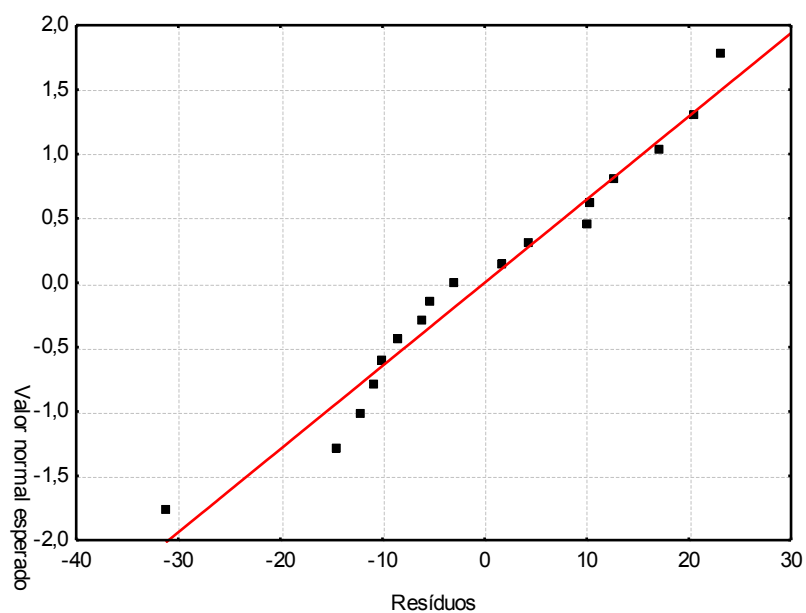


Gráfico de valor normal esperado em função dos resíduos para a unidade resultante da desidratação precedida pela pulverização de etanol.

Anexo 3

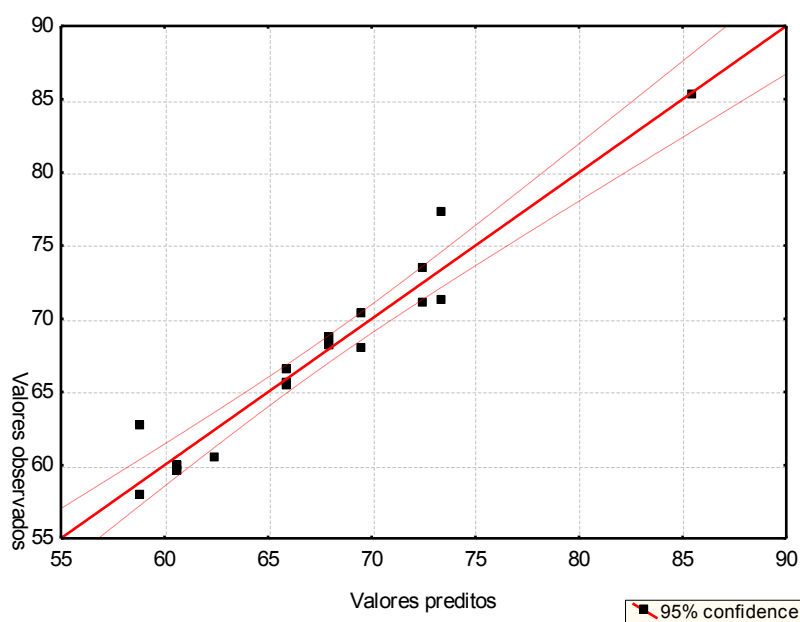


Valores preditos versus valores observados para a acidez resultante da desidratação precedida por pulverização de etanol

