



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



**ESTUDO DA SECAGEM DE RESÍDUOS DE ACEROLA EM
TAMBOR ROTATIVO ACOPLADO A MICRO-ONDAS**

Lina Ramadan

Uberlândia – MG

2017



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



ESTUDO DA SECAGEM DE RESÍDUOS DE ACEROLA EM TAMBOR ROTATIVO ACOPLADO A MICRO-ONDAS

Lina Ramadan

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Prof. Dr. Marcos A. de Souza Barrozo

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

Uberlândia – MG

2017

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

R165e Ramadan, Lina, 1992-
2017 Estudo da secagem de resíduos de acerola em tambor rotativo
acoplado a micro-ondas / Lina Ramadan. - 2017.
88 f. : il.

Orientador: Claudio Roberto Duarte e Marcos Antonio de Souza Barrozo.

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia química - Teses. 2. Acerola - Secagem - Teses. 3. Resíduos industriais- Teses. 4. Micro-ondas - Teses. I. Duarte, Claudio Roberto, 1975- II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 21 DE FEVEREIRO DE 2017.

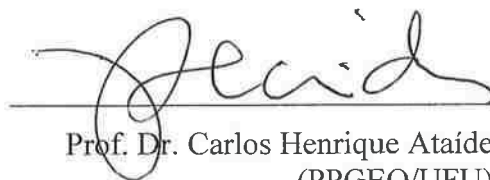
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte
Orientador (PPGEQ/UFU)



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



Prof. Dr. Carlos Henrique Ataíde
(PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana
(FEQUI/UFU)



Profª. Drª. Claudia Regina Fernandes de Souza
(FCFRP/USP)

Dedico este trabalho aos meus pais e aos meus irmãos, fontes de estímulo e apoio incondicional.

AGRADECIMENTOS

Concluída uma etapa tão essencial em minha vida, não poderia deixar de agradecer aos envolvidos. Primeiramente, agradeço a Deus, único e misericordioso, por ter me encaminhado e permitido que concluísse uma trajetória tão importante, dando forças para enfrentar os obstáculos e solucionar os problemas com saúde, fé e confiança.

Aos meus pais, meus maiores exemplos, dignos de meu respeito e minha admiração. Não existem palavras capazes de expressar minha eterna gratidão. Juntamente com meus irmãos, Dania e Mohamad Nader, vocês foram, e sempre serão, meu maior estímulo e porto seguro. Agradeço a vocês quatro, minha família, pelo apoio, paciência, carinho e confiança em minha capacidade. Sou grata por estarem presentes em todas as caminhadas, nos obstáculos ou nos momentos de comemoração e lazer.

Aos orientadores Marcos Antonio de Souza Barrozo e Claudio Roberto Duarte, agradeço pela oportunidade de trabalhar no projeto, pela disposição e pelo suporte em todas as atividades. O compartilhamento de ideias e experiências possibilitou que o trabalho fosse executado de forma adequada, além de incentivar o crescimento pessoal.

Aos amigos de laboratório, pelas ideias, divisão de conhecimento e momentos de lazer, que tornaram o cotidiano mais fácil e agradável. Especialmente ao grupo de “Secagem” (Priscila, Neiton e Geraldo), pelas dicas e disponibilidade, e à Suellen e à Angélica, pela compreensão na divisão de equipamentos. Às minhas amigas Isabela e Marcela, que sempre estiveram presentes nos momentos de trabalho e de distração, me apoiando e sendo parceiras em todas as situações.

Ao Prof. Dr. Dyrney Araújo dos Santos, que, mesmo à distância, contribuiu pacientemente com seus conhecimentos e sabedoria.

Aos alunos de iniciação científica (Camilla, Felipe, Thamires e Thaynara) por me acompanharem na execução dos experimentos, mostrando interesse e dedicação.

A todos os funcionários e professores da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia que contribuíram de alguma forma para a realização do trabalho.

À CAPES, pela bolsa de estudo, e à FAMEPIG e ao CNPq, pelo auxílio financeiro, indispensável à execução das pesquisas. Também agradeço à empresa Fruteza, pela disposição em doar a amostra utilizada.

Aos familiares e amigos, por acreditarem em minha competência e estarem sempre presentes no meu dia-a-dia.

Enfim, meu sincero reconhecimento e respeito a todos que dedicaram parte de seu tempo para contribuir para o cumprimento deste projeto.

*“Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.”*

(CHARLES CHAPLIN)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE SÍMBOLOS	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos.....	2
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Fruticultura brasileira	3
2.1.1 Acerola.....	3
2.2 Compostos bioativos	4
2.2.1 Fenólicos.....	5
2.2.2 Flavonoides.....	6
2.2.3 Ácido ascórbico	7
2.3 Secagem.....	7
2.3.1 Atividade de água	8
2.3.2 Metodologias de secagem.....	9
2.3.2.1 Micro-ondas.....	9
2.3.2.2 Tambor rotativo	12
2.4 Sistemas não convencionais de secagem com micro-ondas.....	13
2.4.1 Ar quente	13
2.4.2 Micro-ondas a vácuo	14
2.4.3 Leito de jorro e leito fluidizado	14
2.4.4 Tambor rotativo	16
2.5 Estudo da dinâmica das partículas.....	17
2.5.1 Dispersão das partículas	17
2.5.1.1 Dispersão radial	17
2.5.1.2 Dispersão axial	19
2.5.2 Segregação de partículas	19
2.5.3 Índice de segregação em processos monofásicos	20
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1 Material	23
3.2 Caracterização físico-química do resíduo de acerola <i>in natura</i>	23

3.2.1	Massa específica aparente	23
3.2.2	Massa específica real	23
3.2.3	Porosidade	24
3.2.4	Determinação do diâmetro da partícula.....	24
3.2.5	Teor de cinzas.....	24
3.2.6	Açúcar redutor total (ART)	24
3.2.7	Ângulo de repouso estático.....	25
3.2.8	Ângulo de repouso dinâmico.....	25
3.2.9	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	26
3.3	Unidade experimental.....	26
3.4	Segregação de partículas	29
3.4.1	Planejamento experimental.....	29
3.4.2	Determinação do índice de segregação	30
3.4.2.1	Estudo da dinâmica.....	30
3.4.2.2	Análise de imagem	31
3.5	Secagem.....	33
3.5.1	Influência da potência do micro-ondas e da velocidade de rotação do tambor	33
3.5.2	Influência da fração de enchimento e da velocidade de rotação do tambor	34
3.6	Análises físico-químicas.....	35
3.6.1	Umidade	35
3.6.2	Atividade de água	35
3.6.3	Compostos bioativos	36
3.6.3.1	Teor de fenólicos totais	36
3.6.3.2	Teor de flavonoides totais.....	36
3.6.3.3	Teor de ácido ascórbico	36
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO		38
4.1	Caracterização físico-química do resíduo de acerola <i>in natura</i>	38
4.2	Estudo da dinâmica das partículas.....	40
4.2.1	Índice de segregação para resíduos de acerola	41
4.2.1.1	Movimento axial.....	41
4.2.1.2	Movimento radial	42
4.3	Secagem.....	53
4.3.1	Influência da potência do micro-ondas e da velocidade de rotação do tambor	53
4.3.1.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	60
4.3.2	Influência da fração de enchimento e da velocidade de rotação do tambor	63
4.3.2.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	69
4.3.3	Efeito do grau de enchimento na remoção de umidade.....	71

4.3.4 Comparação entre secadores na desidratação de resíduos de acerola	72
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	75
5.1 Conclusões.....	75
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICE A - Índice de segregação para resíduos com 10% de umidade.....	86
APÊNDICE B - Teste de medida de potência no forno de micro-ondas	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Velocidade de reações de deterioração de alimentos em função da atividade de água.....	9
Figura 2.2: Funcionamento de um forno de micro-ondas.	10
Figura 2.3: Esquema de um tambor rotativo com suspensores.	12
Figura 2.4: Esquema do sistema de secagem por micro-ondas e leito de jorro.....	15
Figura 2.5: Esquema de um secador rotativo com aquecimento híbrido.....	16
Figura 2.6: Fenômeno de segregação axial e radial em um tambor rotativo.....	20
Figura 2.7: Configuração lado-a-lado.....	22
Figura 2.8: Configuração superior-inferior	22
Figura 3.1: Resíduo de acerola <i>in natura</i>	23
Figura 3.2: Aparato para medição do ângulo de repouso estático.....	25
Figura 3.3: Tambor rotativo.	27
Figura 3.4: Vista interna do micro-ondas adaptado.....	27
Figura 3.5: Vista lateral do sistema com motor conectado ao micro-ondas.....	28
Figura 3.6: Vista dianteira da associação completa.....	28
Figura 3.7: Unidade experimental para os experimentos sobre dinâmica de partículas.....	28
Figura 3.8: Amostras dispostas lado-a-lado nas direções (a) radial e (b) axial.	30
Figura 3.9: Sistema completo da unidade experimental utilizada para analisar a mistura das partículas.....	31
Figura 3.10: Etapas do procedimento para cálculo de índice de segregação: (a) região de interesse do tambor, (b) conversão para 8 bits, (c) gradeamento.	32
Figura 3.11: Instrumento de medição de atividade de água.	35
Figura 4.1: Atividade de água em função do teor de umidade do resíduo de acerola.....	39
Figura 4.2: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 9% de grau de enchimento e 18 rpm.....	41
Figura 4.3: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 13% de grau de enchimento e (a) 7 rpm e (b) 29 rpm.....	41
Figura 4.4: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 22% de grau de enchimento e (a) 2 rpm, (b) 18 rpm e (c) 34 rpm.....	41
Figura 4.5: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 31% de grau de enchimento e (a) 7 rpm e (b) 29 rpm.....	42
Figura 4.6: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 35% de grau de enchimento e 18 rpm.....	42
Figura 4.7: Seção transversal do tambor rotativo com grau de enchimento de 9, 13, 22, 31 e 35%, respectivamente.....	42
Figura 4.8: Influência da dimensão da célula no índice de segregação.....	44
Figura 4.9: Índice de segregação para esferas de vidro.....	45
Figura 4.10: Variação transiente do I_S a $f = 22\%$ e $v = 2, 18$ e 34 rpm.....	45
Figura 4.11: Variação transiente do I_S a $f = 13\%$ e $v = 7$ e 29 rpm.....	46
Figura 4.12: Variação transiente do I_S a $f = 31\%$ e $v = 7$ e 29 rpm.....	46
Figura 4.13: Variação transiente do I_S a $v = 18$ rpm e $f = 9, 22$ e 35%	46
Figura 4.14: Variação transiente do I_S a $v = 7$ rpm e $f = 13$ e 31%	47
Figura 4.15: Variação transiente do I_S a $v = 29$ rpm e $f = 13$ e 31%	47
Figura 4.16: Efeito da umidade ($f = 9\%$ e $v = 18$ rpm)	50
Figura 4.17: Efeito da umidade ($f = 13\%$ e $v = 7$ rpm)	50
Figura 4.18: Efeito da umidade ($f = 13\%$ e $v = 29$ rpm)	51
Figura 4.19: Efeito da umidade ($f = 22\%$ e $v = 2$ rpm)	51

Figura 4.20: Efeito da umidade na condição de $f = 22\%$ e $v = 18$ rpm com duas réplicas (a) e (b) no ponto central.....	51
Figura 4.21: Efeito da umidade ($f = 22\%$ e $v = 34$ rpm)	52
Figura 4.22: Efeito da umidade ($f = 31\%$ e $v = 7$ rpm)	52
Figura 4.23: Efeito da umidade ($f = 31\%$ e $v = 29$ rpm)	52
Figura 4.24: Efeito da umidade ($f = 35\%$ e $v = 18$ rpm)	52
Figura 4.25: Variação de umidade removida em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.	55
Figura 4.26: Variação de atividade de água em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.	55
Figura 4.27: Teor de fenólicos totais em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.	57
Figura 4.28: Teor de flavonoides totais em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.....	58
Figura 4.29: Teor de ácido ascórbico em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.	59
Figura 4.30: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola <i>in natura</i> em diferentes regiões do resíduo ((a), (b), (c) e (d)).	60
Figura 4.31: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 1,41 W/g e 45 rpm.	61
Figura 4.32: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,12 W/g e 45 rpm.	61
Figura 4.33: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,82 W/g e 45 rpm.	61
Figura 4.34: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,82 W/g e 15 rpm.	62
Figura 4.35: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,82 W/g e 30 rpm.	62
Figura 4.36: Variação de umidade removida em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.	64
Figura 4.37: Variação de atividade de água em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.....	65
Figura 4.38: Teor de fenólicos totais em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.	66
Figura 4.39: Teor de flavonoides totais em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.	67
Figura 4.40: Teor de ácido ascórbico em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.	68
Figura 4.41: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 9% e a 24 rpm.	69
Figura 4.42: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 22% e a 24 rpm.	69
Figura 4.43: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 35% e a 24 rpm.	70
Figura 4.44: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 22% e a 7 rpm.	70
Figura 4.45: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 22% e a 41 rpm.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Principais regimes de escoamento.....	18
Tabela 3.1: Especificações do micro-ondas.	26
Tabela 3.2: Dimensões do cilindro (mm).	27
Tabela 3.3: Níveis das variáveis do PCC na análise de segregação de partículas.....	29
Tabela 3.4: Planejamento composto central para os experimentos de segregação de partículas	29
Tabela 3.5: Níveis das variáveis do planejamento (3^K) para os experimentos de secagem.	33
Tabela 3.6: Planejamento experimental (3^K) para os experimentos de secagem.	34
Tabela 3.7: Níveis das variáveis do PCC para os experimentos de secagem.....	34
Tabela 3.8: Planejamento composto central para os experimentos de secagem.	35
Tabela 4.1: Caracterização do resíduo de acerola <i>in natura</i> e comparação com a literatura. ..	38
Tabela 4.2: Caracterização dos ângulos de repouso do resíduo de acerola com corante.	40
Tabela 4.3: Regimes de escoamento observados em cada condição do PCC.	43
Tabela 4.4: Resultados de umidade removida e atividade de água no planejamento (3^k) para os experimentos de secagem.	54
Tabela 4.5: Resultados de teores dos compostos bioativos no planejamento (3^k) para os experimentos de secagem.	56
Tabela 4.6: Resultados de umidade removida e atividade de água no PCC para os experimentos de secagem.	63
Tabela 4.7: Resultados de teores dos compostos bioativos no PCC para os experimentos de secagem.	65
Tabela 4.8: Umidade removida a diferentes graus de enchimento e potência e energia específica constantes.....	72
Tabela 4.9: Teor de compostos bioativos obtidos na desidratação de resíduo de acerola por diferentes secadores.	73

LISTA DE SÍMBOLOS

A_w	atividade de água [-]
C_B	concentração de partículas brancas em termos de pixels em uma dada célula [-]
C_i	concentração de partículas em termos de pixels em uma dada célula [-]
$C_{média}$	concentração média de partículas em termos de pixels sobre todas as célula [-]
C_P	concentração de partículas pretas em termos de pixels em uma dada célula [-]
d	diâmetro interno do tambor rotativo [$M^0L^1T^0$]
D_i	diâmetro médio da peneira [$M^0L^1T^0$]
DP	densidade de potência [$M^{-1}L^2T^{-3}$]
\bar{D}_S	diâmetro médio de Sauter [$M^0L^1T^0$]
f	fração de enchimento do tambor rotativo [-]
Fr	número de Froude [-]
g	aceleração da gravidade [$M^0L^1T^{-2}$]
I_S	índice de segregação [-]
l	comprimento do tambor rotativo [$M^0L^1T^0$]
m	massa da amostra [$M^1L^0T^0$]
N	número total de células [-]
P	potência [ML^2T^{-3}]
R	raio do tambor rotativo [$M^0L^1T^0$]
t	tempo [$M^0L^0T^1$]
TAA	teor de ácido ascórbico [-]
TFT	teor de flavonoides totais [-]
TPT	teor de fenólicos totais [-]
M_R	umidade removida [-]
v	velocidade de rotação do tambor rotativo [$M^0L^0T^{-1}$]
V_S	volume do sólido [$M^0L^3T^0$]
V_T	volume total [$M^0L^3T^0$]

Símbolos gregos

$\tan \delta$	fator tangente de perdas ou fator de dissipação [-]
ΔS_i	fração mássica das partículas nas peneiras [-]

ε	porosidade [-]
ε^*	permissividade dielétrica relativa [-]
ε'	constante dielétrica relativa [-]
ε''	fator de perdas relativo [-]
ρ_s	densidade aparente do sólido [$M^1L^{-3}T^0$]
ω	velocidade angular de rotação do tambor rotativo [$M^0L^0T^{-1}$]

RESUMO

A fruticultura é um segmento de destaque no agronegócio brasileiro. Aproximadamente 53% da produção são comercializadas como frutas frescas e 47% destinam-se às indústrias de fabricação de sucos, doces e geleias. O Brasil se encontra entre os maiores produtores mundiais de frutas, inclusive de acerola, alimento rico em vitaminas e compostos antioxidantes. O processamento de frutas gera, anualmente, toneladas de resíduos que, normalmente, não possuem descarte adequado. O reaproveitamento desses resíduos, além de evitar impactos negativos ao meio ambiente, possibilita a obtenção de compostos antioxidantes, que podem ser reutilizados pelas indústrias alimentícias e farmacêuticas. Entretanto, esse material possui elevado teor de umidade, que dificulta seu manuseio e reduz a vida útil do produto. A desidratação é uma operação unitária que envolve transferência de calor e de massa e pode ser aplicada para reduzir o teor de umidade a um nível que evite a proliferação microbiana e possibilite o reaproveitamento dos compostos bioativos. O método de secagem por micro-ondas vem sendo muito aplicado devido à redução do tempo de processo e do consumo energético. Porém, devido ao aquecimento heterogêneo, a associação com outro secador que confira movimento às partículas é uma opção que pode resultar em melhorias no processo. Diante do exposto, foi projetado, na FEQUI/UFU, um sistema composto por micro-ondas associado a tambor rotativo, a fim de aproveitar a eficiência de aquecimento do micro-ondas e a agitação fornecida pelo tambor rotativo. O objetivo do trabalho é avaliar a eficiência do sistema na homogeneização e secagem de resíduos de acerola. Primeiramente, foi estudada a mistura em diferentes condições de velocidade de rotação, grau de enchimento do tambor rotativo e umidade do resíduo, através da avaliação do comportamento transiente do índice de segregação. Constatou-se que velocidades elevadas e graus de enchimento baixos favoreceram o processo. Além disso, a variação de umidade não influenciou expressivamente os resultados. Posteriormente, as amostras foram submetidas à secagem em tambor rotativo acoplado a micro-ondas, e o produto final foi analisado em termos de remoção de umidade e concentração de compostos bioativos (fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico). Foi proposto um planejamento experimental (3^K) variando velocidade de rotação e potência do micro-ondas, enquanto o grau de enchimento foi fixo em 13%. Maiores concentrações de compostos antioxidantes foram obtidas a elevadas velocidades (30 e 45 rpm) e potência de 300 W. A seguir, foi estruturado um Planejamento Composto Central para analisar o efeito do grau de enchimento e da velocidade de rotação, mantendo a potência constante em 300 W. Novamente, maiores teores de compostos bioativos foram obtidos em velocidades altas e em baixos e intermediários graus de enchimento. Praticamente todas as concentrações de compostos bioativos das amostras após a secagem foram maiores que da amostra *in natura*. Portanto, os resultados obtidos mostraram interessante desempenho do novo equipamento, tanto na remoção de umidade quanto na qualidade do produto final, apresentando-se como um método viável para ser aplicado em processos de secagem. Dessa forma, o tambor rotativo contribui para a redução da heterogeneidade, característica apontada na literatura como limitante no processo de secagem em micro-ondas.

Palavras-chave: secagem, resíduos agroindustriais, compostos antioxidantes, micro-ondas, tambor rotativo.

ABSTRACT

Fruit growing is an important segment of Brazilian agribusiness. Approximately 53% of the production are marketed as fresh fruit and 47% are intended to produce juices, jams and jellies in manufacturing industries. Brazil is among the largest producers of fruits, including acerola, which is rich in vitamins and antioxidants. Fruit processing generates annually tons of residues that normally do not have proper disposal. Reusing agri-industrial residues avoids negative impacts on environment and enables antioxidant compounds acquisition, which can be applied in food and pharmaceutical industries. However, this material has high moisture content that turns its handling more difficult and reduces product life. Dehydration is a unit operation that involves heat and mass transfer and may be applied to reduce moisture content to a level that prevents microbial proliferation and allows the reuse of bioactive compounds. The microwave drying method has been widely utilized due to reduced process time and energy consumption. However, because of uneven heating, association with another dryer that provides motion of particles is an option that may result in process improvements. Therefore a system composed by microwave associated to rotating drum was designed at FEQUI / UFU in order to take advantage of heating efficiency by microwave and stirring provided by rotating drum. The aim is to evaluate the efficiency of the system in homogeneity and drying acerola residue. Firstly, mixing was studied at different conditions of rotational speed, fill degree and residue moisture, through the evaluation of the transient behavior of the segregation index. It was found that high speeds and low fill degrees favored the process. In addition, moisture variation did not significantly influence the results. Subsequently, samples were submitted to microwave associated to rotating drum drying, and the final product was analyzed in terms of removal moisture and bioactive compounds concentration (phenolic, flavonoids and ascorbic acid). An experimental design (3^K) was proposed varying rotation speed and microwave power. Fill degree was set at 13%. Higher concentrations of antioxidant compounds were obtained at high speeds (30 and 45 rpm) and microwave power of 300 W. A Central Composite Planning was structured to analyze the effect of fill degree and rotation speed at 300 W. Again, higher levels of bioactive compounds were obtained at high speeds and low and intermediate fill degree. Practically in all cases bioactive compounds concentration of samples after drying were above of the residue *in natura*. Therefore, results showed interesting performance of the new equipment in the moisture removal and final product quality, presenting a viable method to be applied in drying processes. Thus, rotating drum contributes to heterogeneity reduction, a characteristic pointed in literature as a limiting in microwave drying.

Key-words: drying, agri-industrial residue, antioxidant compounds, microwave, rotary drum.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos líderes mundiais em produção de frutas, sendo que, diariamente, são geradas milhares de toneladas de resíduos provenientes de seu processamento, principalmente da produção de sucos e polpas (SILVA *et al.*, 2013). Esses resíduos (cascas, sementes, caroços e bagaços), normalmente, não possuem uma destinação adequada, sendo simplesmente descartados pelas empresas ou utilizados como ração animal (UCHÔA, 2007).

Os resíduos podem conter grande quantidade de compostos bioativos, substâncias com capacidade antioxidante, importantes à alimentação humana. Dessa forma, o seu reaproveitamento após desidratação, além de possibilitar a aplicação dos compostos em outros setores da indústria, diminui a proliferação de micro-organismos, devido à redução de umidade, diminuindo a propagação de doenças.

Tecnologias de processamento de frutas têm sido desenvolvidas a fim de conservá-las, prolongando o tempo de vida útil do produto e reduzindo o espaço de armazenamento e transporte. Com isso, há possibilidade de aproveitar os nutrientes e as vitaminas contidos nesses resíduos em diversas aplicações, como na produção de fármacos, cosméticos e suplementos alimentares.

A secagem é uma das técnicas mais antigas e comuns empregada no processo de conservação de alimentos. Dentre as técnicas de secagem, o aquecimento por micro-ondas se destaca, devido a suas vantagens únicas. A aplicação do micro-ondas se diferencia pela diminuição do tempo de secagem, melhora na qualidade final do produto seco e redução do consumo de energia em relação à secagem convencional (WANG *et al.*, 2004). No entanto, uma das principais limitações dessa tecnologia é a ocorrência de aquecimento não uniforme, com formação de pontos quentes (*hot spots*). A uniformidade da transferência de calor pode ser conseguida por agitação pneumática (FENG e TANG, 1998) ou por meios mecânicos (TORRINGA *et al.*, 2001).

Atualmente, vários pesquisadores têm estudado sistemas que envolvem associação com micro-ondas. Um dos equipamentos que podem contribuir para o estabelecimento da transferência de calor uniforme é o tambor rotativo, que fornece movimento às partículas, aumentando a exposição de suas superfícies e o aquecimento em todo seu volume. Com isso,

é possível eliminar ou diminuir os pontos quentes, responsáveis por tornar a qualidade do produto final não uniforme e facilitar a degradação do material.

O primeiro método de secagem não convencional que envolve secagem por micro-ondas pesquisado na FEQUI/UFU, por Nogueira (2016), foi o micro-ondas a vácuo. O autor relatou vantagens sobre o processo, mas verificou heterogeneidade no aquecimento. Então, no presente trabalho, optou-se pelo sistema de micro-ondas acoplado a tambor rotativo, devido à carência de informações na literatura e pela expectativa do fornecimento de homogeneidade ao processo.

A taxa de mistura das partículas no interior de tambores rotativos é função de muitas variáveis relacionadas com o material a ser misturado, como teor de umidade, ângulo de repouso, forma e características da superfície das partículas, e com as condições de operação do equipamento, como grau de preenchimento e velocidade de rotação, além das próprias dimensões do equipamento (FAN *et al.*, 1970). Portanto, é importante conhecer o comportamento das partículas sob a influência das principais variáveis do processo.

Diante do exposto, visando aproveitar a eficiente capacidade de desidratação via micro-ondas com o potencial de mistura do tambor rotativo, esse trabalho visa à aplicação das duas técnicas em conjunto, e os objetivos são detalhadamente apresentados a seguir.

1.1 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral analisar o desempenho do sistema composto por micro-ondas e tambor rotativo em relação à secagem e à mistura de resíduos de acerola.

Como objetivos específicos da pesquisa, têm-se:

- Estudo da dinâmica das partículas:
 - Analisar o efeito da velocidade de rotação do tambor, da fração de enchimento do tambor e da umidade do resíduo de acerola no índice de segregação de partículas;
 - Obter as condições mais favoráveis à mistura.
- Secagem:
 - Obter a quantidade de umidade removida e a atividade de água para todas as condições dos planejamentos experimentais;
 - Analisar a qualidade do produto, através da determinação de fenólicos totais, flavonoides totais e ácido ascórbico;
 - Determinar as condições operacionais mais adequadas à secagem.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fruticultura brasileira

A fruticultura brasileira vive um de seus momentos mais dinâmicos. A ampla variedade de espécies produzidas no país, a diversidade de clima, o incremento da produtividade e as formas de industrialização colocam as frutas em destaque no agronegócio. A adoção de eficientes sistemas de cultivo e de rastreamento, em sintonia com a responsabilidade social e ambiental, impulsiona as cadeias produtivas exportadoras, além de ampliar a oferta de frutas para consumo interno (ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA, 2015).

Em 2015, a produção foi estimada em 43 milhões de toneladas de frutas frescas (ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA, 2016). As frutas “in natura” podem ser comercializadas ou servir de matéria-prima em processos de fabricação de conservas, sucos, geleias e doces (LOUSADA Jr. *et al.*, 2006).

A indústria de polpa de fruta é um segmento industrial de grande importância no Brasil, principalmente no Nordeste. Porém, esse segmento é responsável por aproximadamente 40% do volume de resíduo agroindustrial gerado (ABUD e NARAIN, 2009).

Estudos recentes têm demonstrado que as frutas são ricas em muitos nutrientes e compostos antioxidantes, e que esses constituintes podem estar concentrados, majoritariamente, nas cascas e sementes, que são, na maioria das vezes, descartadas (COSTA *et al.*, 2000; MELO *et al.*, 2008). Por isso, é importante estudar técnicas de reaproveitamento dos resíduos, a fim de aplicar os compostos antioxidantes neles contidos na fabricação de outros produtos, como medicamentos e alimentos. Dessa forma, o reaproveitamento proporciona geração de valor agregado aos resíduos, além de diminuir o impacto ambiental causado por seu descarte inadequado.

2.1.1 Acerola

A aceroleira (*Malpighia emarginata*) é originária de regiões da América Central, Noroeste da América do Sul e Antilhas (MACIEL *et al.*, 2010). A acerola se destaca por possuir elevada concentração de vitamina C, vitamina A, ferro, cálcio, vitaminas do complexo

B e de antocianinas, que tornam este fruto notável no campo dos nutracêuticos, pela capacidade de capturar radicais livres do organismo (SILVA, 2014). Os elevados teores de vitamina C, naturalmente encontrada neste fruto, têm favorecido a ampliação de oportunidades para o seu cultivo, processamento e comercialização (AGOSTINI-COSTA *et al.*, 2003).

As características da acerola, como teor de vitamina C, coloração, peso e tamanho dos frutos, teor de sólidos solúveis e pH do suco, são afetadas pela desuniformidade genética dos pomares e sofrem influência de vários outros fatores, como precipitações pluviais, temperatura, altitude, adubação, irrigação e a ocorrência de pragas e doenças (NOGUEIRA *et al.*, 2002), impedindo a padronização da caracterização das propriedades dessa fruta.

Porto Rico, Havaí, Jamaica e Brasil realizam o cultivo da aceroleira em escala comercial. O grande destaque na agroindústria brasileira se deve à elevada capacidade de aproveitamento industrial. A Região Nordeste é a maior produtora, por suas condições de solo e clima, correspondendo a 70% da produção nacional, seguida do Sudeste, representando, aproximadamente, 15% do volume total produzido no país. A área cultivada no Brasil é estimada em cerca de 10000 hectares, com destaque para Bahia, Ceará, Paraíba e Pernambuco, sendo que, a partir do 3º ou 4º ano do plantio, as plantas adultas chegam a produzir, em média, 16 toneladas por hectare, anualmente (FURLANETO e NASSER, 2015).

No Brasil, as indústrias processadoras de frutas tropicais empregam em sua cadeia produtiva cerca de 34,40 mil toneladas de acerolas por ano, o que equivale a 7,16% do total de frutas processadas por estas empresas. Como consequência, há geração de, aproximadamente, 18 mil toneladas de sucos e polpas por ano, sendo que esta produção se concentra no Nordeste (FREITAS *et al.*, 2006). Os resíduos gerados pelo processamento de frutas, muitas vezes, não possuem destino adequado, acarretando desperdício de compostos bioativos neles presentes.

2.2 Compostos bioativos

Antioxidantes são compostos que podem retardar ou inibir a oxidação de lipídios ou outras moléculas, evitando o início ou a propagação das reações de oxidação. Formam um conjunto heterogêneo de substâncias, composto por vitaminas, minerais, pigmentos naturais e enzimas, que bloqueiam o efeito danoso dos radicais livres ao organismo, formados nas reações metabólicas ou por fatores exógenos. A geração de radicais livres, fisiológica ou não,

é normalmente equilibrada pela ação dos antioxidantes endógenos e exógenos (OU *et al.*, 2002).

Diversos estudos têm demonstrado que o consumo de substâncias antioxidantes na dieta diária pode produzir uma ação protetora efetiva contra os processos oxidativos que naturalmente ocorrem no organismo. Foi descoberto que uma série de doenças pode estar ligada aos danos causados por formas de oxigênio extremamente reativas, denominadas “substâncias reativas oxigenadas”. Estas substâncias também estão ligadas aos processos responsáveis pelo envelhecimento do corpo (BRENNA e PAGLIARINI, 2001; YILDRIM *et al.*, 2001).

Antioxidantes exógenos são essenciais para a resistência ao estresse oxidativo. Esses antioxidantes são obtidos pela dieta, sobretudo, através de produtos de origem vegetal. Compõem este grupo: compostos fenólicos, flavonoides, ácido ascórbico, vitamina C, vitamina E e carotenoides (OU *et al.*, 2002; LAGUERRE *et al.*, 2007).

Os frutos contêm níveis consideráveis de compostos bioativos. A quantidade desses compostos nos frutos é influenciada, principalmente, por: maturação, variedade, clima, composição do solo, localização geográfica e as condições de armazenamento (BELITZ *et al.*, 2009).

2.2.1 Fenólicos

Os compostos fenólicos podem ser definidos como substâncias que possuem um anel aromático com um ou mais grupos hidroxilas e têm sido amplamente estudados devido a sua influência na qualidade dos alimentos. Abrangem um conjunto enorme de substâncias, como os ácidos fenólicos, os quais, por sua composição química, possuem propriedades antioxidantes (SOARES, 2002).

Esse grande e complexo grupo faz parte dos constituintes de uma variedade de vegetais, frutas e produtos industrializados. São substâncias presentes em abundância na natureza, tendo sido detectados mais de 8000 compostos em plantas. Podem ser pigmentos, que dão a aparência colorida aos alimentos, ou produtos do metabolismo secundário, normalmente derivados de reações de defesa das plantas contra agressões do ambiente. Esses compostos agem como antioxidantes, não somente pela sua habilidade em doar hidrogênio ou elétrons, mas também em virtude de seus radicais intermediários estáveis, que impedem a oxidação de vários ingredientes do alimento, particularmente de lipídios (BRAND-WILLIAMS *et al.*, 1995).

A atividade antioxidante de compostos fenólicos é principalmente devida às suas propriedades de óxido-redução, as quais podem desempenhar um importante papel na absorção e neutralização de radicais livres quelando o oxigênio triplete e singlete ou decompondo peróxidos (ANTUNES e CANHOS, 1984; BRENNNA e PAGLIARINI, 2001; ZHENG e WANG, 2001; FENNEMA, 1993; SIMÃO, 1985).

Os fenólicos exibem grande quantidade de propriedades fisiológicas, como antialérgica, antiarteriogênica, anti-inflamatória, antimicrobiana, antitrombótica, cardioprotetora e vasodilatadora, mas o principal efeito dos compostos fenólicos é atribuído à ação antioxidante (BALASUNDRAM *et al.*, 2006).

2.2.2 Flavonoides

Quimicamente, os flavonoides e isoflavonoides são doadores de elétrons. Eles apresentam estruturas químicas conjugadas em anel β , ricas em grupos hidroxilas, que apresentam potenciais ações antioxidantes por reagirem e inativarem ânions superóxido, oxigênio singlete, radicais peróxido de lipídios e/ou estabilizando radicais livres envolvidos no processo oxidativo através da hidrogenação ou complexação com espécies oxidantes (BIRT *et al.*, 2001).

Atualmente, mais de 6000 diferentes tipos de flavonoides foram descritos (MARCHAND, 2002; YANG *et al.*, 2001), destacando-se as classes de flavonois, flavonas, flavanonas, catequinas, antocianinas, isoflavonas, diidroflavonois e chalconas (COOK e SAMMAN, 1996).

A variedade de propriedades que caracterizam os flavonoides desperta seu interesse econômico. Experimentos biológicos usando combinações isoladas revelam que os flavonoides exercem grande ação sobre os sistemas biológicos, demonstrando efeitos antimicrobiano, antiviral, antiulcerogênico, citotóxico, antineoplásico, antioxidante, anti-hepatotóxico, anti-hipertensivo, hipolipidêmico, anti-inflamatório e antiplaquetário. Também demonstraram aumento na permeabilidade capilar, inibição da exudação proteica e migração de leucócitos (PELZER *et al.*, 1998).

O preparo dos alimentos para consumo pode, algumas vezes, acarretar perdas de compostos bioativos, em maior ou menor grau, a depender da categoria do alimento e do preparo empregado. Todavia, os flavonoides são compostos relativamente estáveis, pois resistem à oxidação, altas temperaturas e moderadas variações de acidez (PETERSON e DWYER, 1998). Flavonoides e isoflavonoides compreendem uma classe de fitoquímicos que

não pode ser sintetizada por humanos, advindo apenas através da ingestão dietética (PETERSON e DWYER, 1998; BIRT *et al.*, 2001).

2.2.3 Ácido ascórbico

Este composto, mais conhecido como vitamina C, inclui-se no grupo das vitaminas hidrossolúveis, que não se armazena no corpo humano, sendo eliminada em pequenas quantidades através da urina. Por este motivo, sua administração diária é de suma importância, para garantir que suas reservas não se esgotem. O ácido ascórbico (2,3-enediol-L-gulônico) é um sólido branco ou amarelado, cristalino, com massa molecular de 176,13 g/mol, densidade de 1,65 g/cm³, bastante solúvel em água e etanol absoluto, insolúvel nos solventes orgânicos comuns, como clorofórmio, benzeno e éter, e apresenta sabor ácido com gosto semelhante ao suco de laranja. No estado sólido, é relativamente estável. No entanto, quando em solução, é facilmente oxidado, em reação de equilíbrio ao ácido L-dehidroascórbico. É um ácido diprótico, sendo que a primeira ionização ocorre com rapidez (pKa: 4,17) e o segundo grupo hidroxila é mais resistente à ionização (pKa: 11,6) (BOBBIO e BOBBIO, 1995).

O ácido ascórbico é uma molécula usada na hidroxilação de várias reações bioquímicas nas células. Sua principal função é a hidroxilação do colágeno, a proteína fibrilar responsável por conferir resistência aos ossos, dentes, tendões e paredes dos vasos sanguíneos. Além disso, é um poderoso antioxidante. Em valores de pH normalmente encontrados no meio intracelular, o ácido ascórbico encontra-se predominantemente na forma ionizada, o ascorbato (LEHNINGER, 2005).

A vitamina C tem sido muito estudada no ramo de tratamento do câncer. Acredita-se que esta estimule o sistema imune, iniba a formação de nitrosaminas e bloqueie a ativação metabólica de carcinógenos. Contudo, células tumorais parecem necessitar de ácido ascórbico e competem com células saudáveis por este nutriente, presumivelmente, para se defenderem da ameaça oxidativa, visto que tumores tratados com vitamina C se tornam mais resistentes à injúria oxidativa (HALLIWELL, 2001).

2.3 Secagem

A secagem é um dos métodos mais antigos de conservação de alimentos. Nessa operação unitária, ocorre uma transferência simultânea de calor e de massa, em que a

atividade de água de um material é reduzida pela remoção da água através da evaporação da mesma (KHRAISHEH *et al.*, 1997).

Durante a secagem, é necessário o fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor de água formado na superfície do material a ser seco. Ao ser colocado no secador, devido à diferença de temperatura, ocorre uma transferência de calor da fonte quente para o material úmido, e, conseqüentemente, evaporação da água. A diferença de pressão parcial de vapor d'água entre o ambiente quente e a superfície do produto ocasionará uma transferência de massa do produto para o ar. Dessa forma, o vapor será arrastado do material (PARK *et al.*, 2001).

Para a escolha de um processo ideal de secagem, vários fatores devem ser analisados, como propriedades organolépticas (sabor e aroma), tempo e energia consumida. O tempo de processo, que está relacionado à taxa de troca de calor e massa entre a matéria-prima e o ar, pode ser analisado através da difusividade efetiva nas diversas temperaturas de processo (PARK *et al.*, 2001).

O objetivo básico da secagem de alimentos é a remoção de água de sólidos a determinado nível de atividade de água em que a deterioração microbiana seja evitada. Segundo Prabhanjan *et al.* (1995), aumento da vida útil, diversidade de produtos e redução substancial de volume são as razões para a popularidade de frutas e legumes secos.

2.3.1 Atividade de água

De acordo com Hoffmann (2001), o valor absoluto da atividade de água representa o conteúdo de água livre (água não ligada) presente no alimento, sendo esta a única forma de água utilizada pelos micro-organismos. As bactérias são normalmente mais exigentes quanto à disponibilidade de água livre, seguidas pelos bolores e leveduras. Entretanto, algumas espécies de bolores e leveduras apresentam elevada tolerância à baixa atividade de água. A atividade de água varia entre 0 (material totalmente seco) e 1 (100% de umidade relativa do material). Valores de atividade de água abaixo de 0,6 descrevem condições em que a ação de micro-organismos se torna mais difícil, conferindo mais segurança à conservação do produto.

A Figura 2.1 relaciona a velocidade de algumas reações responsáveis pela degradação dos alimentos com a atividade de água. Observa-se que abaixo de 0,2 quase todas as reações tornam-se inibidas e que a velocidade das mesmas diminui quanto mais baixa for a atividade de água. Crescimento elevado da velocidade das reações é visível em valores acima de 0,6.

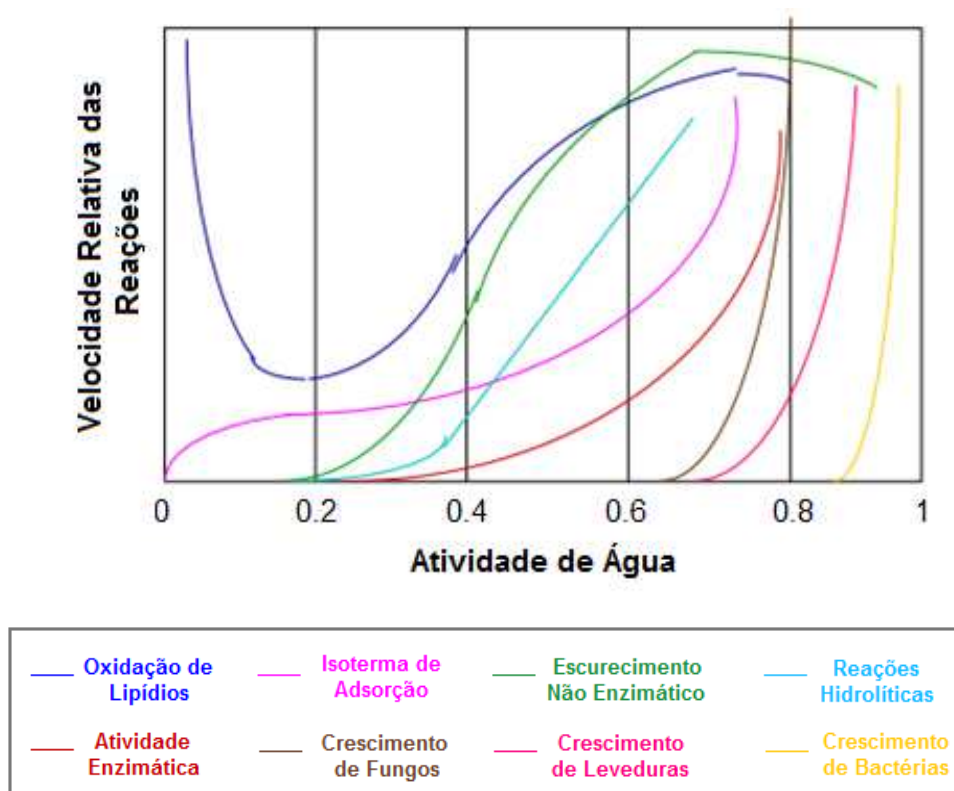


Figura 2.1: Velocidade de reações de deterioração de alimentos em função da atividade de água (Adaptado de VAN DEN BERG e BRUIN, 1981).

2.3.2 Metodologias de secagem

2.3.2.1 Micro-ondas

Micro-ondas são uma modalidade de radiação eletromagnética situada no intervalo de frequências de 300 MHz a 300 GHz. Em processos de aquecimento voltados para aplicações industriais, científicas e medicinais, as frequências mais utilizadas são de 915 MHz e de 2450 MHz. Em relação aos fornos de micro-ondas, a maioria opera a 2450 MHz (MARSAIOLI, 1991; BARBOZA *et al.*, 2001).

O aquecimento por micro-ondas é causado pela capacidade dos materiais de absorver a energia de micro-ondas e convertê-la em calor. É um método que ocorre, basicamente, por mecanismos dipolares e iônicos. A umidade provoca o aquecimento dielétrico, devido à natureza dipolar da água. Assim, quando um campo elétrico oscilante incide sobre as moléculas de água, as moléculas dipolares permanentemente polarizadas tentam realinhar na direção do campo elétrico. Devido à elevada frequência do campo elétrico, este realinhamento ocorre em um milhão de vezes por segundo e provoca atrito interno das moléculas, resultando no aquecimento volumétrico do material. O aquecimento por micro-ondas também pode

ocorrer devido à migração oscilatória de íons no alimento, que gera calor na presença de um campo elétrico de alta frequência de oscilação (DATTA e DAVIDSON, 2000).

A Figura 2.2 corresponde a um esquema de um forno de micro-ondas convencional. Seu funcionamento básico se inicia com a conversão de energia elétrica em térmica, em que micro-ondas são geradas por uma válvula denominada “magnetron”, que consiste em um dispositivo sob vácuo, que converte energia elétrica em micro-ondas. Uma diferença de potencial constante é aplicada entre o ânodo e o cátodo. Os elétrons são acelerados do cátodo para o ânodo, mas a presença de um forte campo magnético, produzido por um eletro-ímã disposto entre os dois polos, faz com que os elétrons descrevam uma trajetória curva e sigam um caminho em espiral, produzindo radiofrequência. Através de uma antena colocada diretamente sobre o ânodo, ocorre a emissão de ondas eletromagnéticas. As ondas produzidas são direcionadas até a cavidade contendo o material a ser aquecido. As paredes metálicas do forno absorvem muito pouco da energia, sendo que a maior parte é refletida e dissipada em um dispositivo, que evita que as micro-ondas danifiquem a válvula (ZLOTORZYNSKI, 1995).

Diversas variáveis influenciam o aquecimento promovido pelas micro-ondas, como o tamanho, a forma, as propriedades dielétricas e térmicas e a composição dos materiais inseridos em seu interior, bem como o tipo de equipamento, frequência e tempo de exposição à radiação (BANIK *et al.*, 2003; CANUMIR *et al.*, 2002; AYMERICH *et al.*, 2008).

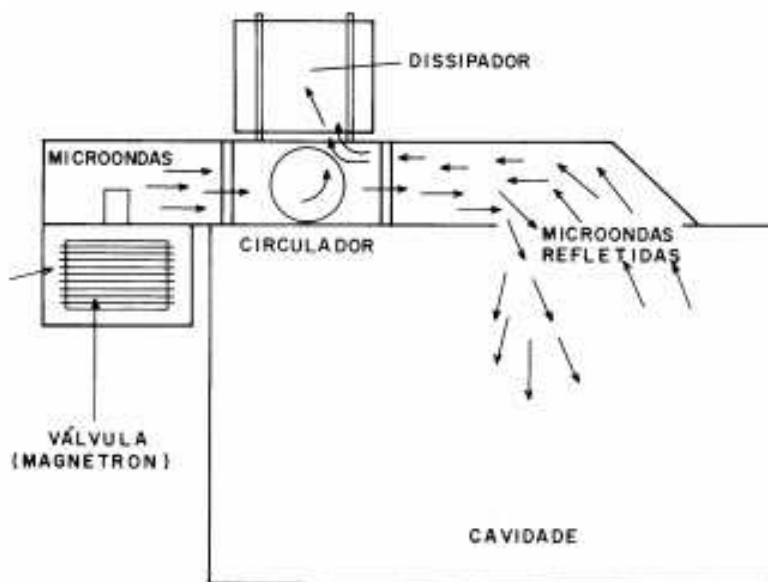


Figura 2.2: Funcionamento de um forno de micro-ondas (BARBOZA *et al.*, 2001).