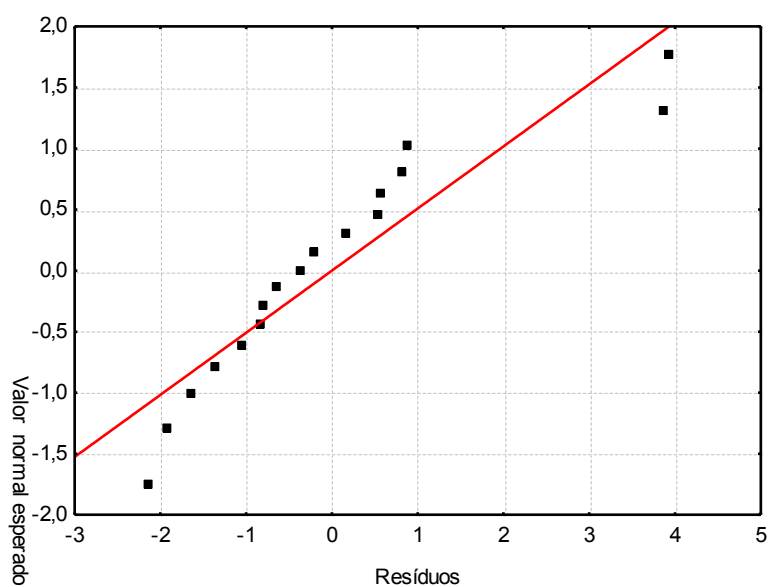


Valor normal esperado em função dos resíduos para a acidez resultante de desidratação precedida pela pulverização de etanol

Anexo 4

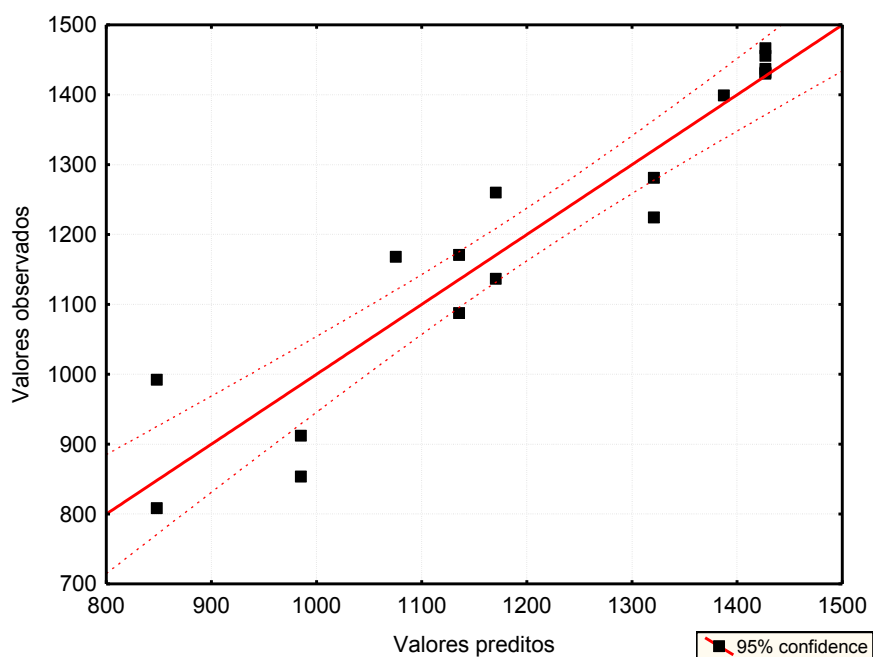


Valores preditos versus valores observados para os teores de ácido ascórbico resultantes da desidratação precedida por pulverização de etanol