Materiais dielétricos são aqueles que absorvem certa quantidade de micro-ondas. Ou seja, diferentemente dos materiais transparentes, em que nenhuma energia é perdida, os materiais dielétricos se comportam como maus condutores térmicos, porém não são isolantes perfeitos. Desta forma, quando a potência de micro-ondas é aplicada a um material dielétrico, parte da energia é dissipada no próprio material (SENISE, 1985).

A literatura apresenta os alimentos como componentes dielétricos. Logo, são capazes de armazenar e dissipar energia elétrica de um campo eletromagnético. Como característica de materiais dielétricos, estes dissipam quantidades consideráveis de energia elétrica na forma de calor internamente, através de mecanismos de relaxação e condução, relacionados primariamente à água livre e ao teor salino (JONES, 1986).

As propriedades dielétricas afetam diretamente o mecanismo de interação entre o material e o campo elétrico aplicado e são caracterizadas pela permissividade complexa relativa (ϵ^*), que determina o armazenamento e a dissipação da energia elétrica (PEREIRA, 2007). A permissividade complexa relativa é constituída por uma parte real e uma imaginária. A parte real (ϵ'), constante dielétrica relativa, determina a capacidade de um material armazenar energia elétrica, por unidade de volume, enquanto a parte imaginária (ϵ''), fator de perdas dielétricas relativo, representa a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor. A Equação 2.1 apresenta a relação entre esses parâmetros.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (2.1)$$

A tangente de perdas ou fator de dissipação, representada pela Equação 2.2, indica a habilidade do material de receber energia micro-ondas e convertê-la em calor.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.2)$$

Conforme Senise (1985), a aplicação de aquecimento dielétrico por micro-ondas gera benefícios, como: aumento de produtividade, devido à redução de tempo de processo; melhoria do controle de qualidade, já que o fornecimento de energia ocorre de maneira instantânea; e diminuição de espaço necessário para realização do procedimento. Segundo Salazar-Gonzalez *et al.* (2012), outra vantagem é sua habilidade de atingir altas taxas de secagem. Além disso, o método é caracterizado por simples operação e consumo energético e custo reduzidos, quando comparado a métodos convencionais de secagem.

No entanto, devido à distribuição de temperatura não uniforme, algumas regiões aquecem rapidamente, enquanto outras não. Contribuem para esse efeito o fluxo de radiação, o tempo de aquecimento e a profundidade heterogênea em que a radiação atinge diferentes regiões do material (LOBO e DATTA, 1998).

A energia de micro-ondas pode, ainda, quando combinada com outros métodos de desidratação, aumentar a eficiência da secagem e, dependendo das condições, obter um produto de boa qualidade (ZHANG *et al.*, 2006).

Várias pesquisas no campo de secagem de alimentos foram realizadas utilizando aquecimento por micro-ondas, como em secagem de amêndoas de castanha (SILVA e MARSAIOLI, 2003), batata (KHRAISHEH *et al.*, 2004), espinafre (OZKAN *et al.*, 2007), cenoura (ROSA, 2010), abacaxi (BOTHÁ *et al.*, 2012), maracujá-amarelo (SILVA, 2015), dentre outros.

2.3.2.2 Tambor rotativo

O secador rotativo, apresentado no esquema da Figura 2.3, consiste de um cilindro que gira lentamente e é aquecido internamente por vapor de água ou outro meio de aquecimento (GEANKOPLIS, 1993). Neste tipo de secador, os sólidos são alimentados na extremidade do cilindro e se deslocam, em concorrente ou contracorrente com o ar, até a outra extremidade. Pode ser operado com suspensores, também conhecidos como “flights”, responsáveis por elevar o sólido e aumentar o contato deste com a corrente de gás (VIEIRA e SILVEIRA, 1995).

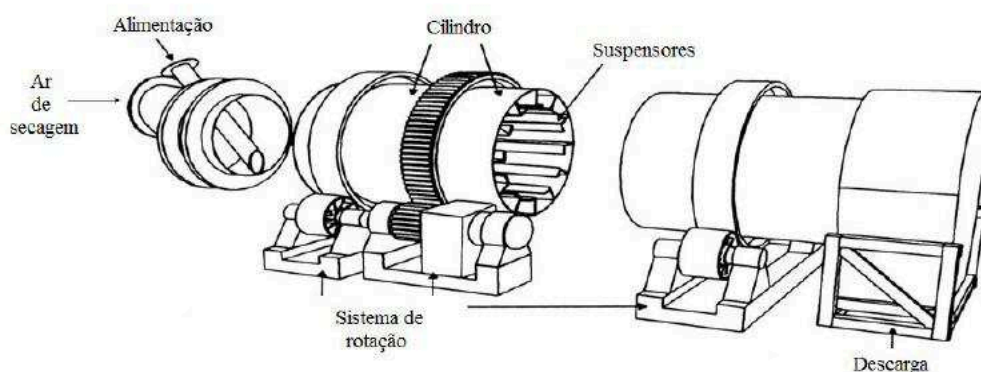


Figura 2.3: Esquema de um tambor rotativo com suspensores (PERRY e GREEN, 1997).

Durante a operação de secagem, em que as partículas são movimentadas no interior do secador, a energia proveniente da fonte de aquecimento deve ser transportada para o sólido ao

mesmo tempo em que a umidade nele contida é removida a fim de se transferir para a corrente gasosa (CAO e LANGRISH, 1999; SHAHHOSSEINI *et al.*, 2000; BRITTON *et al.*, 2006).

Vários autores estudaram processo de secagem empregando tambor rotativo. Lisboa (2005), Arruda (2008), Silvério (2012) e Silva (2014) desenvolveram pesquisas em um sistema denominado secador roto-aerado. Silva (2014) utilizou, como amostra, resíduo de acerola e os outros autores, fertilizantes. A unidade foi projetada na FEQUI/UFU e os autores foram, gradativamente, propondo melhorias para dar continuidade ao estudo desse sistema. Neste secador, o ar quente entra em contato com as partículas depois de percorrer um tubo central contendo mini-tubos, por onde o ar sai em contato direto com o material sólido.

Lisboa (2005) comparou a transferência de massa e energia de fertilizantes no secador roto-aerado com o secador rotativo convencional e concluiu que o secador roto-aerado pode ter um consumo energético significativamente inferior ao da configuração convencional. Além disso, pode operar com uma menor vazão de ar, possibilitando a sua aplicação na secagem de partículas mais finas que as geralmente empregadas, que poderiam ser arrastadas no secador rotativo convencional.

Arruda (2008) também comparou o desempenho do secador rotativo convencional e do roto-aerado e constatou que o secador roto-aerado apresentou maior eficiência de transferência de massa e energia quando comparado ao equipamento tradicional contracorrente.

2.4 Sistemas não convencionais de secagem com micro-ondas

Na literatura, são relatadas dificuldades encontradas em processos de secagem em micro-ondas convencional, devido ao aquecimento heterogêneo. A principal justificativa do presente trabalho é a busca por homogeneidade no emprego de secagem em micro-ondas, conferida por meio da associação com tambor rotativo. Nesta seção, são discutidas algumas configurações de sistemas de secagem constituídos por micro-ondas associado a diferentes secadores convencionais. Tais acoplamentos foram, a princípio, pesquisados e serviram de embasamento para a escolha da unidade experimental utilizada nesse trabalho.

2.4.1 Ar quente

Um produto seco por fluxo de ar quente geralmente experimenta um período de aquecimento, um período de taxa de secagem constante e um ou vários períodos de taxa de secagem decrescente. A técnica convencional dura longo tempo e tem baixa eficiência

energética, especialmente durante os períodos de taxa decrescente. Isto ocorre, principalmente, pela rápida redução da umidade na superfície e consequente encolhimento, resultando, muitas vezes, na redução da transferência de calor e de massa. Além disso, a exposição prolongada a altas temperaturas pode comprometer a qualidade do produto, como cor, nutrientes e sabor (ZHANG *et al.*, 2003, 2005).

É possível reduzir o tempo de processo pela associação com micro-ondas. Os resultados de Maskan (2000) geraram uma redução de 64% do tempo de secagem em relação à secagem por convecção de ar. Funebo e Ohlsson (1998) secaram maçã e cogumelo, e obtiveram redução de, respectivamente, 50 e 25% do tempo de secagem em relação ao método convencional. Silva *et al.* (2006) concluiu que o tempo de secagem de macadâmia com a associação exigiu menos de 10% do tempo de secagem necessário ao método convencional. O mesmo foi verificado por Sharma e Prasad (2001), que realizou o processo utilizando alho.

2.4.2 Micro-ondas a vácuo

A estrutura do material sofre expansão quando submetido à secagem por micro-ondas a vácuo, o que facilita a liberação dos vapores pelos poros (SAGAR e KUMAR, 2010). A redução da pressão ainda pode provocar a redução da temperatura e, deste modo, aumentar os teores de compostos bioativos do produto final (JAYA e DAS, 2003).

No entanto, o principal problema, que prejudica sua aplicação generalizada, é a ausência de uniformidade na distribuição de temperatura, causada pela localização geométrica não uniforme do campo magnético no interior da cavidade de secagem, resultando no surgimento de pontos quentes e frios no produto seco (LI *et al.*, 2011).

Em particular, essa técnica já foi aplicada em desidratação de kiwi, maçã e pera (KIRANOUDIS *et al.*, 1997), bananas (MOUSA e FARID, 2002), tomates (DURANCE e WANG, 2002), cenouras (CUI *et al.*, 2005), uvas (CLARY *et al.*, 2005), acerola (NOGUEIRA, 2016), dentre outros.

2.4.3 Leito de jorro e leito fluidizado

A fluidização fornece agitação pneumática para as partículas no leito de secagem. Deste modo, facilita as transferências de calor e de massa, pelo fato da superfície da partícula estar constantemente exposta a uma nova fronteira, ou seja, a radiação penetra em diferentes regiões do material. Portanto, a combinação com leito de jorro ou leito fluidizado é

considerada um meio eficaz de resolver o problema da desuniformidade do método de secagem por micro-ondas convencional (ZHANG *et al.*, 2006).

O método de secagem por micro-ondas associado a leito de jorro foi utilizado na secagem de maçãs em cubos e mirtilos com alto teor de açúcar (FENG e TANG, 1998). A Figura 2.4 mostra um esquema da unidade experimental projetada pelos autores. Os resultados mostraram que a associação reduziu drasticamente o tempo de secagem (aproximadamente em 80%) e melhorou a qualidade do produto, quando comparada ao método de fluxo de ar quente convencional. Ainda, os produtos apresentaram menor descoloração e maiores taxas de reidratação.

Nindo *et al.* (2003) utilizaram a mesma associação para avaliar a retenção de qualidade física e de antioxidantes em aspargos e descobriram que a técnica produziu partículas de espargos com boa taxa de reidratação e cores características. Em condições de densidade de potência de 2 W/g e temperatura do ar de aquecimento de 60°C, os resultados mostraram um aumento da retenção de antioxidantes.

Khan *et al.* (2010) compararam os métodos de leito de jorro convencional e micro-ondas associado a leito de jeito em secagem de beterraba. As mesmas condições operacionais foram adotadas nos dois casos. Foi concluído que, com a associação, o tempo foi reduzido de 50 a 75% e que a taxa de umidade final foi menor.

Khoshtaghaza *et al.* (2015) também analisaram o efeito desse método de secagem na qualidade do produto final, no consumo de energia e na cinética de secagem de soja.

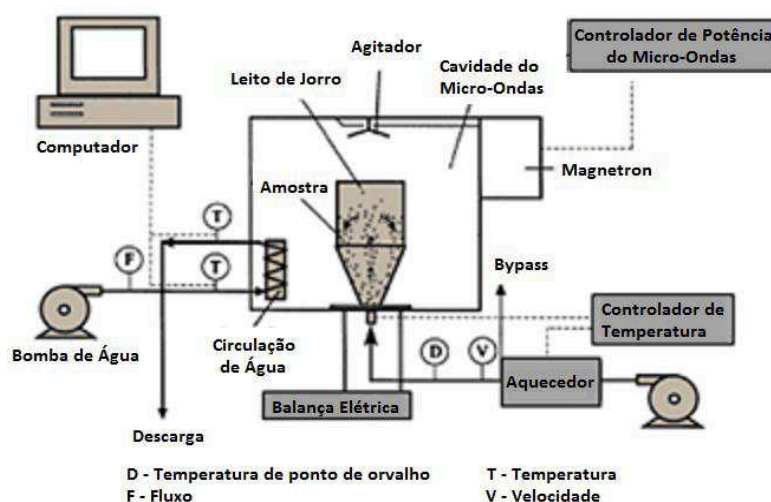


Figura 2.4: Esquema do sistema de secagem por micro-ondas e leito de jorro
(Adaptado de FENG e TANG, 1998).

2.4.4 Tambor rotativo

O secador rotativo é largamente aplicado nas indústrias, principalmente por favorecer uma secagem homogênea devido ao alto grau de mistura das partículas (LANGRISH *et al.*, 2002; LISBOA *et al.*, 2007) e pela possibilidade de obter produtos de qualidades uniformes (SONG *et al.*, 2003).

Wang (2009) propôs a secagem de grãos de soja através de secador rotativo com aquecimento por micro-ondas e com injeção de corrente de ar. Um forno de micro-ondas doméstico operando a 2400 MHz foi utilizado como fonte de energia de micro-ondas. Um tambor feito de material acrílico transparente foi confeccionado com 150 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. Tal esquema está representado na Figura 2.5. O autor observou que a adição de ventilação forçada conseguiu aumentar a remoção de umidade dos grãos de soja em comparação ao aquecimento realizado unicamente por micro-ondas. Porém, taxas de fluxo de ar muito elevadas podem rachar e quebrar as sementes.

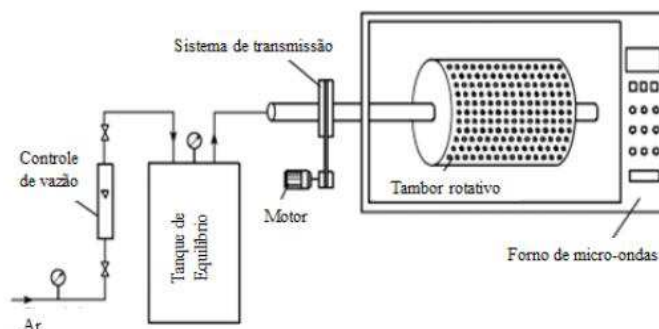


Figura 2.5: Esquema de um secador rotativo com aquecimento híbrido
(Adaptado de WANG, 2009).

Sebben (2015) utilizou tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas para a realização de experimentos de desidratação de batata-doce e verificou que a movimentação no interior do forno favoreceu a uniformidade no aquecimento das amostras.

Tendo em vista que o estudo de secagem em micro-ondas associado a tambor rotativo encontra-se pouco difundido e com poucas informações, e que este sistema permite diferentes adaptações que podem contribuir para a melhoria da operação, essa associação foi escolhida para ser estudada no presente trabalho. Nesta dissertação, é avaliada, também, a qualidade do produto final por meio dos teores de compostos bioativos, verificando o impacto e a viabilidade desse método de secagem na qualidade dos resíduos de acerola processados.

2.5 Estudo da dinâmica das partículas

2.5.1 Dispersão das partículas

O movimento que a partícula descreve no interior do tambor rotativo, tanto na direção radial quanto na axial, está relacionado às condições operacionais (como grau de enchimento e velocidade de rotação) e às propriedades da partícula (como densidade, teor de umidade, forma e ângulo de repouso).

2.5.1.1 Dispersão radial

O movimento das partículas no interior de tambores rotativos é fortemente influenciado pela fração de enchimento e pelo número de Froude (GRAJALES, 2014). A fração de enchimento representa a porção do volume do tambor rotativo que é ocupada, expressa em porcentagem volumétrica. A massa a ser utilizada nos procedimentos pode ser calculada pela Equação 2.3, em que d , l , ε , ρ_s e f representam o diâmetro interno do tambor rotativo, o comprimento, a porosidade do leito, a densidade aparente da partícula e o grau de enchimento do tambor, respectivamente.

$$m = \pi \frac{d^2}{4} l (1 - \varepsilon) \rho_s f \quad (2.3)$$

O número de Froude (Fr) é um parâmetro adimensional resultante da razão entre a força centrífuga pela aceleração gravitacional (MELLMANN, 2001), definido pela Equação 2.4.

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (2.4)$$

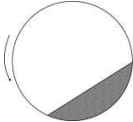



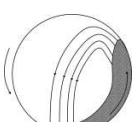

Em que ω , R e g representam, respectivamente, velocidade angular de rotação, raio interno do tambor rotativo e aceleração da gravidade.

Van Puyvelde *et al.* (1999) estudaram a dinâmica de mistura de xisto em tambor rotativo, variando a velocidade de rotação de 5 a 15 rpm, o tamanho da partícula de 0,89 a 5,08 mm e a carga de tambor de 10 a 40% em volume. Observou-se que o estado estacionário foi alcançado em menos de 30 s. A taxa de mistura aumentou exponencialmente com a velocidade de rotação, diminuiu linearmente com o aumento do tamanho da partícula e aumentou linearmente com a carga do tambor. O tempo para se atingir o estado estacionário

não variou com a velocidade de rotação, mas aumentou com a diminuição do tamanho de partícula e aumentou com a carga do tambor.

A dinâmica das partículas no interior de tambores rotativos podem caracterizar diferentes regimes de escoamento. Mellmann (2001) estudou a transição desses regimes e a Tabela 2.1 mostra como o autor os ordenou em relação ao grau de enchimento e ao número de Froude. No entanto, essas informações servem para ter uma orientação, pois podem variar de acordo com as características das partículas e do equipamento. O autor também aponta que os regimes que mais comumente ocorrem em secadores e misturadores são “avalanche”, rolamento e cascadeamento.

Tabela 2.1: Principais regimes de escoamento (Adaptado de MELLMANN, 2001).

Regime	Faixa de Número de Froude	Grau de Enchimento	Esquema
Deslizamento	$0 < F_r < 10^{-4}$	$f < 0,1$	
“Avalanche”	$10^{-5} < F_r < 10^{-3}$	$f < 0,1$	
Rolamento	$10^{-4} < F_r < 10^{-2}$	$f > 0,1$	
Cascadeamento	$10^{-3} < F_r < 0,1$	$f > 0,1$	
Catarateamento	$0,1 < F_r < 1$	$f > 0,2$	
Centrifugação	$F_r \geq 1$	$f > 0,2$	

2.5.1.2 Dispersão axial

A mistura na direção axial em tambor rotativo é lenta e caracterizada como uma mistura puramente difusiva, uma vez que a direção da mistura é perpendicular ao plano de rotação das partículas (CARLEY-MACAULY e DONALD, 1962).

Kuo *et al.* (2005) investigaram a influência da velocidade de rotação (10, 20, 30 e 40 rpm), do grau de enchimento (10, 20, 30 e 40%), do tamanho e da elasticidade das partículas nas larguras das bandas segregadas, utilizando partículas de vidro. Os autores observaram que a velocidade de rotação apresentou influência significativa nas condições de enchimento de 10 e 20%, em que as larguras das bandas diminuíram com o aumento da velocidade. Em relação ao efeito do grau de enchimento, as dimensões das bandas diminuíram com o aumento do grau de enchimento em todas as velocidades de rotação estudadas. Os autores também concluíram que há um aumento nas larguras das bandas quando aumenta a razão de tamanho das duas partículas inseridas no tambor rotativo. Para verificar o efeito da elasticidade do material, foram realizados testes com borracha da mesma dimensão que as esferas de vidro. Observou-se que, independentemente da velocidade, as larguras das bandas aumentaram com a elevação do grau de enchimento para as partículas de borracha. Já para as esferas de vidro, aumentaram na transição de enchimento de 10 para 20% e permaneceram constantes para os enchimentos maiores.

2.5.2 Segregação de partículas

A segregação de partículas pode ocorrer por três mecanismos: percolação, fluxo e vibração (RICHARDS, 1966; WILLIAMS e KHAN, 1973). A percolação ocorre quando os poros existentes entre as partículas são grandes o suficiente para permitir que as partículas menores percorram através deles. Este tipo de segregação é dependente do empacotamento do leito, da forma e do tamanho das partículas. A segregação por fluxo surge quando os sólidos granulares são postos em movimento sobre uma superfície inclinada. Dessa forma, as partículas maiores e regulares tendem a atingir os pontos mais baixos da superfície mais facilmente que as partículas mais finas e irregulares. Por sua vez, a segregação por vibração é verificada quando uma mistura de partículas de diferentes tamanhos é exposta à vibração prolongada. Nesse caso, as partículas menores segregam no fundo enquanto as partículas maiores se direcionam ao topo (NITYANAND *et al.*, 1986).

Quando partículas com diferentes propriedades, como tamanho, forma, densidade, rugosidade superficial e elasticidade, são postas em movimento no interior de um tambor

rotativo e, dependendo, também, das condições operacionais, pode ocorrer o fenômeno de segregação radial e segregação axial (SANTOS, 2015). A Figura 2.6 caracteriza a ocorrência de segregação axial pela formação de bandas ao longo do comprimento do tambor rotativo, e de segregação radial através do núcleo de partículas presente na seção transversal.

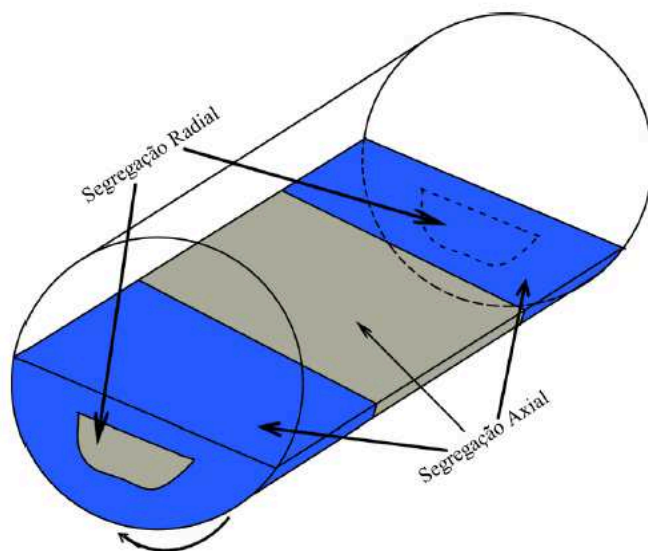


Figura 2.6: Fenômeno de segregação axial e radial em um tambor rotativo (SANTOS, 2015).

Taberlet *et al.* (2006) estudaram segregação de materiais granulares de diferentes tamanhos em um tambor rotativo. Quantificaram o grau de segregação para acompanhar a evolução temporal da formação de bandas axiais. Posteriormente, relacionaram segregação axial e radial e concluíram que a segregação axial é muito mais lenta e, portanto, a contribuição da segregação radial é mais expressiva no processo.

Sanfratello e Fukushima (2009) investigaram experimentalmente misturas binárias que segregaram unicamente devido a diferenças de densidade de partículas e compararam com sistemas que segregaram por efeito de diferenças de tamanho de partículas. Após algumas rotações, observou-se a segregação radial em todos os sistemas estudados. A segregação axial ocorreu apenas por diferença de tamanho das partículas. Nas condições estudadas, os autores concluíram que diferenças de densidade para razões de até 4,9 não induzem segregação axial, quando for o único efeito atuante.

2.5.3 Índice de segregação em processos monofásicos

A mistura de partículas em tambores rotativos é uma operação fundamental nas indústrias farmacêutica e metalúrgica, que objetiva obter misturas com alto grau de

homogeneidade. Nos últimos anos, foram desenvolvidas técnicas de medição para monitorar o processo de mistura transiente, como tomografia por emissão de pósitrons (PEPT) (SEVILLE *et al.*, 2005; LIM *et al.*, 2003), ressonância magnética (MRI) (KAWAGUCHI, 2010) e análise por imagens (LIU *et al.*, 2011; DAUMANN *et al.*, 2009; AISSA *et al.*, 2010). Dentre essas técnicas, a imagem ótica tem as vantagens de simplicidade relativa, baixo custo e potencial uso na planta de processo (DAUMANN *et al.*, 2009). Posteriormente, algoritmos, como o método da Variância (BRIDGWATER, 2012), são empregados para a análise das imagens e consequente cálculo do índice de segregação, que caracteriza a mistura quantitativamente, através da medida da variância das concentrações.

Com o intuito de analisar a capacidade de mistura do equipamento e da amostra, a técnica também é empregada em processos que envolvem partículas da mesma espécie ou com as mesmas propriedades. Grajales (2010) avaliou a mistura de arroz em biorreator rotativo, variando a carga de material (5, 10 e 15 kg), a velocidade de rotação (1, 4 e 7 rpm) e a existência ou não de tubos internos. Para isso, 10% das partículas que ocuparam o biorreator foram tingidas de preto, com tinta de tecido, e o restante representou o arroz branco, sendo todas as partículas posicionadas lado-a-lado (Figura 2.7). O objetivo foi avaliar o número de rotações necessárias para atingir 10% de concentração de arroz preto, através de análise de imagens realizadas pelo *software* Lenseye. Os resultados mostraram que a homogeneidade das partículas foi alcançada após 5, 9 e 11 giros para amostras de 5, 10 e 15 kg, respectivamente. O número de rotações independeu da concentração de traçador, da velocidade de rotação e da presença de tubos alimentadores.

Grajales (2014) seguiu estudando o mesmo biorreator, porém utilizando mistura de bagaço de cana-de-açúcar e farelo de trigo como amostra (substrato). As variáveis analisadas foram grau de enchimento (3, 4,5 e 6 kg), velocidade de rotação (1, 4 e 7 rpm) e existência ou não de tubos internos. Além disso, foi verificado o efeito da umidade, realizando os experimentos a 15 e 75% de umidade da amostra. Para diferenciar as regiões no interior do biorreator, foi utilizado corante denominado Rodamina B. O mesmo *software* anteriormente empregado foi utilizado para analisar as imagens e verificar a quantidade de rotações necessárias para atingir 30% de concentração de amostra tingida. A autora observou que a homogeneidade foi alcançada com 12, 15 e 17 rotações para as condições de 3, 4,5 e 6 kg, respectivamente. Nesse caso, a velocidade de rotação e a existência de tubos internos também não tiveram efeito. Em relação à umidade, maior heterogeneidade foi verificada quando empregado material com 75% de umidade, ou seja, na condição de maior teor de umidade.

Liu *et al.* (2015) compararam dois métodos de análise por imagem, Variância e Contato, utilizando esferas de plástico de 6 mm de diâmetro. As partículas pintadas de vermelho e branco possuíam as mesmas propriedades e foram dispostas na configuração superior-inferior (Figura 2.8). A velocidade de rotação foi fixa em 5,4 rpm. Filmou-se a região transversal do tambor rotativo e as imagens foram analisadas com o auxílio do *software* Image Processing Toolbox, fornecido pelo MATLAB®. Os resultados mostraram que o método “Contato” pode melhorar a precisão de medição em 20%, quando comparado ao método “Variância”, porém requer um tempo computacional adicional em 40%. Portanto, o método a ser escolhido depende das necessidades mais importantes do objetivo do estudo.

Santos (2015) analisou o efeito do equipamento na mistura de esferas de vidro de 6,35 mm de diâmetro, organizadas lado-a-lado. As imagens, referentes à seção transversal, foram analisadas utilizando-se métodos através do *software* ImageJ. O autor não verificou segregação por efeito do equipamento.



Figura 2.7: Configuração lado-a-lado de partículas (GRAJALES, 2010).

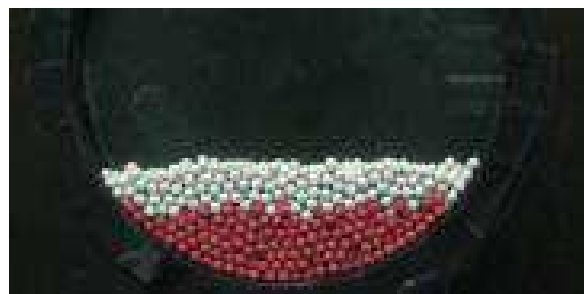


Figura 2.8: Configuração superior-inferior de partículas (LIU *et al.*, 2015).

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Foram utilizados resíduos de acerola, cedidos pela empresa Fruteza, localizada na cidade de Dracena, no estado de São Paulo. O material foi dividido em porções de 0,5 kg, ensacados e envoltos em papel alumínio, para evitar a fotodegradação, e armazenados em freezer a -4°C. Para serem utilizadas nos experimentos, as amostras foram retiradas do freezer com 12 h de antecedência e colocadas em geladeira. A Figura 3.1 mostra os resíduos *in natura*.



Figura 3.1: Resíduo de acerola *in natura*.

3.2 Caracterização físico-química do resíduo de acerola *in natura*

3.2.1 Massa específica aparente

A densidade aparente do material foi obtida pelo método da picnometria, utilizando como fluido o éter de petróleo, cuja densidade é 0,635 g/mL.

3.2.2 Massa específica real

A determinação da densidade real foi realizada por picnometria a gás Hélio, da marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1330. Para realizar essa análise, o resíduo foi previamente seco pelo método da estufa e, após ter sua temperatura estabilizada em dessecador, foi triturado em liquidificador até não apresentar grânulos. O hélio é utilizado por ser inerte e de átomos pequenos, conseguindo penetrar nos poros do material e permitindo, assim, a determinação do volume do sólido com maior precisão.

3.2.3 Porosidade

Com o auxílio de uma proveta de 2000 mL e conhecendo-se a densidade aparente da amostra, obteve-se o volume do resíduo e o volume do recipiente. Através da Equação 3.1, calculou-se o valor da porosidade.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_T} \quad (3.1)$$

Em que:

V_s = volume do sólido;

V_T = volume total.

3.2.4 Determinação do diâmetro da partícula

Para determinação do diâmetro médio de Sauter (\overline{D}_S), a partir da Equação 3.2, foram obtidos dados de peneiramento do resíduo de acerola no seguinte conjunto de peneiras: 1" (25,4 mm), 3/4" (19,1 mm), 1/2" (12,5 mm), 3/8" (9,52 mm), 3,5# (5,66 mm), 4# (4,75 mm) e 5# (3,35 mm).

$$\overline{D}_S = \frac{1}{\sum \frac{\Delta S_i}{D_i}} \quad (3.2)$$

Em que:

ΔS_i = fração mássica das partículas com diâmetro médio (D_i).

3.2.5 Teor de cinzas

O teor de cinzas foi determinado submetendo a amostra, previamente seca pelo método da estufa, à incineração na mufla (DigiMec série FHMP), a 500°C por 3 h.

3.2.6 Açúcar redutor total (ART)

A determinação de açúcares redutores totais foi realizada pela metodologia descrita por Miller (1959). O método consiste na redução do ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) a ácido 3-amino-5-nitrosalicílico, simultaneamente à oxidação dos grupos aldeídos e cetônicos a grupos carboxílicos. Durante o procedimento, o meio adquire uma coloração marrom-alaranjada intensa.

O preparo da solução consiste na adição de 15 g de amostra triturada a 100 mL de água destilada. A amostra foi pesada em balança Shimadzu, modelo BL3200H, com 0,01 g de precisão. Após agitação por 30 min em agitador magnético da marca Fisatom, modelo 751, a solução foi filtrada em papel filtro. Desta solução, 1 mL foi coletado e adicionado a 2 mL de DNS em Tubo Folin-Wu, que permaneceu em banho com água fervente por 5 min. A seguir, os tubos foram resfriados em água gelada, o volume foi completado com água destilada até 25 mL e a mistura foi homogeneizada. Então, foi feita a leitura da absorbância em comprimento de onda de 540 nm em espectrofotômetro V-1200, da marca Pró-análise.

O método foi padronizado por uma curva de calibração de glicose (0,1 a 1,0 mg/mL, em intervalos de 0,1 g/L).

3.2.7 Ângulo de repouso estático

A Figura 3.2 mostra a unidade em que foi realizado o teste. O transferidor, responsável pela indicação do ângulo, foi colocado na superfície fixa. Na superfície móvel, adicionou-se o material e a superfície foi sendo erguida. O ângulo de repouso estático é referente à inclinação no momento em que o material apresenta-se na iminência de deslizamento. Tanto a amostra *in natura* quanto as amostras pintadas com corante foram caracterizadas.



Figura 3.2: Aparato para medição do ângulo de repouso estático.

3.2.8 Ângulo de repouso dinâmico

Foram preenchidos 50% do volume do tambor rotativo (113 mm de diâmetro interno e 260 mm de comprimento) com o resíduo a ser analisado. A velocidade de rotação de 18 rpm foi escolhida por representar um nível intermediário dentro do intervalo de velocidade de rotação estudado. O ângulo de repouso dinâmico foi calculado através do tratamento de imagem com o auxílio do *software* ImageJ.

3.2.9 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Com a finalidade de verificar a estrutura das amostras, visualizando o impacto do aquecimento nos resíduos, foram realizadas análises no microscópio eletrônico de varredura da marca Carlzeiss, modelo EVOMA10. Antes de serem inseridas no equipamento, as amostras foram fixadas nos “stubs” e metalizadas com ouro em metalizador da marca Leica, modelo SCD050.

3.3 Unidade experimental

O aparato experimental foi construído na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, sendo utilizado um micro-ondas doméstico, e suas especificações constam na Tabela 3.1. O tambor rotativo adaptado ao sistema foi confeccionado em acrílico (Figura 3.3), cujas dimensões são apresentadas na Tabela 3.2. Foram empregados acrílico e politetrafluoretileno por serem transparentes à radiação eletromagnética. O tambor rotativo foi perfurado para permitir a saída da umidade. A Figura 3.4 mostra o interior do micro-ondas e demais adaptações realizadas no equipamento. Para o acabamento, empregou-se cola e silicone resistentes à alta temperatura, de modo a vedar a perfuração no corpo do micro-ondas. A Figura 3.5 destaca a conexão do motor ao micro-ondas, através do eixo de rotação do tambor. Na Figura 3.6, é apresentada a vista frontal da unidade experimental utilizada, em que também foi incorporado um inversor de frequência para ajustar a velocidade de rotação do tambor.

O mesmo tambor foi utilizado nos testes relacionados à dinâmica das partículas. Para isso, foi construído um segundo aparato experimental, chamado de unidade de estudo de dinâmica. O aparato é composto por um suporte metálico, que, através de um sistema de polias e com o auxílio do inversor de frequência, permitia o controle da rotação do cilindro, conforme ilustrado na Figura 3.7.

Tabela 3.1: Especificações do micro-ondas.

Marca	Electrolux
Capacidade (L)	31
Cor	Branca
Tensão (V)	220
Frequência de operação (MHz)	2450
Potência útil (W)	1000

Tabela 3.2: Dimensões do cilindro (mm).

Diâmetro interno	113
Diâmetro externo	138
Comprimento	260
Diâmetro da tampa	148,8
Espessura da tampa	7,4



Figura 3.3: Tambor rotativo.



Figura 3.4: Vista interna do micro-ondas adaptado.



Figura 3.5: Vista lateral do sistema com motor conectado ao micro-ondas.



Figura 3.6: Vista dianteira da associação completa.



Figura 3.7: Unidade experimental para os experimentos sobre dinâmica de partículas.

3.4 Segregação de partículas

3.4.1 Planejamento experimental

A fim de calcular o índice de segregação das partículas no interior do tambor rotativo e verificar a influência da velocidade de rotação do tambor, do grau de enchimento do tambor e da umidade das partículas no processo de mistura de resíduos de acerola, foi elaborado um planejamento experimental do tipo composto central (PCC). Nesse estudo, utilizou-se a unidade de estudo de dinâmica e as variáveis escolhidas foram a fração de enchimento e a velocidade de rotação do tambor rotativo. O planejamento foi executado duas vezes, uma para cada valor de umidade do resíduo, sendo 70% e 10%. A escolha de 70% é justificada por ser um teor de umidade próximo ao contido no resíduo *in natura*. Já a umidade de 10% representa um baixo teor de umidade, adequado ao armazenamento e, portanto, próximo à umidade característica do produto seco. As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam, respectivamente, os níveis das variáveis e o planejamento experimental executado.

Tabela 3.3: Níveis das variáveis do PCC na análise de segregação de partículas.

Variável	Níveis				
	-1,4142	-1	0	+1	+1,4142
Fração de enchimento (%)	9	13	22	31	35
Velocidade de rotação (rpm)	2	7	18	29	34

Tabela 3.4: Planejamento composto central para os experimentos de segregação de partículas.

Teste	Fração de Enchimento (%)	Velocidade de Rotação (rpm)
1	13	7
2	13	29
3	31	7
4	31	29
5	9	18
6	35	18
7	22	2
8	22	34
9	22	18
10	22	18

3.4.2 Determinação do índice de segregação

3.4.2.1 Estudo da dinâmica

Com o intuito de verificar a homogeneidade da mistura das partículas no interior do equipamento, o resíduo foi disposto no tambor na condição de completa segregação. Para isso, pintaram-se as amostras de preto e amarelo, utilizando corante alimentício da marca Mix, sendo completamente separadas de acordo com a cor, e dispostas lado-a-lado longitudinalmente (Figura 3.8).

O corante foi escolhido após verificar o aspecto que a partícula assumia ao ser tingida com diferentes materiais. Primeiramente, testou-se a tinta spray, devido à sua fácil aplicação. Porém, o resíduo perdia muita umidade enquanto permanecia ao ar livre para secar a tinta. Posteriormente, optou-se pela tinta de caneta, já que pequena quantidade é suficiente para colorir. No entanto, observou-se que, mesmo em pequenas quantidades, a amostra se tornava mais coesiva, o que modificaria suas propriedades. Por fim, corante alimentício foi selecionado para o teste. Em uma massa de aproximadamente 350 g de resíduo, 80 mL de corante era adicionado. As sementes tingidas foram dispostas em finas camadas em peneiras e expostas ao sol até atingir a umidade desejada. A vantagem desse produto é que, por ser à base de álcool, há rápida fixação do corante e evaporação do álcool, antes que a umidade do resíduo apresente declínio significativo.

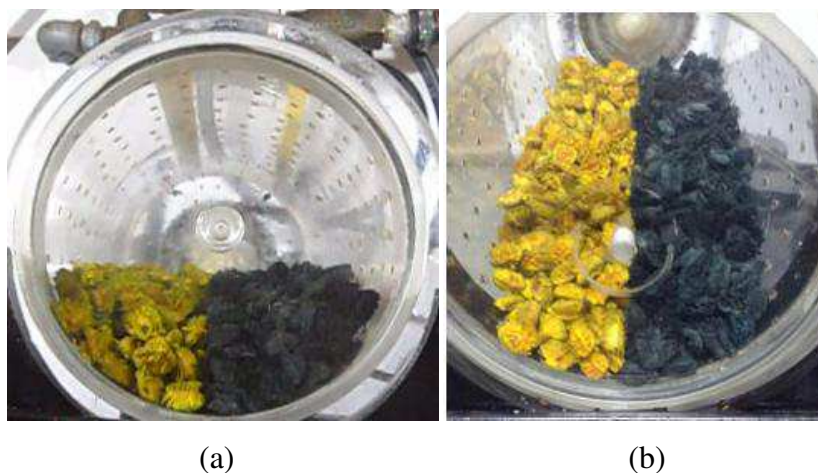


Figura 3.8: Amostras dispostas lado-a-lado nas direções (a) radial e (b) axial.

O tambor foi posto a girar e filmado até o momento em que não se observou, visualmente, variação no grau de mistura. A câmera foi disposta frontalmente para filmar a seção transversal, conforme ilustra a Figura 3.9. A câmera digital é da marca Samsung

(modelo ES68) e tem capacidade de gerar 25 frames/s. O *software* ImageGrab foi utilizado para converter o vídeo em sequência de fotos. Com o auxílio do *software* ImageJ, foi possível calcular o índice de segregação em cada foto, obtendo-se o comportamento ao longo do tempo para cada condição estudada. Como o cálculo da concentração das partículas é baseado em termos de pixels representantes das cores, estas foram escolhidas de forma que gerassem contraste e, conseqüentemente, diferenciação das cores com qualidade. Além disso, não se optou por pintar apenas uma parcela das amostras para diferenciação, mas sim as duas, para evitar que a tinta modificasse as propriedades do resíduo e gerasse segregação por si só. Dessa forma, todas as sementes receberam o mesmo tratamento: foram tingidas na mesma proporção de corante e secas ao sol no mesmo momento para receber o mesmo aquecimento e, assim, atingir o teor de umidade final mais próximo possível.



Figura 3.9: Sistema completo da unidade experimental utilizada para analisar a mistura das partículas.

3.4.2.2 Análise de imagem

Para analisar quantitativamente a homogeneidade da mistura, foi calculado o índice de segregação. A Figura 3.10 ilustra as etapas da análise. Primeiramente, as imagens da seção transversal foram editadas de forma a conter apenas a região de interesse, ou seja, a área que

contivesse partículas. Foram, então, convertidas para 8 bits e configuradas para representarem apenas pixels referentes às cores preta e branca. Posteriormente, as imagens foram divididas em células (gradeamento) e foram calculadas as concentrações de partículas pretas em cada célula. O índice de segregação (I_S) representa o desvio padrão das concentrações de partículas pretas nas células, como representado pelas Equações 3.3 e 3.4 (CHOU *et al.*, 2010). O índice de segregação varia entre 0 e 0,5, sendo que 0 representa a condição de mistura ideal e 0,5, de total segregação.

$$I_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (C_i - C_{média})^2}{N - 1}} \quad (3.3)$$

Em que C_i representa a concentração local de pixels pretos, definida como a fração de área de cada célula. E $C_{média}$ e N representam, respectivamente, a concentração média de pixels pretos, considerando todas as células ocupadas pelas partículas, e o número total de células.

$$C_i = \frac{C_P}{C_P + C_B} \quad (3.4)$$

Sendo C_P a concentração de pixels pretos e C_B , pixels brancos.

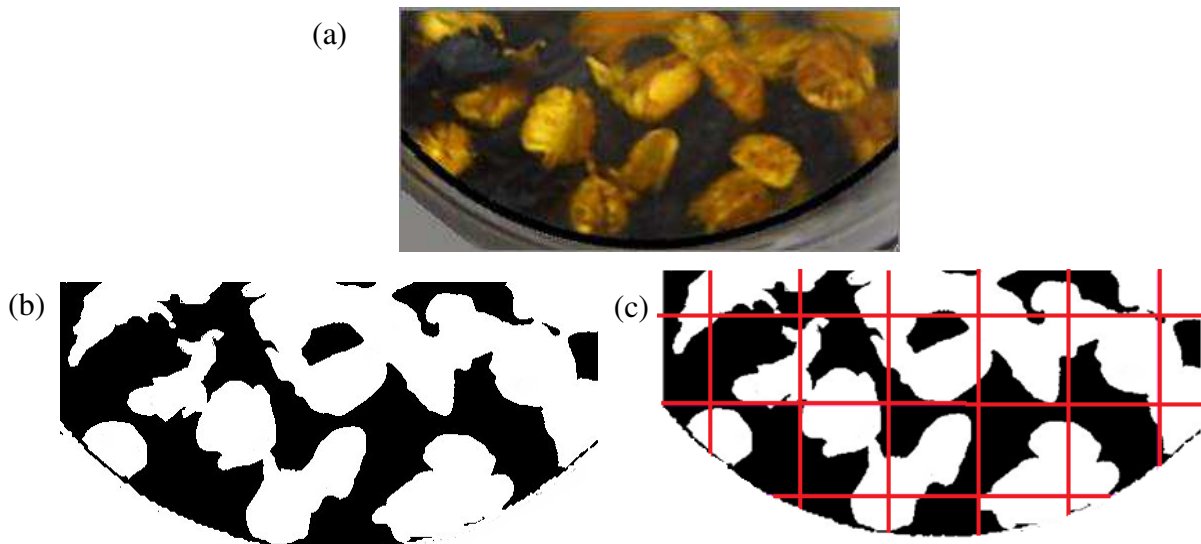


Figura 3.10: Etapas do procedimento para cálculo de índice de segregação: (a) região de interesse do tambor, (b) conversão para 8 bits, (c) gradeamento.

Para definir a quantidade de células virtuais, foram realizados testes variando-se a área destas e calculando-se o índice de segregação, a fim de se obter uma faixa em que a variação fosse mínima, para garantir que o resultado não fosse influenciado pela dimensão da célula. Essa metodologia foi anteriormente empregada por Chou *et al.* (2010), Liu *et al.* (2015) e Santos (2015). A análise por imagem foi realizada em diferentes tempos para cada condição estudada, a fim de se obter o comportamento transiente do índice de segregação.

3.5 Secagem

3.5.1 Influência da potência do micro-ondas e da velocidade de rotação do tambor

Nos procedimentos de secagem, o resíduo *in natura* foi pesado no tambor rotativo e este foi encaixado no suporte dianteiro, no interior do forno de micro-ondas. Foram configurados o tempo de aquecimento (t), a potência do micro-ondas (P) e a velocidade de rotação (v) para dar início ao processo. Concluído o procedimento, o sistema foi desmontado e as amostras, rapidamente armazenadas para evitar a interferência da umidade do ambiente na umidade do produto seco.