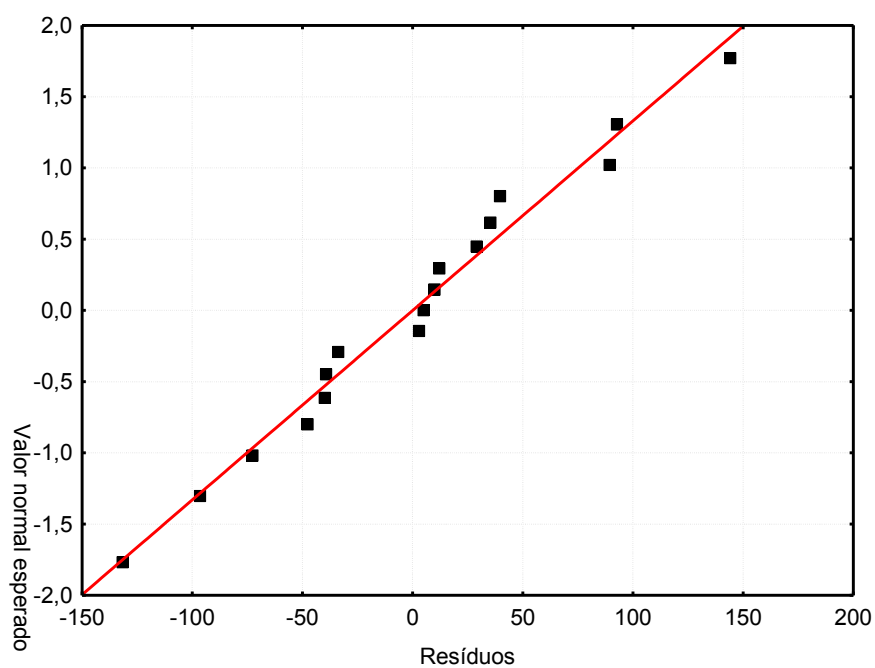


Valor normal esperado em função dos resíduos para os teores de ácido ascórbico resultantes de desidratação precedida pela pulverização de etanol

Anexo 5

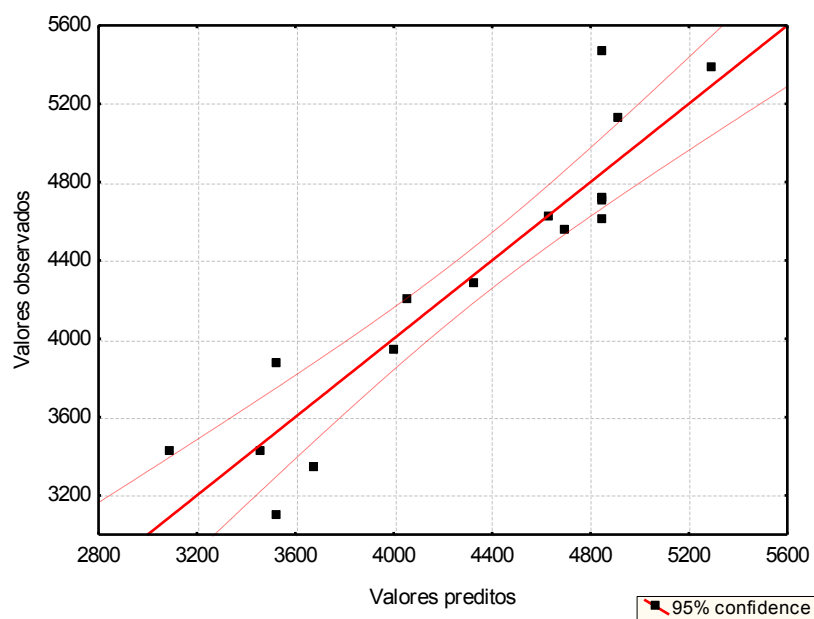


Valores preditos versus valores observados para os teores de fenólicos totais resultantes da desidratação precedida por pulverização de etanol

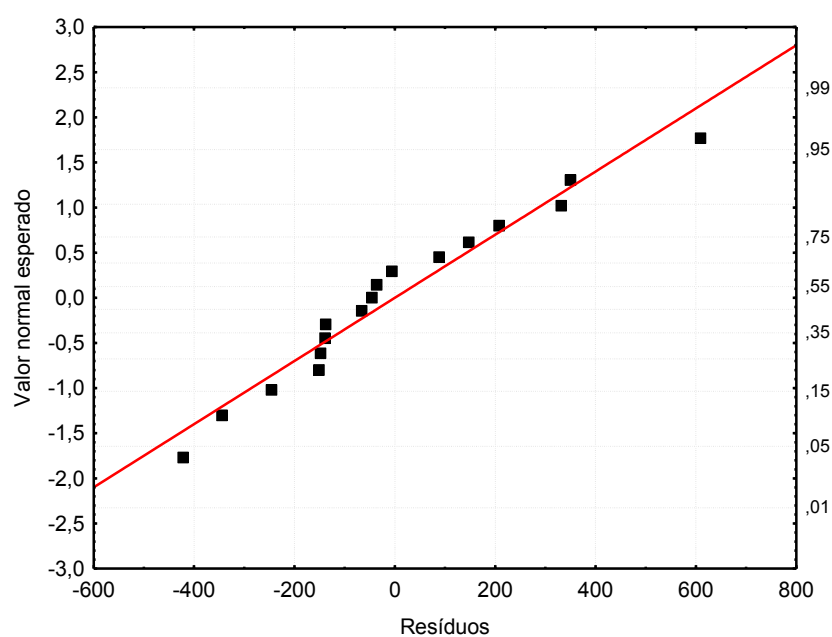


Valores normais esperados em função dos resíduos para os teores de fenólicos totais resultantes da desidratação precedida pela pulverização de etanol.