Para avaliar o efeito da potência e da velocidade de rotação do tambor na qualidade do resíduo após a secagem, essas variáveis foram estudadas em 3 níveis, constituindo um planejamento fatorial do tipo 3^K , resultando em 9 experimentos. O grau de enchimento foi mantido constante em 13% (fração de volume do tambor que é preenchida) e o tempo de secagem foi de 34 min. O tempo foi escolhido a partir de testes preliminares que demonstraram que, no nível superior de potência, a queima do material se iniciava logo após esse tempo. A Tabela 3.5 mostra os níveis das variáveis estudadas e a Tabela 3.6, as condições experimentais. A potência foi convertida em densidade de potência, que representa potência por unidade de massa (W/ g), devido ao fato de ser uma variável que confere maior sensibilidade à intensidade de aquecimento.

Tabela 3.5: Níveis das variáveis do planejamento (3^K) para os experimentos de secagem.

Variável	Níveis		
	-1	0	+1
Potência (W)	200	300	400
Velocidade de rotação (rpm)	15	30	45

Tabela 3.6: Planejamento experimental (3^K) para os experimentos de secagem.

Teste	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais		
	x_1	x_2	Potência (W)	Densidade de Potência (W/g)	Velocidade de Rotação (rpm)
1	-1	-1	200	1,41	15
2	-1	0	200	1,41	30
3	-1	+1	200	1,41	45
4	0	-1	300	2,12	15
5	0	0	300	2,12	30
6	0	+1	300	2,12	45
7	+1	-1	400	2,82	15
8	+1	0	400	2,82	30
9	+1	+1	400	2,82	45

3.5.2 Influência da fração de enchimento e da velocidade de rotação do tambor

Para a análise do efeito da fração de enchimento e da velocidade de rotação do tambor, foi estruturado um Planejamento Composto Central (PCC), com 2 variáveis e 2 réplicas no ponto central, totalizando 10 experimentos. A secagem foi realizada nas condições de potência de 300 W e tempo de 45 min. Os níveis estão apresentados na Tabela 3.7 e as condições operacionais de cada caso do planejamento, na Tabela 3.8. Semelhante ao caso anterior, o tempo foi escolhido atentando-se à iminência de queima do material, no nível de potência em que os experimentos foram executados. No planejamento experimental anterior, a potência máxima aplicada foi de 400 W. No presente planejamento experimental, a potência foi mantida fixa em 300 W. O tempo de secagem foi diferente nos dois conjuntos de experimentos devido a essas diferenças de potências, ou seja, na condição de potência de 300 W, as amostras suportam um tempo de aquecimento superior ao quando submetidas à condição de potência de 400 W.

Tabela 3.7: Níveis das variáveis do PCC para os experimentos de secagem.

Variável	Níveis				
	-1,4142	-1	0	+1	+1,4142
Fração de enchimento (%)	9	13	22	31	35
Velocidade de rotação (rpm)	7	12	24	36	41

Tabela 3.8: Planejamento composto central para os experimentos de secagem.

Teste	Variáveis Codificadas		Variáveis Reais	
	x_3	x_2'	Fração de Enchimento (%)	Velocidade de Rotação (rpm)
1	-1,0000	-1,0000	13	12
2	1,0000	-1,0000	31	12
3	-1,0000	1,0000	13	36
4	1,0000	1,0000	31	36
5	-1,4142	0,0000	9	24
6	1,4142	0,0000	35	24
7	0,0000	-1,4142	22	7
8	0,0000	1,4142	22	41
9	0,0000	0,0000	22	24
10	0,0000	0,0000	22	24

3.6 Análises físico-químicas

A fim de caracterizar o produto, após a operação de secagem, e compará-lo à amostra *in natura*, verificando a viabilidade do processo, foram realizadas análises físico-químicas. Todas as análises foram executadas em triplicata. Os dados obtidos experimentalmente foram analisados estatisticamente, com o auxílio do *software* Statistica.

3.6.1 Umidade

Determinou-se a umidade do material por meio do método da estufa. A amostra foi mantida em estufa (Marconi, modelo MA033) a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 h (AOAC, 1995).

3.6.2 Atividade de água

Obtida pelo equipamento LabTouch-aw (Figura 3.11), em que, através de um sistema de controle de temperatura integrado a um sensor infravermelho, fornece leituras precisas do valor da atividade de água das amostras.



Figura 3.11: Instrumento de medição de atividade de água.

3.6.3 Compostos bioativos

Os compostos bioativos analisados foram: teor de fenólicos totais, teor de flavonoides totais e ácido ascórbico. A técnica foi aplicada para o resíduo *in natura* e para os produtos da secagem, a fim de verificar o impacto das variáveis operacionais. A metodologia foi executada em ambiente com reduzida iluminação, para evitar a degradação dos compostos. As amostras foram previamente trituradas e pesadas em balança analítica com precisão de 10^{-4} g, da marca Shimadzu, modelo AY220. Para obter o teor de fenólicos e flavonoides, o extrator empregado foi o metanol. O extrator foi adicionado à amostra triturada e a solução foi agitada em vórtex QL-901 da Biomixer por 3 min. A seguir, foi armazenada no escuro por 1 h e filtrada em papel filtro. Para verificar o conteúdo de ácido ascórbico, o extrator empregado foi o ácido oxálico. Após agitação em vórtex por 3 min, a solução foi imediatamente filtrada. Os sobrenadantes foram utilizados para realizar as análises descritas a seguir.

3.6.3.1 Teor de fenólicos totais

A concentração de fenólicos totais foi obtida pelo método de *Folin Ciocalteu* (SINGLETON e ROSSI, 1965), usando ácido gálico para construção da curva analítica. O reagente de *Folin-Ciocalteu* é uma solução de íons complexos poliméricos formados a partir de heteropoliácidos fosfomolibdicos e fosfotúngsticos. Esse reagente oxida os fenolatos, reduzindo os ácidos a um complexo azul Mo-W (SILVA, 2015). O resultado, dado por leitura em espectrofotômetro, é expresso em equivalentes de mg de ácido gálico /100 g de amostra em base seca. A leitura em espectrofotômetro foi realizada em 622 nm.

3.6.3.2 Teor de flavonoides totais

A composição de flavonoides totais foi determinada pelo método colorimétrico de Zhishen *et al.* (1999). Esse método utiliza o cloreto de alumínio ($AlCl_3$) como agente de deslocamento para diminuir a interferência de outros compostos na leitura de absorbância da solução. A rutina foi utilizada como padrão para a obtenção da curva de calibração e as leituras de absorbância foram realizadas a 450 nm. Os resultados foram expressos em mg de rutina / 100 g de amostra em base seca.

3.6.3.3 Teor de ácido ascórbico

O teor de ácido ascórbico foi obtido através do método de Dürust *et al.* (1997), com algumas adaptações. Foi utilizado ácido ascórbico como padrão analítico e leitura em

espectrofotômetro, em comprimento de onda de 520 nm. Os resultados foram dados em mg de ácido ascórbico/ 100 g de amostra em base seca.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização físico-química do resíduo de acerola *in natura*

Os resultados obtidos na caracterização do resíduo *in natura*, assim como dados disponíveis na literatura, estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Caracterização do resíduo de acerola *in natura* e comparação com a literatura.

Análise	Resultado	Literatura
Umidade (%)	78,57±1,03	80,84±1,3 ¹ 79,38±1,46 ²
Teor de Açúcar Redutor Total (g glicose/ 100 g de sólido seco)	2,66±0,02	1,83±0,07 ¹ 2,13±0,08 ² 2,50±0,1 ³
Teor de Cinzas (g/100 g de sólido úmido)	2,874±0,049	2,46±0,09 ⁴ 2,17±0,06 ⁵
Densidade Aparente (g/cm ³)	0,813±0,014	0,860±0,010 ⁴ 0,677±0,001 ⁵
Densidade Real (g/cm ³)	1,480±0,009	1,575±0,035 ¹ 1,425±0,009 ⁴ 1,345±0,014 ⁵
Porosidade do Leito de Partículas	0,486±0,032	0,548±0,020 ⁵
Diâmetro Médio de Sauter (mm)	7,51	7,91 ¹ 7,05 ⁵
Ângulo de Repouso Estático (°)	48±1	52±1 ¹ 48±0,20 ⁴ 40,02 ± 2,25 ⁵
Ângulo de Repouso Dinâmico (°)	40,91±1,71	49,3±4,20 ³ 49,29±4,16 ⁵

Fontes: ¹Nogueira (2016); ²Silva (2015 a); ³Nóbrega (2012); ⁴Silva (2014); ⁵Bortolotti (2012)

Pela metodologia descrita no item 3.6.2 do Capítulo 3, foram obtidos resultados de atividade de água para amostras de resíduos de acerola em diferentes níveis de umidade, a fim

de relacionar a probabilidade de proliferação microbiana com o teor de umidade do produto. O gráfico que representa a curva descrita consta na Figura 4.1. Observa-se que, quanto mais úmido o material, maior a atividade de água, conforme esperado. Também se verifica que a atividade de água de 0,6, indicada como o valor máximo para um bom condicionamento do material, é obtida em conteúdo de umidade próximo a 12%.

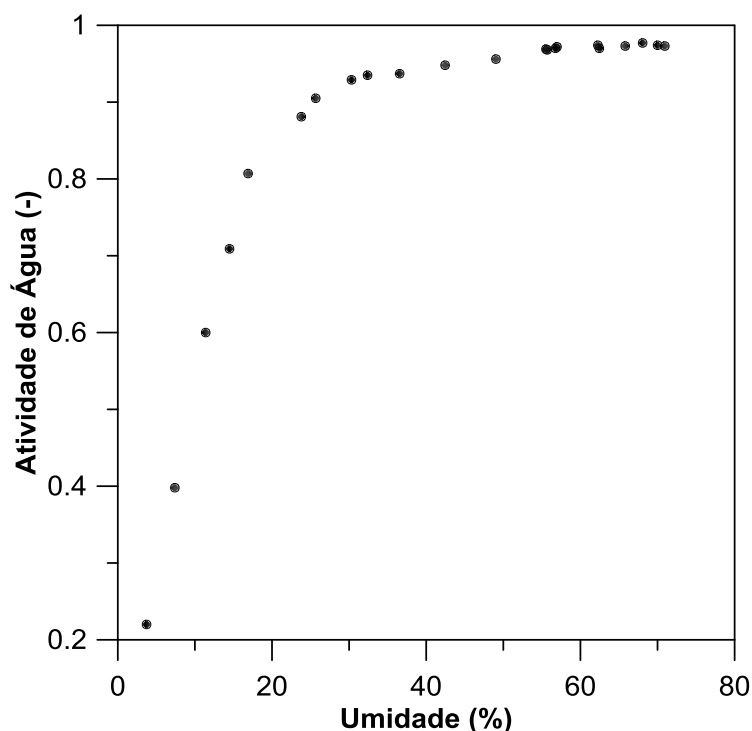


Figura 4.1: Atividade de água em função do teor de umidade do resíduo de acerola.

Na análise do teor de compostos bioativos, foi verificada a concentração de fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico. O teor de fenólicos totais encontrado foi de $225,56 \pm 8,48$ mg de ácido gálico/ 100 g de amostra. Silva (2015 a) obteve $446,4 \pm 16,8$ mg/ 100 g e Sousa *et al.* (2011) determinaram que o teor de fenólicos totais nos resíduos de polpa de acerola foi de $247,6 \pm 2,1$ mg/ 100 g. Segundo Vasco (2009), produtos que apresentam teor de fenólicos abaixo de 100 mg/ 100 g são classificados como de baixa concentração e aqueles que possuem composição acima de 1000 mg/ 100 g são considerados de alta concentração. Portanto, o resíduo em questão apresenta concentração intermediária de fenólicos.

O teor de flavonoides totais para o resíduo de acerola *in natura* foi de $1,21 \pm 0,02$ mg de rutina/ 100 g de amostra e encontra-se próximo a valores disponibilizados na literatura: 0,8 mg/ 100 g (BORTOLOTTI, 2012), $1,00 \pm 0,14$ mg / 100 g (SILVA, 2014), $1,618 \pm 0,097$ mg/ 100 g (NOGUEIRA, 2016) e $1,650 \pm 0,015$ mg/ 100 g (SILVA, 2015 a).

Em relação ao ácido ascórbico, o resultado obtido para a amostra *in natura* foi de $509,44 \pm 46,43$ mg de ácido ascórbico/ 100 g de amostra. Nogueira (2016) encontrou $387,33 \pm 19,04$ mg/ 100 g e Silva (2015 a) determinou $1002,38 \pm 13,80$ mg/ 100g.

Portanto, o resíduo apresenta considerável concentração de compostos antioxidantes, o que justifica os estudos voltados para o seu reaproveitamento. A diferença nos resultados encontrados para os três compostos bioativos, assim como para as demais propriedades determinadas, ocorre devido a diferentes fatores, como forma de plantio do fruto, clima e vegetação da localização geográfica do cultivo, processamento industrial, armazenamento e transporte, além de possíveis diferenças entre as metodologias empregadas em cada estudo.

4.2 Estudo da dinâmica das partículas

Com o intuito de estudar apenas a dinâmica das partículas, nesta etapa do projeto, o tambor rotativo não foi acoplado ao interior do micro-ondas. Os experimentos foram realizados na unidade de estudo de dinâmica, como foi apresentado anteriormente na Figura 3.7. A associação com micro-ondas foi executada apenas durante os processos de secagem.

Caracterização das partículas tingidas:

A Tabela 4.2 apresenta os valores de ângulo de repouso estático e ângulo de repouso dinâmico do resíduo tingido para as duas umidades empregadas no processo (10% e 70%). Como esperado, o ângulo de repouso dinâmico diminuiu com a redução do teor de umidade, pois as partículas se tornam menos coesas. A proximidade do ângulo de repouso dinâmico do resíduo tingido e com 70% de umidade (39°) e do resíduo *in natura* e sem corante ($40,91^\circ$) mostra que o processo de tingimento não alterou a propriedade dinâmica do material.

Tabela 4.2: Caracterização dos ângulos de repouso do resíduo de acerola com corante.

Umidade	Ângulo de Repouso Estático	Ângulo de Repouso Dinâmico
70%	44°	39°
10%	32°	33°

4.2.1 Índice de segregação para resíduos de acerola

4.2.1.1 Movimento axial

As Figuras 4.2 a 4.6 mostram vistas longitudinais do tambor, obtidas quando o estado estacionário já tinha sido estabelecido, em diferentes condições operacionais. Observa-se, nestas imagens (Figuras 4.2 a 4.6), que as partículas estão aleatoriamente distribuídas em todas as condições estudadas, ou seja, não foi detectada segregação axial.



Figura 4.2: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 9% de grau de enchimento e 18 rpm.



Figura 4.3: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 13% de grau de enchimento e (a) 7 rpm e (b) 29 rpm.

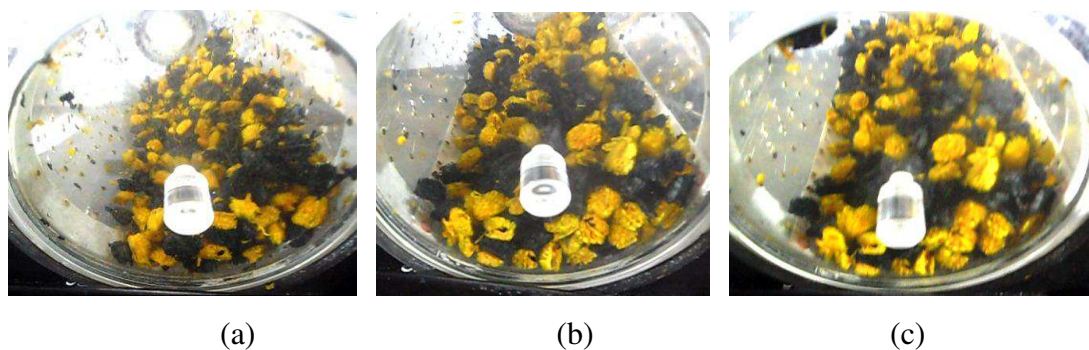


Figura 4.4: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 22% de grau de enchimento e (a) 2 rpm, (b) 18 rpm e (c) 34 rpm.



Figura 4.5: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 31% de grau de enchimento e (a) 7 rpm e (b) 29 rpm.



Figura 4.6: Vista longitudinal do tambor rotativo na condição de 35% de grau de enchimento e 18 rpm.

4.2.1.2 Movimento radial

O índice de segregação radial em função do tempo foi calculado em 5 níveis de velocidade de rotação e grau de enchimento, conforme definido pela matriz de planejamento do tipo composto central apresentada no Capítulo 3. A Figura 4.7 mostra a seção transversal do tambor rotativo para as 5 frações de enchimento estudadas.



Figura 4.7: Seção transversal do tambor rotativo com grau de enchimento de 9, 13, 22, 31 e 35%, respectivamente.

Os regimes de escoamento identificados visualmente em cada condição analisada estão relatados na Tabela 4.3, com os respectivos números de Froude (Fr).

Tabela 4.3: Regimes de escoamento observados em cada condição do PCC.

Teste	Fração de Enchimento (%)	Velocidade de rotação (rpm)	Fr (-)	Regime de Escoamento
1	13	7	$3,10 \cdot 10^{-3}$	“Avalanche”
2	13	29	$5,32 \cdot 10^{-2}$	Rolamento
3	31	7	$3,10 \cdot 10^{-3}$	“Avalanche”
4	31	29	$5,32 \cdot 10^{-2}$	Rolamento
5	9	18	$2,05 \cdot 10^{-2}$	“Avalanche”
6	35	18	$2,05 \cdot 10^{-2}$	Rolamento
7	22	2	$2,53 \cdot 10^{-4}$	“Avalanche”
8	22	34	$7,31 \cdot 10^{-2}$	Rolamento
9	22	18	$2,05 \cdot 10^{-2}$	Rolamento

De acordo com a Tabela 4.3, observa-se que o regime de escoamento é mais dependente da velocidade de rotação do tambor do que do grau de enchimento. Por exemplo, tanto com 13% quanto com 31% de enchimento, o regime de escoamento a 7 rpm foi de “avalanche” e a 29 rpm, rolamento. Nos experimentos de Xavier *et al.* (2009), operando nos regimes de rolamento e cascadeamento, os autores concluíram que a determinação dos regimes ocorreu apenas por influência da frequência de rotação. Com exceção da condição de fração de enchimento de 9%, a partir do nível intermediário de velocidade de rotação (18 rpm), foi observado o regime de rolamento. Com 9% do volume preenchido, notou-se que as partículas descreveram uma trajetória contida no intervalo de transição “avalanche”-rolamento, porém o regime de “avalanche” foi mais característico.

Determinação da dimensão da célula:

Conforme mostrado na Figura 3.10 do capítulo anterior, a imagem em análise é gradeada, ou seja, dividida em porções denominadas células, que são representadas pelos quadrados vermelhos. Esse procedimento é realizado para permitir o cálculo do desvio padrão da concentração de pixels pretos. De acordo com Huang e Kuo (2012), o índice de segregação está diretamente relacionado à concentração de partículas nas células e, portanto, ao tamanho destas. Por isso, para calibração da área das células, calculou-se o índice de segregação variando-se a dimensão destas, a fim de se obter um intervalo em que este fosse mantido praticamente constante, como indicativo de que o tamanho das células não influenciou nos resultados. Através da Figura 4.8, observa-se que o índice de segregação diminuiu com o aumento do tamanho da célula e, a partir de, aproximadamente, 10000 pixels², a variação tornou-se reduzida. Com isso, optou-se por fixar a área de 13000 pixels², por representar um valor próximo ao centro do intervalo de baixa variação encontrado.

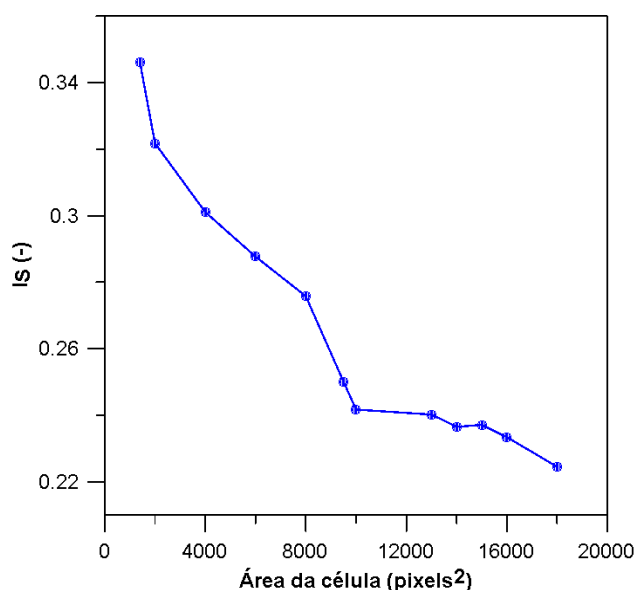


Figura 4.8: Influência da dimensão da célula no índice de segregação.

Índice de segregação para partículas regulares:

A capacidade de mistura de uma partícula está relacionada a suas propriedades físicas. O resíduo de acerola é uma amostra rugosa e de formato irregular. Portanto, a título de comparação, foram realizados experimentos, no mesmo tambor rotativo, com esferas de vidro de 6,35 mm de diâmetro. Assim, obteve-se uma referência do valor do índice de segregação no estado estacionário para partícula totalmente esférica e regular. A Figura 4.9 apresenta o comportamento do índice de segregação em função do tempo para as esferas de vidro. Nota-se que, no estado estacionário, o índice de segregação permanece em valores próximos a 0,16. Santos (2015), em seu estudo sobre o efeito do equipamento na mistura das mesmas partículas, obteve valores semelhantes e observou que não houve segregação. Esta análise permite concluir que não ocorre segregação devido ao efeito do equipamento. Além disso, possibilita considerar o valor de índice de segregação em torno de 0,16 como referência padrão para estudar a dinâmica de partículas no tambor rotativo em questão.

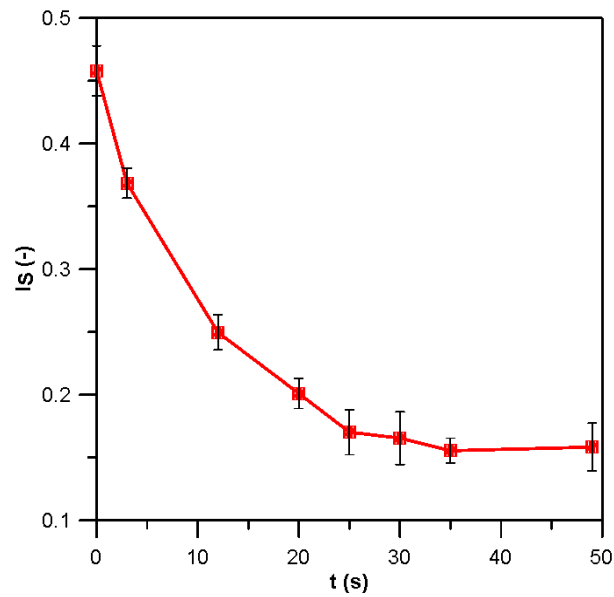


Figura 4.9: Índice de segregação para esferas de vidro.

a) **Análise do efeito do grau de enchimento e da velocidade de rotação**

▪ **Resíduos com 70% de teor de umidade:**

As Figuras 4.10 a 4.12 representam a influência da velocidade de rotação no índice de segregação, mantendo-se constante o grau de enchimento. Nas Figuras 4.13 a 4.15, acompanha-se o comportamento do índice de segregação ao longo do tempo quando há variação do grau de enchimento e fixa-se a velocidade de rotação.

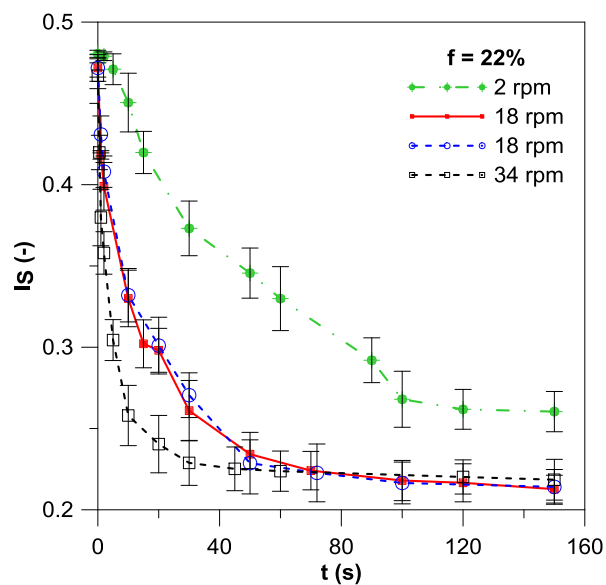


Figura 4.10: Variação transiente do I_s a $f = 22\%$ e $v = 2, 18$ e 34 rpm.

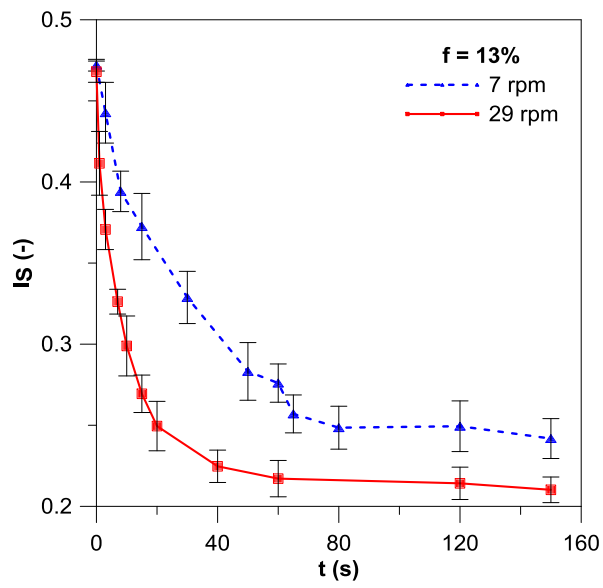


Figura 4.11: Variação transiente do I_s a $f = 13\%$ e $v = 7$ e 29 rpm.

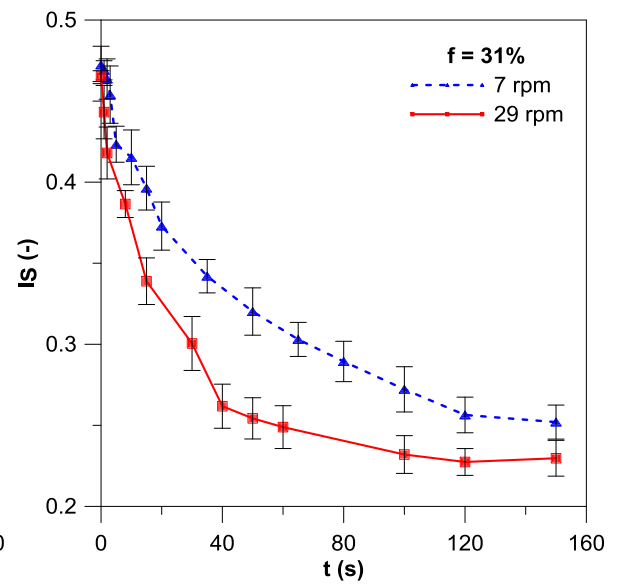


Figura 4.12: Variação transiente do I_s a $f = 31\%$ e $v = 7$ e 29 rpm.

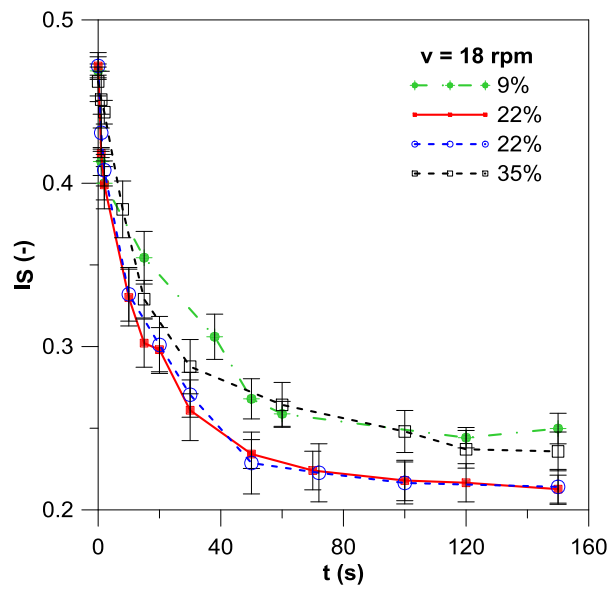


Figura 4.13: Variação transiente do I_s a $v = 18$ rpm e $f = 9, 22$ e 35% .

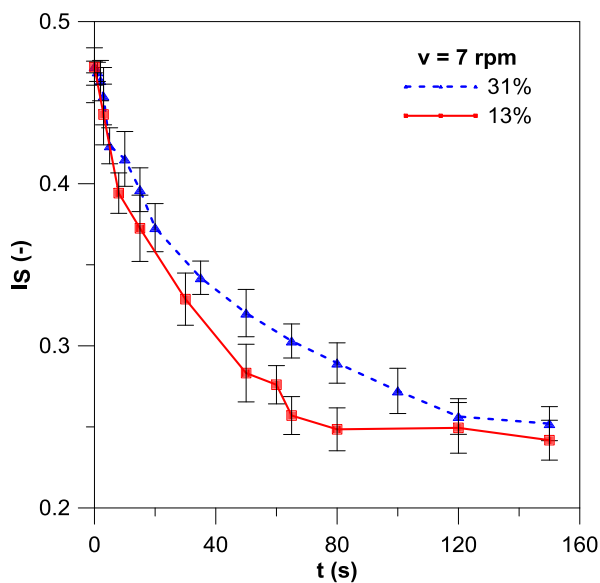


Figura 4.14: Variação transiente do I_s a $v = 7$ rpm e $f = 13$ e 31% .

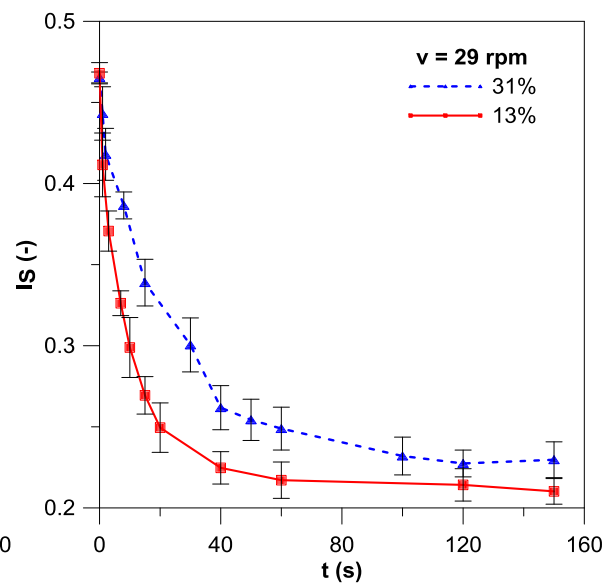


Figura 4.15: Variação transiente do I_s a $v = 29$ rpm e $f = 13$ e 31% .

Em todos os gráficos, apresentados pelas Figuras 4.10 a 4.15, o índice de segregação situa-se inicialmente em torno de 0,5, característico de uma condição de intensa segregação, e decresce exponencialmente ao longo do tempo até atingir o estado estacionário. Percebe-se que os valores alcançados nos respectivos estados estacionários estão acima de zero. Isso ocorre devido à dificuldade de se obter uma mistura perfeita experimentalmente. Conforme a Figura 4.9, até mesmo para partículas perfeitamente esféricas e lisas (esferas de vidro), o índice representa um valor consideravelmente superior a zero (próximo a 0,16), justificando que os resultados obtidos para resíduos de acerola (em torno de 0,2 a 0,26), de estrutura rugosa e formato irregular, são coerentes. Segundo McCabe *et al.* (1991), partículas angulares, aderentes e de forma irregular possuem ângulo de repouso maior, enquanto partículas mais lisas e arredondadas possuem menor ângulo de repouso, facilitando seu movimento.

Em relação à influência da velocidade de rotação, é possível verificar, pela Figura 4.10, seu efeito na condição em que 22% do volume do tambor rotativo são preenchidos. Nota-se que a 2 rpm o índice de segregação obtido no estado estacionário é bem superior que os resultados para 18 rpm (réplica do ponto central do PCC) e 34 rpm. A justificativa é que a elevação da velocidade de rotação permitiu que o regime de “avalanche”, estabelecido a 2 rpm, transitasse para o regime de rolamento, que proporciona maior grau de mistura. A

diferença entre as curvas de velocidade de 18 e 34 rpm consta na maior rapidez com que o índice de segregação se torna constante a 34 rpm.

O mesmo argumento é válido para analisar as Figuras 4.11 e 4.12, que representam, respectivamente, as condições de 13% de grau de enchimento a 7 e 29 rpm, e 31% de volume ocupado a 7 e 29 rpm. Em todos os casos, a velocidade de 29 rpm atingiu o estado estacionário antes que a 7 rpm, além de resultar em um índice de segregação inferior. No conjunto em questão, também houve mudança do regime de “avalanche” para rolamento ao passar de 7 para 29 rpm.

Resultados semelhantes, em que a velocidade de rotação favoreceu a mistura das partículas no interior do tambor rotativo, foram encontrados por Puyvelde *et al.* (1999). Os autores empregaram uma metodologia de análise de imagens a partir de métodos fornecidos pelo *software* C++.

Quanto ao efeito do grau de enchimento, a Figura 4.13 mostra os resultados obtidos em condições de 18 rpm e variando-se a fração de enchimento do tambor rotativo em 9, 22 e 35%. O preenchimento de 22% do volume do tambor rotativo gerou índices de segregação mais baixos. Um índice mais elevado encontrado ao carregar 9% do tambor rotativo é justificado pelo fato do regime estabelecido ser de “avalanche”. Apesar de caracterizarem o mesmo regime de escoamento, o preenchimento de 22% do volume do tambor rotativo gerou índice de segregação menor que com 35%. Santos *et al.* (2015) estudaram a influência do grau de enchimento e da velocidade de rotação na espessura da camada ativa, região próxima à superfície do leito, onde as partículas apresentam velocidades mais elevadas. Já a camada passiva é a região próxima à parede do tambor rotativo, sendo que nesta camada as partículas se movimentam apenas devido à velocidade de rotação, influenciadas pela parede do equipamento. Os autores concluíram que, fixando-se o grau de enchimento e aumentando-se a velocidade de rotação, ocorre um aumento na magnitude da velocidade das partículas tanto na região ativa quanto na região passiva. Porém, ao fixar a velocidade de rotação do tambor e aumentar o grau de preenchimento, ocorre um aumento na magnitude da velocidade das partículas apenas na região ativa. Ou seja, a velocidade resultante pode aumentar, caso a dimensão da camada ativa aumente em proporção maior que a camada passiva, ou diminuir, se, por sua vez, a camada passiva apresentar maior dimensão. Portanto, as duas situações (aumento ou diminuição da velocidade resultante com a elevação do grau de enchimento) são fisicamente coerentes, e a ocorrência de um ou outro caso depende de outros fatores, como das propriedades da partícula. A amostra em questão pode ter tido sua eficiência de mistura

reduzida com a elevação do grau de enchimento pelo aumento de partículas na camada passiva.

A mesma justificativa é estendida para esclarecer a Figura 4.15, que representa a condição de 29 rpm para 13% e 31% de grau de enchimento. Na Figura 4.14, que mostra o comportamento sob as condições de 7 rpm e 13 e 31% de fração de enchimento, percebe-se que os índices no estado estacionário foram próximos, sendo que a principal diferença consiste no tempo de estabelecimento do estado estacionário, que foi mais rápido com 13%.

Grajales (2010) verificou a velocidade das partículas em diferentes regiões do biorreator rotativo, variando fração de enchimento e velocidade de rotação do tambor. A autora observou que a velocidade das partículas aumentou com a elevação da velocidade de rotação do tambor. Em relação à fração de enchimento, em alguns casos a velocidade das partículas foi próxima em diferentes graus de enchimento e, em outras situações, menores velocidades foram encontradas em frações de enchimento mais altas.

Portanto, as frações de enchimento que apresentaram melhor comportamento, nas condições estudadas, foram de 13 e 22%. Rodríguez e Sanroman (2006) e Santomaso *et al.* (2004) recomendam trabalhar no máximo com um grau de enchimento de 0,30, pois consideram que, em níveis acima dessa capacidade, a eficiência da transferência de calor e de massa é reduzida.

Pode-se ainda observar que o estado estacionário é atingido mais rapidamente com menores graus de enchimento. Relatos semelhantes são encontrados na literatura. Schutyser *et al.* (2003) estudou mistura de grãos de trigo em um tambor rotativo, empregando Rodamina WT como traçador e técnicas analíticas de avaliação da concentração, e variando-se o grau de enchimento em 33 e 40%. Os resultados obtidos pelos autores reportaram que a homogeneidade foi alcançada após 4 e 8 giros, respectivamente.

Grajales *et al.* (2012) misturaram grãos de arroz cozido em um tambor rotativo de 30 cm de diâmetro interno e 60 cm de comprimento, utilizando corante para tecidos sintéticos como traçador, também com o objetivo de obter a quantidade de rotações necessárias para obter homogeneidade na mistura. Dados mostraram que foram necessárias 5, 9 e 11 rotações para os graus de enchimento de 23, 33 e 40%, respectivamente. Utilizando o mesmo equipamento e visando ao mesmo objetivo, Grajales (2014) detectou a necessidade de 12 rotações para misturar bagaço de cana-de-açúcar e farelo de trigo ocupando 40% do tambor rotativo, 15 rotações para 50% e 17 para 60%.

Santos (2015) analisou o efeito do equipamento sobre a mistura de esferas de vidro, variando grau de enchimento e velocidade de rotação. Preencheu 25 e 50% do volume do tambor rotativo e as velocidades utilizadas foram 5,63, 10,50 e 16,90 rpm. O estado estacionário foi atingido mais rapidamente quanto maior a velocidade aplicada e menor o grau de enchimento. O mesmo autor estudou a transição de regimes de escoamento para diferentes partículas e concluiu que a forma das partículas exerce forte influência na dinâmica das partículas dentro de tambores rotativos.

▪ Resíduos com 10% de teor de umidade:

Para os resíduos com 10% de umidade, tendências semelhantes foram observadas. Velocidades de rotação elevadas favoreceram o processo de mistura. Em relação ao grau de enchimento, menores índices de segregação foram obtidos com menores frações de enchimento, com exceção da condição de 9% de preenchimento, em que foi verificado o regime de “avalanche”. Os gráficos estão apresentados na seção APÊNDICE A.

b) Análise do efeito da umidade

As Figuras 4.16 a 4.24 mostram o índice de segregação em função do tempo para cada condição do planejamento experimental executado, nas duas umidades analisadas (70 e 10%).

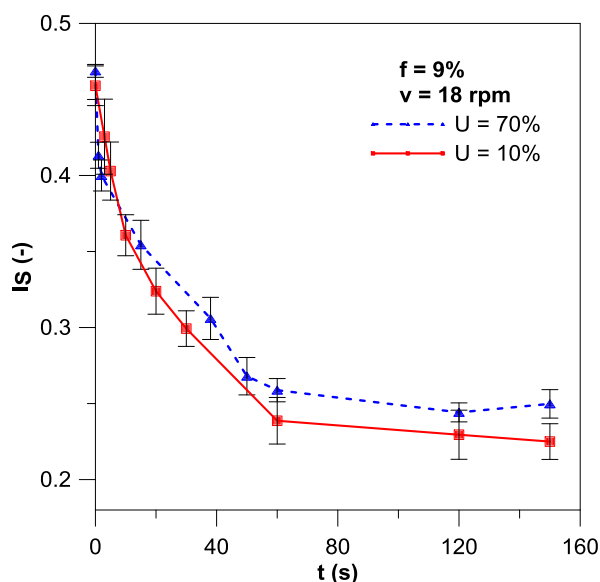


Figura 4.16: Efeito da umidade (f = 9% e v = 18 rpm).

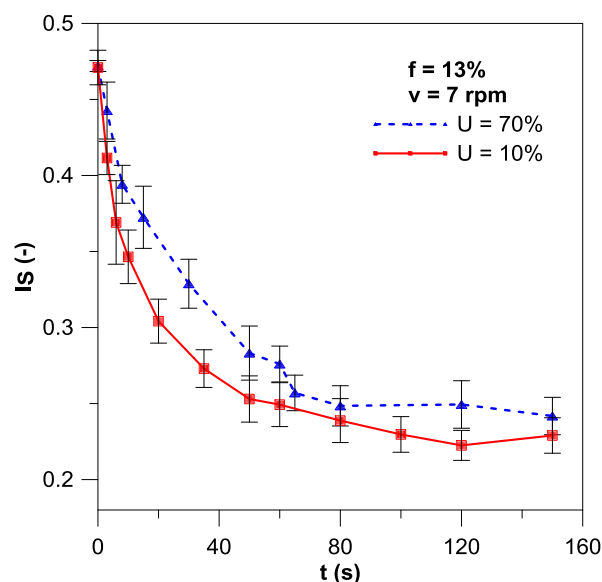


Figura 4.17: Efeito da umidade (f = 13% e v = 7 rpm).

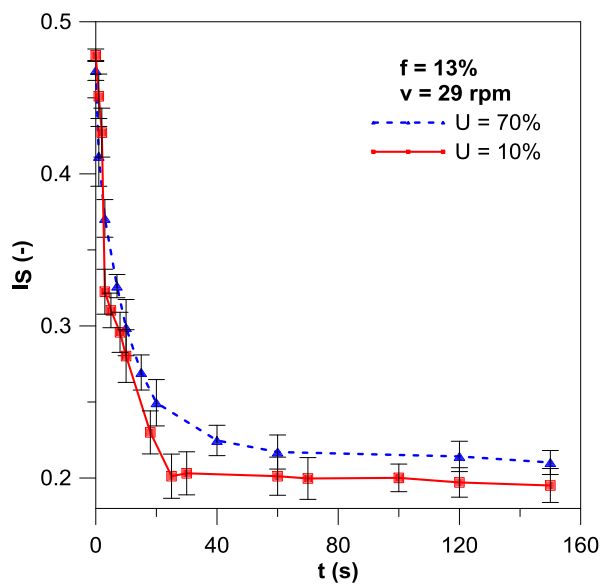


Figura 4.18: Efeito da umidade
($f=13\%$ e $v = 29$ rpm).

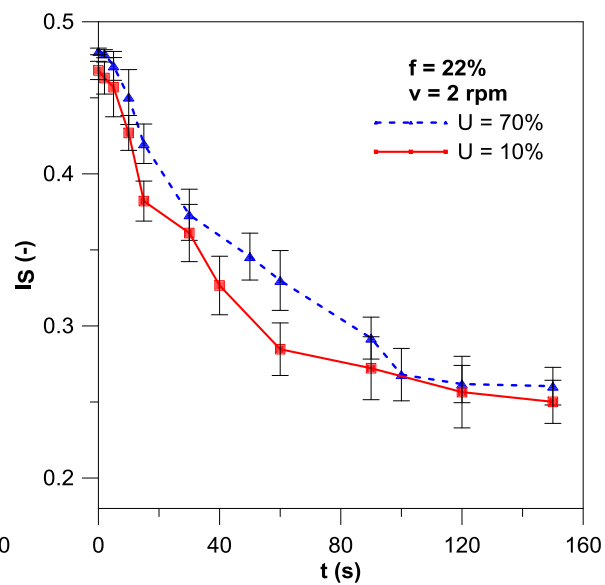
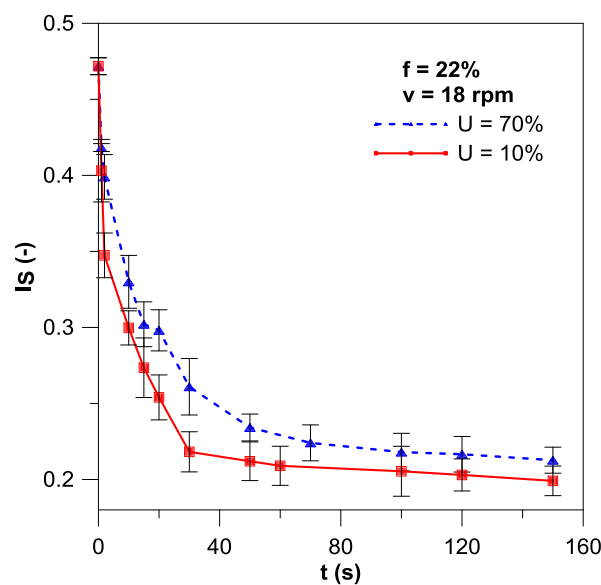
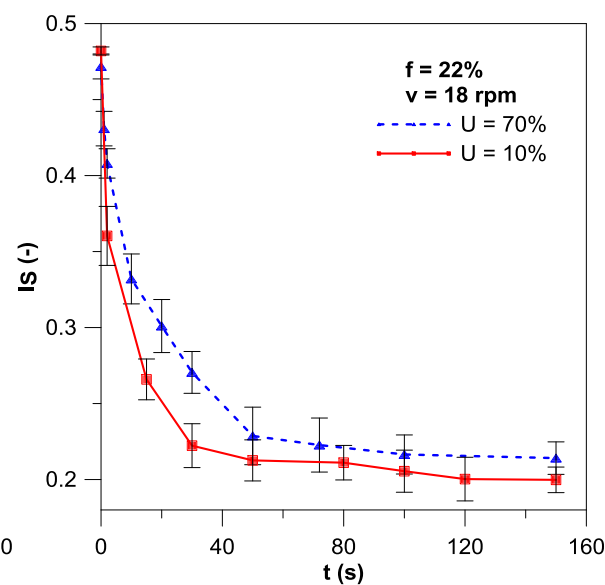


Figura 4.19: Efeito da umidade
($f = 22\%$ e $v = 2$ rpm).



(a)



(b)

Figura 4.20: Efeito da umidade na condição de $f = 22\%$ e $v = 18$ rpm com duas réplicas (a) e (b) no ponto central.