Anexo 6

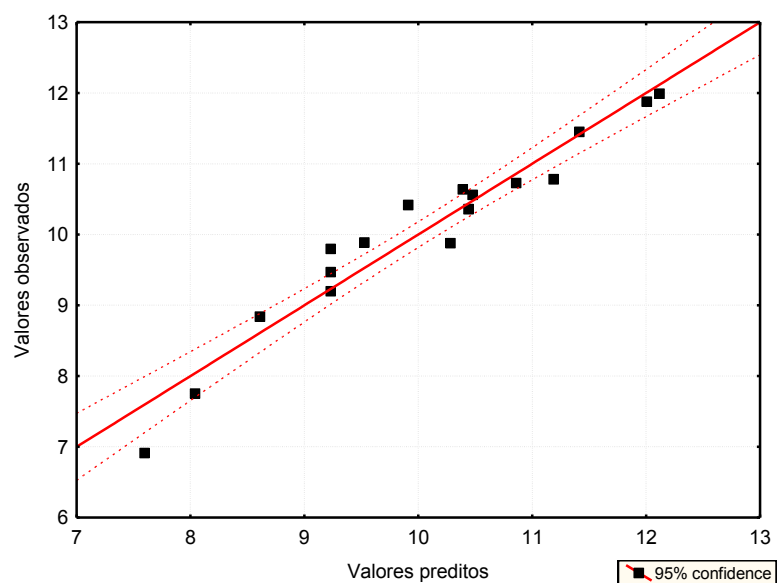


Valores preditos versus valores observados para os teores de flavonoides resultantes da desidratação precedida por pulverização de etanol

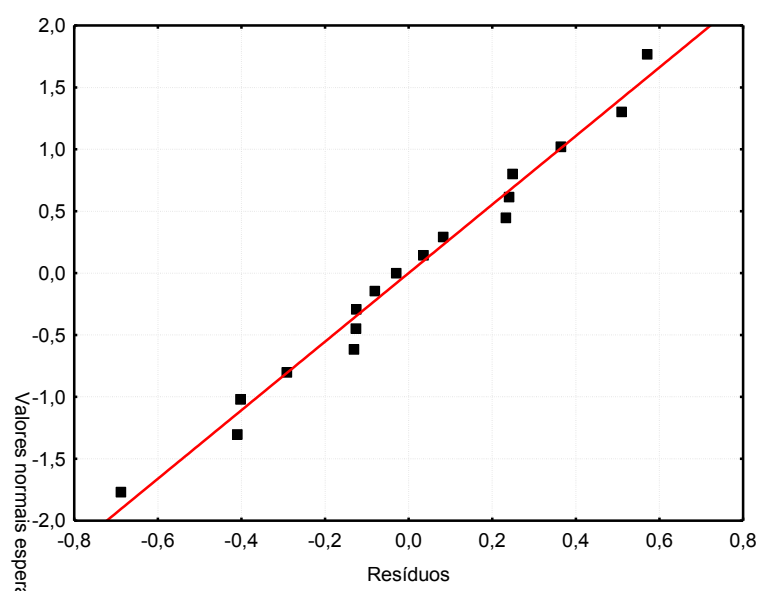


Valores normais esperados em função dos resíduos para os teores de flavonoides resultantes da desidratação precedida por pulverização de etanol.

Anexo 7



Valores preditos versus valores observados para os teores de proteínas resultantes da desidratação precedida por pulverização de etanol



Valores normais esperados em função dos resíduos para os teores de proteínas resultantes da desidratação precedida por pulverização de etanol