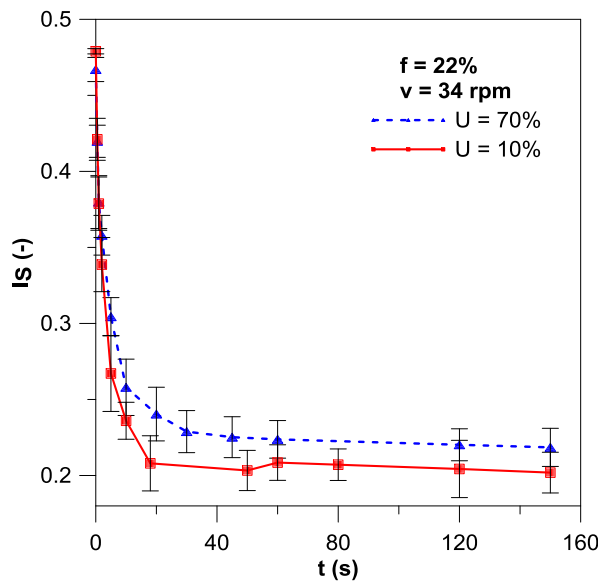


Figura 4.21: Efeito da umidade
($f = 22\%$ e $v = 34 \text{ rpm}$).

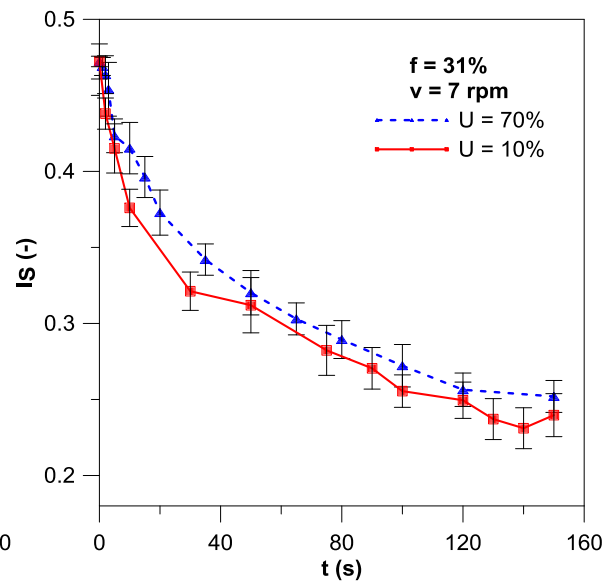


Figura 4.22: Efeito da umidade
($f = 31\%$ e $v = 7 \text{ rpm}$).

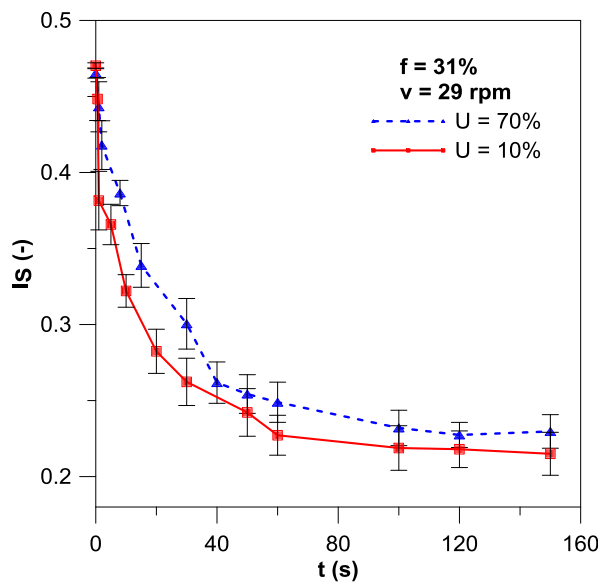


Figura 4.23: Efeito da umidade
($f = 31\%$ e $v = 29 \text{ rpm}$).

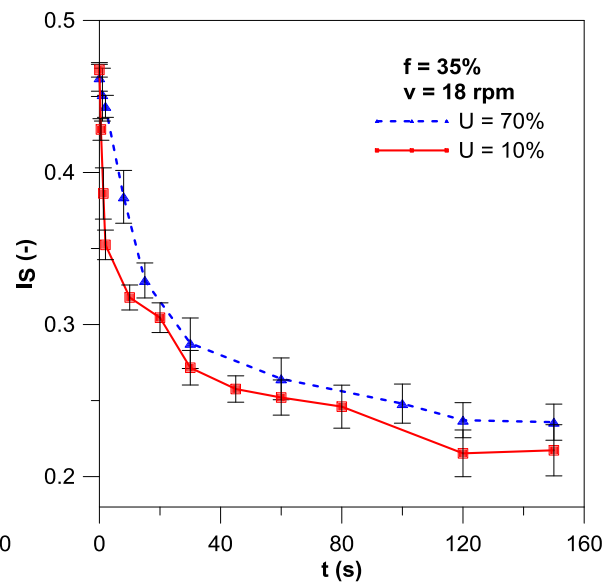


Figura 4.24: Efeito da umidade
($f = 35\%$ e $v = 18 \text{ rpm}$).

Em todos os casos, observa-se que o comportamento foi semelhante, porém a curva representativa do teor de umidade de 10% atingiu um índice de segregação mais baixo, apesar de ser muito próximo ao índice de segregação estabelecido no estado estacionário quando empregado o resíduo com 70% de umidade.

A obtenção de índices de segregação mais baixos pelo resíduo mais seco é justificada pelo menor ângulo de repouso dinâmico caracterizado: 33° para 10% de umidade e 39° para 70% de umidade. A elevação do teor de água em um produto provoca um aumento na coesividade do material, impondo, assim, maior resistência ao deslizamento de uma partícula contra a outra e, conseqüentemente, ocorre um acréscimo em seu ângulo de repouso (SILVA *et al.*, 2006 a). Grajales (2014) investigou a existência de pontos de estagnação em biorreator rotativo, variando a umidade da amostra em 15 e 75%. A autora observou maior heterogeneidade na condição estudada com teor de 75% de umidade.

No entanto, observa-se que os índices de segregação para resíduos com 10% de umidade foram próximos aos obtidos para os resíduos com 70% de umidade. Todas as variações encontram-se abaixo de 10%, correspondendo a um intervalo de 4,06 a 9,93%. Bortolotti (2012), em seu estudo sobre a fluidodinâmica de resíduo de acerola e soja em leito de jorro, verificou a variação do ângulo de repouso com o teor de umidade para resíduos de acerola e concluiu que as diferenças obtidas não foram significativas. É importante destacar que, relacionando-se ao processo de secagem, essa abordagem é interessante, já que mostrou que a dinâmica dos resíduos de acerola em diferentes níveis de umidade não apresentou uma diferença muito expressiva. Ou seja, as sementes úmidas, conforme configuram na etapa inicial do processo, também caracterizam um grau de mistura satisfatório e que este varia pouco ao longo da secagem.

4.3 Secagem

Nesta seção, serão discutidos os resultados experimentais obtidos segundo os planejamentos experimentais propostos, em termos de umidade, atividade de água, teor de fenólicos totais, teor de flavonoides totais e teor de ácido ascórbico. Dessa forma, será avaliada a viabilidade do novo sistema em processos de secagem de resíduos agroindustriais.

4.3.1 Influência da potência do micro-ondas e da velocidade de rotação do tambor

Nesta etapa, verificou-se o efeito da velocidade de rotação do tambor (v) e da densidade de potência do micro-ondas (DP) no processo de secagem de resíduo de acerola. Para isso, o tempo de 34 min e o grau de enchimento de 13% foram mantidos em todos os experimentos. A fração de enchimento foi baseada nos resultados dos testes de dinâmica das

partículas, em que as misturas mais eficientes foram alcançadas em 13% e 22%. Além disso, Baker (1983) relatou que uma carga de 10 a 15% de sólidos no tambor rotativo é adequada em processos de secagem.

Os resultados de umidade removida (M_R) e atividade de água do material seco (A_w) constam na Tabela 4.4. Observa-se que, apenas para as três últimas condições operacionais (testes 7, 8 e 9), os valores de atividade de água foram adequados para o armazenamento, sendo que nestas condições mais de 90% da água foi removida.

O tratamento estatístico foi realizado com as variáveis em suas formas codificadas. As Equações 4.1 e 4.2 mostram a codificação das variáveis. As equações de regressão (Equações 4.3 e 4.4) foram obtidas pelo método de mínimos quadrados através do *software* Statistica, com nível de significância de 15%. Suas respectivas superfícies de resposta estão apresentadas nas Figuras 4.25 e 4.26.

Tabela 4.4: Resultados de umidade removida e atividade de água no planejamento (3^k) para os experimentos de secagem.

Teste	Densidade de Potência (W/g)	Velocidade de rotação (rpm)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Umidade Removida (%)	Atividade de Água (-)
1	1,41	15	78,60±2,07	66,92±1,08	14,85	0,976
2	1,41	30	78,60±2,07	67,24±0,87	14,45	0,977
3	1,41	45	78,60±2,07	65,99±0,78	16,03	0,976
4	2,12	15	80,21±3,64	38,97±2,51	51,42	0,942
5	2,12	30	80,21±3,64	39,75±1,64	50,44	0,943
6	2,12	45	80,21±3,64	36,10±1,89	54,99	0,94
7	2,82	15	79,32±2,76	7,19±3,46	90,94	0,388
8	2,82	30	79,32±2,76	7,06±2,09	91,10	0,381
9	2,82	45	79,32±2,76	6,09±3,08	92,33	0,335

Observa-se, pela superfície de resposta (Figura 4.25), que, quanto maior a densidade de potência, maior a quantidade de água evaporada, conforme esperado. Pela equação de regressão, nota-se que a velocidade de rotação é uma variável estatisticamente significativa, porém sua contribuição é bem menor do que a densidade de potência, conforme pode ser confirmado novamente pela superfície de resposta.

Os resultados de atividade de água mostram uma tendência inversa ao da umidade removida, ou seja, a atividade de água tende a diminuir com o aumento da densidade de potência. Essa análise é coerente, pois, quanto mais seco estiver o produto, menor se torna a

probabilidade de proliferação microbiana. Neste caso, a velocidade de rotação também mostrou influência muito baixa em comparação à densidade de potência.

$$x_1 = \frac{DP - 2,12}{0,71} \quad (4.1)$$

$$x_2 = \frac{v - 30}{15} \quad (4.2)$$

$$M_R = 52,00 + 38,17 \cdot x_1 + 1,02 \cdot x_2 + 1,43 \cdot x_2^2 \quad (4.3)$$

$$R^2 = 0,9994$$

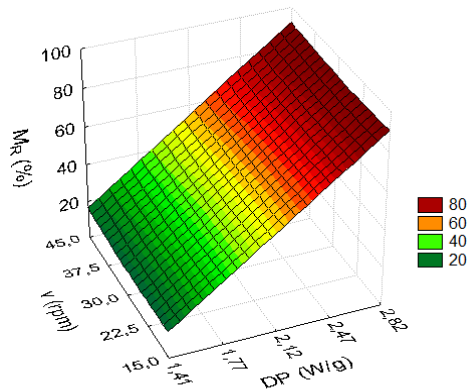


Figura 4.25: Variação de umidade removida em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.

$$Aw = 0,94 - 0,30 \cdot x_1 - 0,27 \cdot x_1^2 - 0,01 \cdot x_2 - 0,01 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0,9994$$

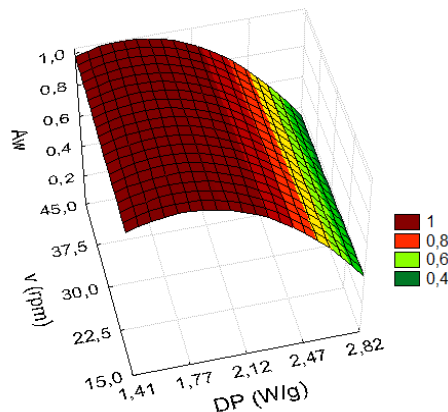


Figura 4.26: Variação de atividade de água em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.

Os teores de fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico obtidos no produto final constam na Tabela 4.5. As Figuras 4.27 a 4.29 mostram, respectivamente, a variação de fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico em função das variáveis densidade de potência e velocidade de rotação.

Tabela 4.5: Resultados de teores dos compostos bioativos no planejamento (3^k) para os experimentos de secagem.

Teste	Densidade de Potência (W/g)	Velocidade de Rotação (rpm)	Fenólicos (mg/ 100 g)	Flavonoides (mg/ 100 g)	Ácido Ascórbico (mg/ 100 g)
1	1,41	15	359,55±13,79	1,39±0,01	247,46±21,96
2	1,41	30	387,48±17,44	1,52±0,02	205,25±53,65
3	1,41	45	382,24±7,74	1,55±0,02	236,77±12,52
4	2,12	15	315,71±7,88	2,03±0,11	716,89±61,47
5	2,12	30	401,06±10,43	1,86±0,05	804,62±11,43
6	2,12	45	338,02±24,46	1,93±0,06	746,07±57,28
7	2,82	15	205,38±9,02	1,27±0,06	1063,62±30,76
8	2,82	30	253,82±13,38	1,47±0,05	1121,41±42,58
9	2,82	45	236,35±15,39	1,67±0,12	1052,22±37,12

Na Figura 4.27, observa-se que houve uma leve degradação do teor de fenólicos totais apenas na condição de 2,82 W/g e 15 rpm, sendo que, em todas as outras situações, as concentrações do composto foram próximas ou superiores a do resíduo *in natura*. Teores mais elevados foram encontrados em níveis de densidade de potência baixo e intermediário, indicando que o aquecimento foi suficiente para extrair os compostos da matriz interna do material, através do rompimento de fibras e outras estruturas internas (CHISM e HAARD, 1996). Quando exposto à densidade de potência mais alta, houve diminuição do teor de fenólicos em relação aos níveis inferior e intermediário. Em relação à velocidade de rotação, observa-se que maiores concentrações foram encontradas em velocidades média ou alta. Em todos os níveis de densidade de potência, o menor teor obtido correspondeu à condição de velocidade mais baixa.

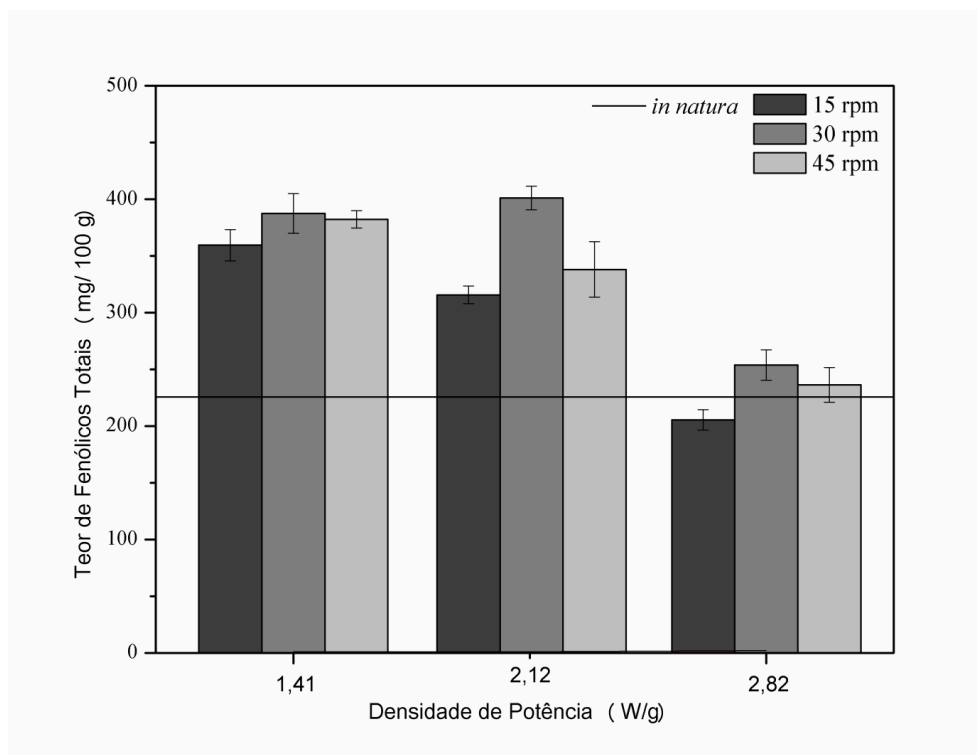


Figura 4.27: Teor de fenólicos totais em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.

Analisando-se os flavonoides (Figura 4.28), observa-se que maiores concentrações foram obtidas na densidade de potência intermediária (2,12 W/g). Em todas as condições estudadas, a concentração de flavonoides foi próxima ou superior à concentração do resíduo *in natura*, sendo que este aumento ocorre devido à ruptura das células internas do material, facilitando a liberação destes compostos da matriz interna e auxiliando na retenção dos mesmos na região porosa. Nota-se, também, que, na maioria dos casos, houve aumento da concentração de flavonoides em velocidades mais altas. Isso pode ser justificado pelo aumento da homogeneidade do processo de secagem, evitando que algumas sementes recebam aquecimento excessivo, o que poderia causar sua degradação e diminuição do teor do composto, e outras recebessem aquecimento insuficiente para romper suas fibras e disponibilizar os compostos.

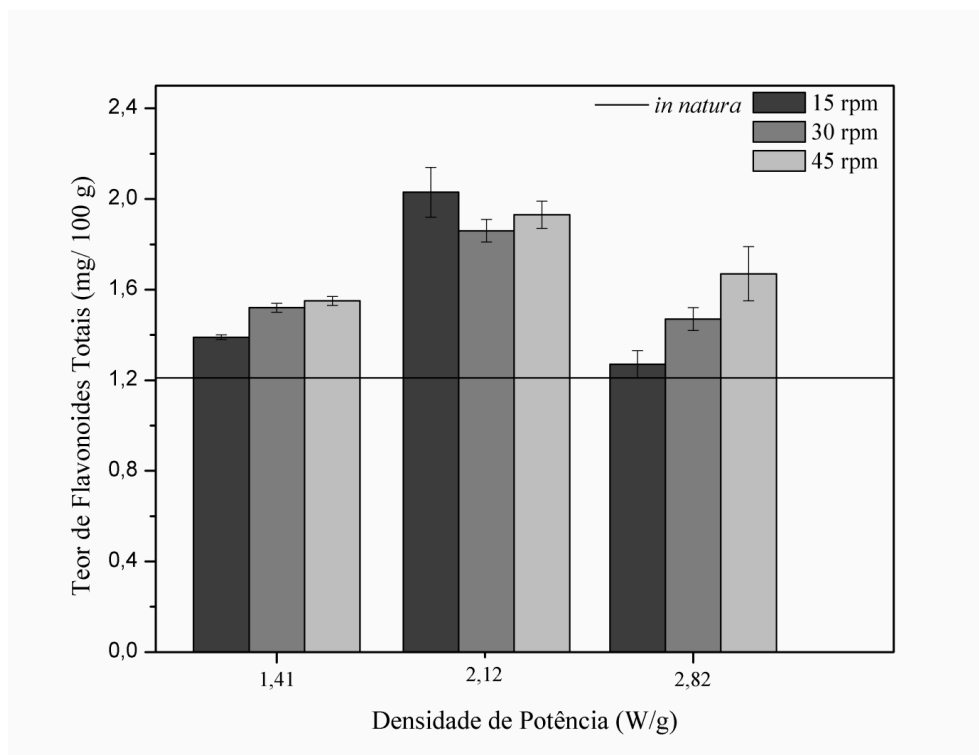


Figura 4.28: Teor de flavonoides totais em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.

Em relação ao ácido ascórbico, é nítido, pela Figura 4.29, que a velocidade de rotação praticamente não tem influência quando comparada à densidade de potência. Esse composto apresenta expressiva elevação com o aumento da densidade de potência. Isto ocorre, pois, além da facilidade de extração dos compostos pelo rompimento da estrutura interna, o aquecimento contribui para a desativação de enzimas responsáveis pela degradação do mesmo (DORTA *et al.*, 2012).

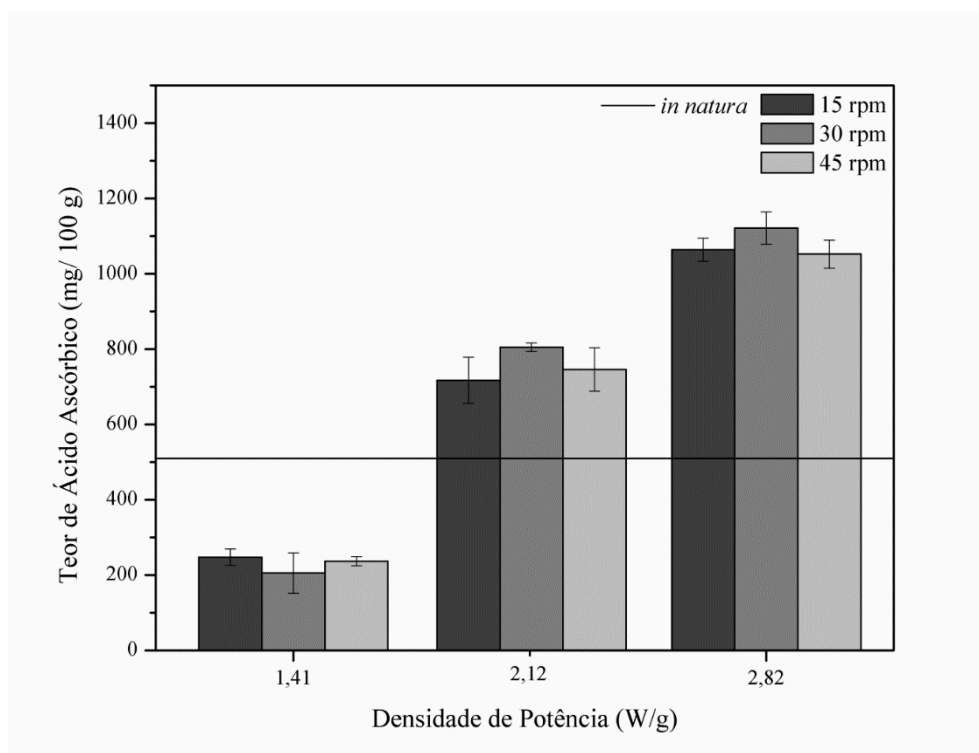


Figura 4.29: Teor de ácido ascórbico em função da densidade de potência e da velocidade de rotação.

As Equações 4.5 a 4.7, obtidas a partir de análise estatística, comprovam a discussão feita anteriormente. Para fenólicos e flavonoides, tanto a densidade de potência quanto a velocidade de rotação tiveram efeito significativo. Para o ácido ascórbico, a velocidade de rotação não possui efeito significativo, enquanto que a densidade de potência apresenta efeito estatístico com contribuição positiva ao aumento da concentração do composto.

$$TPT = 379,09 - 72,29.x_1 - 47,46.x_1^2 + 12,66.x_2 - 41,25.x_2^2 \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0,9711$$

$$TFT = 1,94 - 0,46.x_1^2 + 0,08.x_2 \quad (4.6)$$

$$R^2 = 0,8615$$

$$TAA = 755,86 + 424,63.x_1 - 101,41.x_1^2 \quad (4.7)$$

$$R^2 = 0,9931$$

4.3.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para verificar o efeito do processo de secagem na morfologia do material, as amostras foram submetidas à análise de microscopia eletrônica de varredura, com ampliação de 400 vezes. A princípio, foram obtidas imagens do resíduo *in natura* em diferentes partes da amostra, representadas pela Figura 4.30 (a, b, c e d). Para verificar o efeito da densidade de potência, as Figuras 4.31 a 4.33 mostram a estrutura do material exposto ao aquecimento de 1,41, 2,12 e 2,82 W/g, respectivamente, todas na condição de 45 rpm. Observa-se um aumento na porosidade ao passar de 1,41 para 2,12 W/g (Figuras 4.31 a 4.32), indicando maior probabilidade de extração dos compostos devido à abertura da estrutura. Em 2,82 W/g (Figura 4.33), ocorre um leve enrugamento da estrutura devido ao maior aquecimento, porém a estrutura ainda se apresenta porosa, possibilitando a exposição dos compostos.

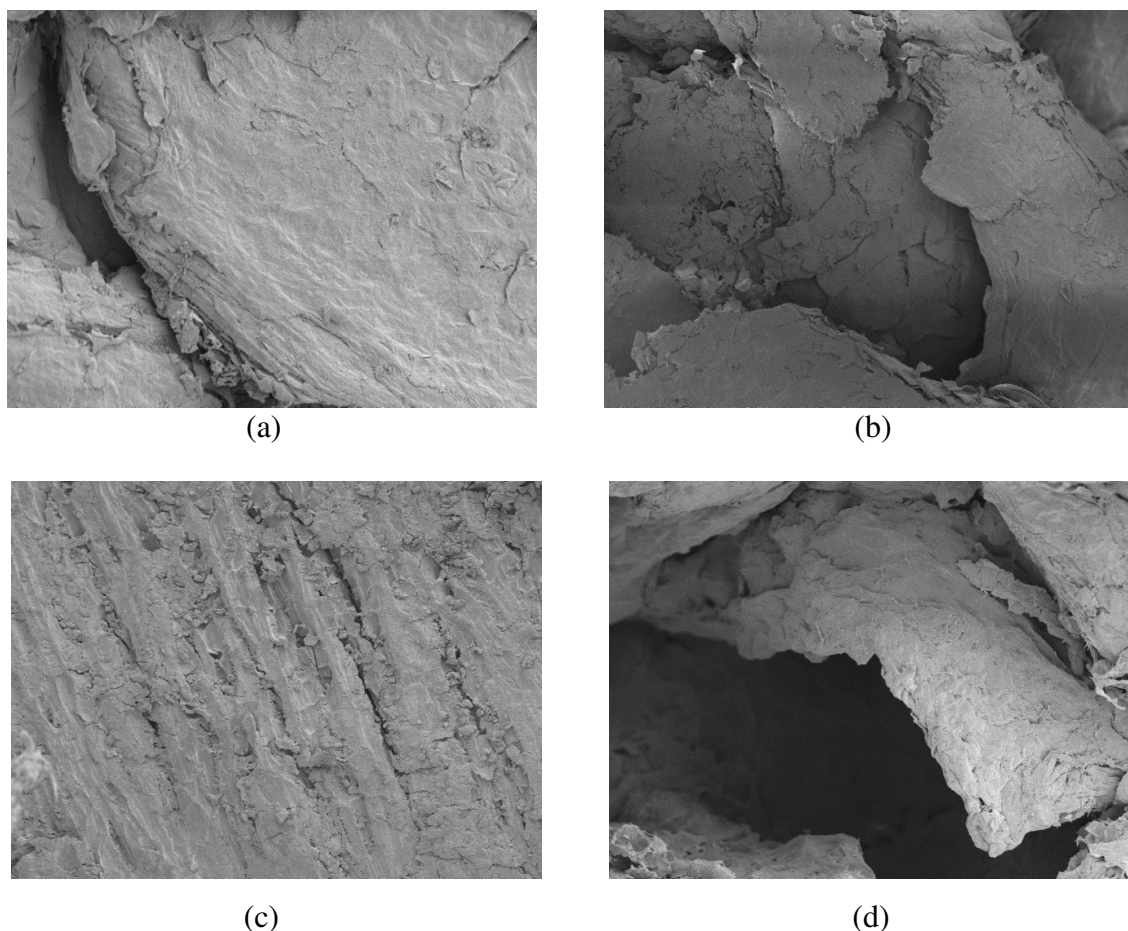


Figura 4.30: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola *in natura* em diferentes regiões do resíduo ((a), (b), (c) e (d)).

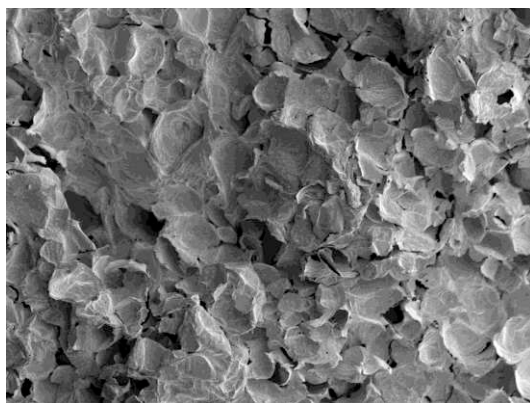


Figura 4.31: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 1,41 W/g e 45 rpm.

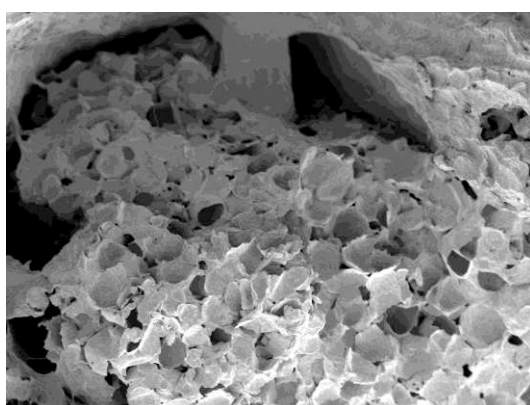


Figura 4.32: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,12 W/g e 45 rpm.

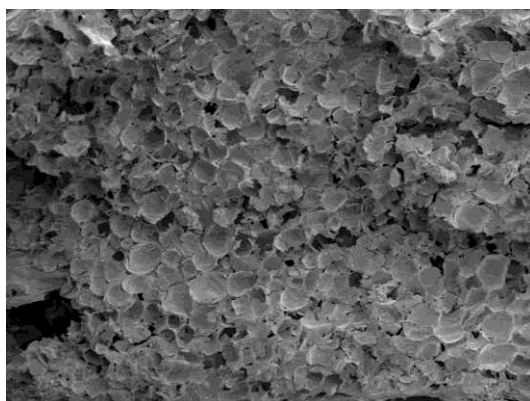


Figura 4.33: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,82 W/g e 45 rpm.

As Figuras 4.34 e 4.35 representam as amostras secas a 2,82 W/g e em velocidade de rotação de 15 e 30 rpm, respectivamente. O resultado da condição de 2,82 W/g e 45 rpm está apresentado na Figura 4.33. Verifica-se que em velocidade mais baixa (Figura 4.34), a estrutura se mostra mais fechada, sendo que os poros vão aumentando e, consequentemente,

permitindo maior extração homogênea dos compostos com o aumento da velocidade de rotação, como pode ser observado pelas Figuras 4.33 e 4.35.

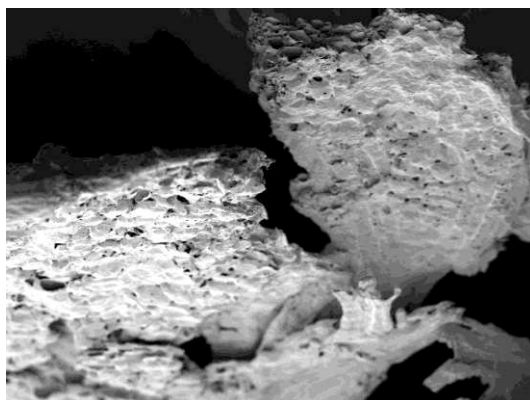


Figura 4.34: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,82 W/g e 15 rpm.

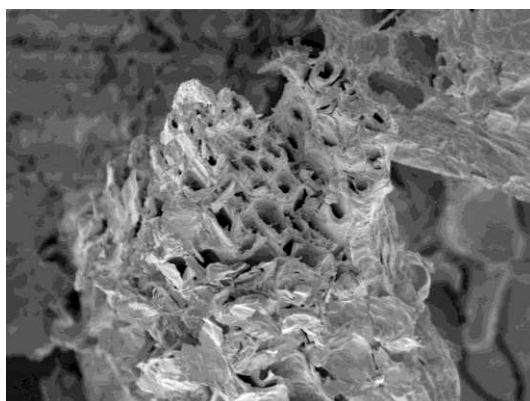


Figura 4.35: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado a 2,82 W/g e 30 rpm.

Resumindo, a maior concentração de fenólicos foi obtida em baixa e intermediária densidade de potência, flavonoides em intermediária densidade de potência e ácido ascórbico apenas degradou no nível mais baixo da mesma variável. Portanto, a densidade de potência intermediária (2,12 W/g) foi o nível que conferiu melhores resultados em relação ao teor de compostos bioativos. Yan *et al.* (2010) verificaram o efeito de diferentes variáveis (teor de umidade, tamanho do cubo de batata e densidade de potência) na secagem de cubos de batata por micro-ondas, micro-ondas com ar quente e micro-ondas com leito de jorro. No planejamento experimental, os autores variaram a densidade de potência de 1,16 a 2,8 W/g e concluíram que os melhores resultados, quanto à razão de expansão volumétrica do material e à força de ruptura da estrutura, foram encontrados na faixa de 2 a 2,5 W/g. Nindo *et al.* (2003)

secaram aspargos por diferentes técnicas, incluindo aquecimento por micro-ondas associado a leite de jorro. Analisando a qualidade do produto final após a secagem em 2 e 4 W/g, observaram o início da carbonização do material em 4 W/g, e relataram que, em 2 W/g, os resultados foram adequados.

4.3.2 Influência da fração de enchimento e da velocidade de rotação do tambor

A fim de verificar o efeito da velocidade de rotação e da fração de enchimento, fixou-se a potência em 300 W, nível que apresentou melhores resultados dentro da faixa estudada anteriormente, e o tempo de 45 min.

A Tabela 4.6 mostra os resultados obtidos para umidade removida e atividade de água. Observa-se que, apenas nas condições dos experimentos 1, 3 e 5, os valores de atividade de água foram adequados para o armazenamento, sendo que, nestas condições, mais de 88% da água foi removida. Estas condições têm em comum frações de enchimento igual ou abaixo de 13%.

As Equações 4.8 e 4.9 mostram a codificação das variáveis e as Equações 4.10 e 4.11, as equações de regressão. As superfícies de resposta para umidade removida e atividade de água estão apresentadas nas Figuras 4.36 e 4.37, respectivamente.

Tabela 4.6: Resultados de umidade removida e atividade de água no PCC para os experimentos de secagem.

Teste	Fração de Enchimento (%)	Velocidade de Rotação (rpm)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Umidade Removida (%)	Atividade de Água (-)
1	13	12	79,21±3,45	8,59±1,54	89,15	0,458
2	31	12	79,21±3,45	60,12±1,31	24,10	0,969
3	13	36	79,21±3,45	9,12±2,58	88,49	0,485
4	31	36	76,62±2,97	65,41±0,92	14,63	0,973
5	9	24	76,62±2,97	3,84±1,03	94,99	0,218
6	35	24	76,62±2,97	65,82±0,55	14,10	0,973
7	22	7	78,43±2,52	43,34±2,43	44,74	0,949
8	22	41	78,43±2,52	40,57±1,93	48,28	0,945
9	22	24	78,43±2,52	41,17±1,49	47,50	0,946
10	22	24	78,43±2,52	41,68±2,04	46,86	0,947

Pela Figura 4.36 e Equação 4.10, é possível verificar que maior quantidade de umidade é removida quando utilizados menores grau de enchimento (f), conforme o esperado,

já que representam densidades de potência mais elevadas, fornecendo aquecimentos mais intensos por unidade de massa. Observa-se, também, que a velocidade de rotação não interferiu significativamente no resultado. Sebben (2015), no processo de secagem de batata-doce em tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas, relatou que a velocidade de rotação não apresentou efeito significativo no processo de remoção de umidade dentro de um intervalo de 8 a 30 rpm.

Quanto maior a quantidade de água evaporada, menor a atividade de água no material, ou seja, remoção de umidade e atividade de água apresentam comportamentos inversamente proporcionais, como pode ser confirmado pela Equação 4.11 e pela Figura 4.37. Neste caso, a atividade de água aumenta com o aumento do grau de enchimento e a velocidade de rotação também não apresenta efeito significativo no processo, na faixa de condições empregadas.

$$x_3 = \frac{f - 22}{9} \quad (4.8)$$

$$x_2' = \frac{v - 24}{12} \quad (4.9)$$

$$M_R = 47,82 - 31,66.x_3 + 4,34.x_3^2 \quad (4.10)$$

$$R^2 = 0,9815$$

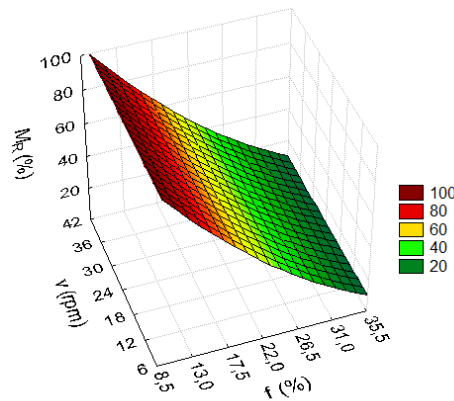


Figura 4.36: Variação de umidade removida em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.

$$Aw = 0,93 + 0,26.x_3 - 0,18.x_3^2 \quad (4.11)$$

$$R^2 = 0,9909$$

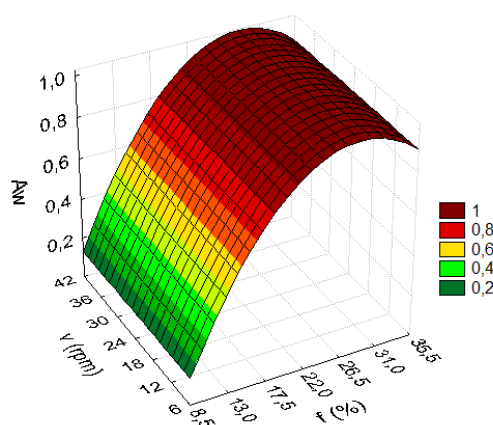


Figura 4.37: Variação de atividade de água em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.

Na Tabela 4.7, são apresentadas as concentrações obtidas de teores de fenólicos totais, flavonoides totais e ácido ascórbico. A influência da variação do grau de enchimento e da velocidade de rotação na concentração de fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico é apresentada, respectivamente, nas Figuras 4.38, 4.39 e 4.40.

Tabela 4.7: Resultados de teores dos compostos bioativos no PCC para os experimentos de secagem.

Teste	Fração de Enchimento (%)	Velocidade de Rotação (rpm)	Fenólicos (mg/ 100 g)	Flavonoides (mg/ 100 g)	Ácido Ascórbico (mg/ 100 g)
1	13	12	275,63±17,04	1,57±0,11	1584,94±80,66
2	31	12	230,16±5,39	1,43±0,05	355,22±22,39
3	13	36	289,36±12,85	2,23±0,21	1761,21±8,15
4	31	36	253,97±7,13	1,42±0,05	941,68±25,17
5	9	24	262,59±12,46	1,84±0,07	1873,47±193,02
6	35	24	226,97±6,93	1,59±0,06	398,13±33,07
7	22	7	247,43±4,52	1,35±0,04	617,97±8,44
8	22	41	279,86±9,89	1,76±0,08	623,47±27,21
9	22	24	270,06±3,03	1,93±0,19	770,44±6,67
10	22	24	272,09±12,21	1,99±0,13	783,39±49,94

Nas condições estudadas, variando-se o grau de enchimento e a velocidade de rotação, nenhum teor de fenólicos obtido após a desidratação foi inferior à concentração do resíduo *in natura*, como pode ser visualizado pela Figura 4.38. Como discutido anteriormente, isso ocorre devido ao rompimento da estrutura interna do material. Além disso, conforme

relatarem Vega-Gálvez *et al.* (2009), a presença de melanoidinas, provenientes da reação de Maillard, interfere favoravelmente nas propriedades antioxidantes. Observa-se, também, que maiores teores de fenólicos foram obtidos com 9, 13 e 22% de fração de enchimento. Isso ocorre devido ao maior fornecimento de energia por unidade de massa, conferido em menores graus de enchimento, que facilitou o rompimento da matriz interna e consequente extração dos compostos. Pela mesma imagem (Figura 4.38), também é visível a influência da velocidade de rotação. Para cada conjunto representante de um grau de enchimento, houve elevação da concentração de compostos com o aumento da velocidade de rotação. Novamente, tal efeito foi possível devido à maior homogeneização das partículas promovida pelo movimento do tambor, que evita que a amostra fique exposta à mesma zona de intensidade de radiação e haja superaquecimento do material.

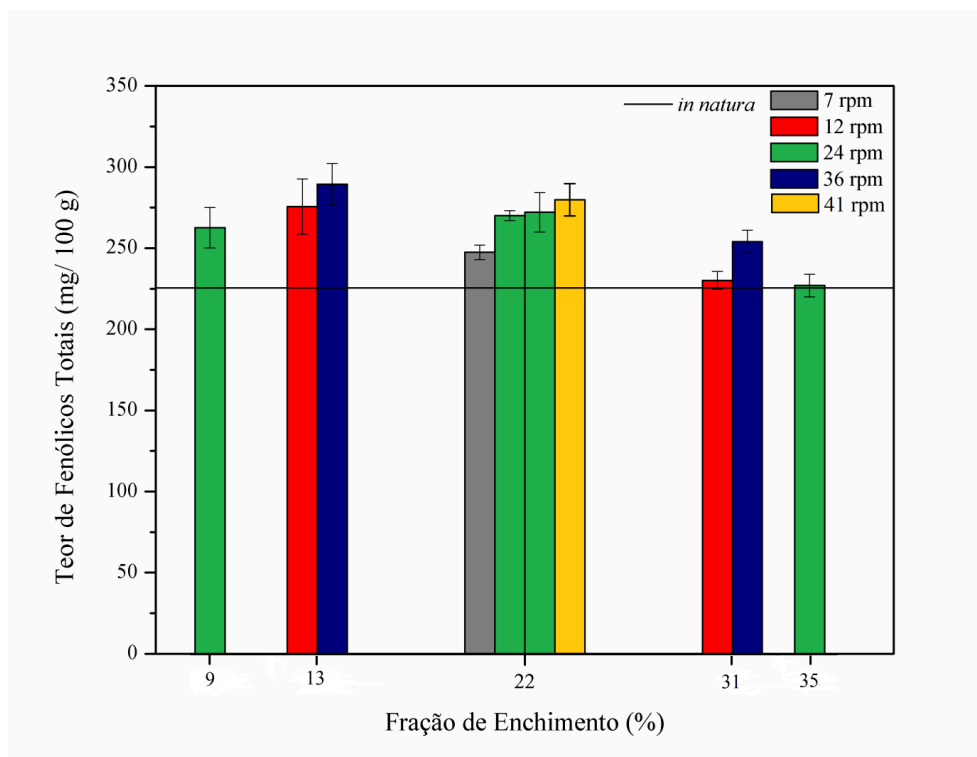


Figura 4.38: Teor de fenólicos totais em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.

Em relação aos flavonoides (Figura 4.39), observa-se que todas as concentrações obtidas foram maiores que o teor do resíduo *in natura*, sendo que maiores teores foram encontrados em baixos e intermediário graus de enchimento, com destaque para 13%. Isto é possível devido à liberação de compostos da matriz durante a remoção de umidade (CHANG *et al.*, 2006), o que torna a superfície menos rígida, devido ao aumento de poros. Isso facilita o posterior processo extrativo, pois possibilita maior permeação do solvente. Quanto à

velocidade de rotação, nota-se que seu efeito é mais pronunciado em graus de enchimento baixos e intermediário, devido à maior facilidade de homogeneização. Nestes casos, o teor de flavonoides aumentou com a elevação da velocidade, com exceção da condição de 22% e 41 rpm, indicando que níveis intermediários de velocidade de rotação já forneceram homogeneidade adequada ao processo.

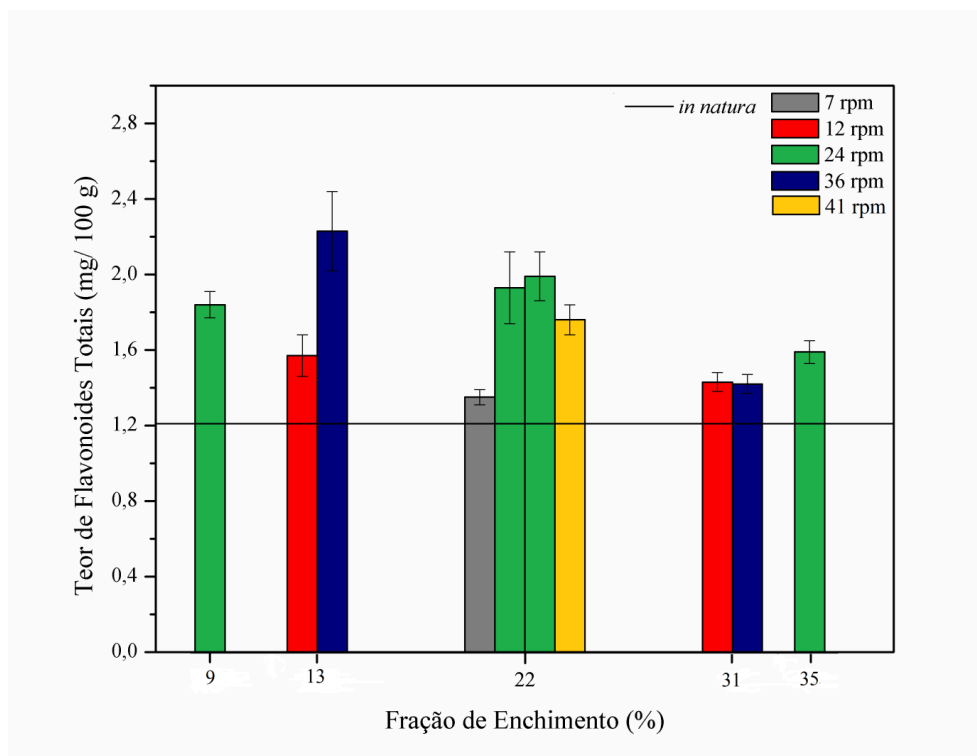


Figura 4.39: Teor de flavonoides totais em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.

Seguindo a mesma tendência do planejamento anterior, melhores resultados de teor de ácido ascórbico (Figura 4.40) foram alcançados com menores graus de enchimento, pois a amostra recebe aquecimento mais intenso, o que favorece o rompimento da estrutura interna do material. O aumento da temperatura também pode desativar enzimas que contribuem para a degradação do próprio ácido ascórbico (WOJDYLO *et al.*, 2009). Em relação à influência da velocidade de rotação, comportamento semelhante ao ocorrido para o teor de flavonoides foi verificado, porém em menor intensidade. Quando comparada ao efeito da fração de enchimento, a influência da velocidade de rotação não é expressiva.

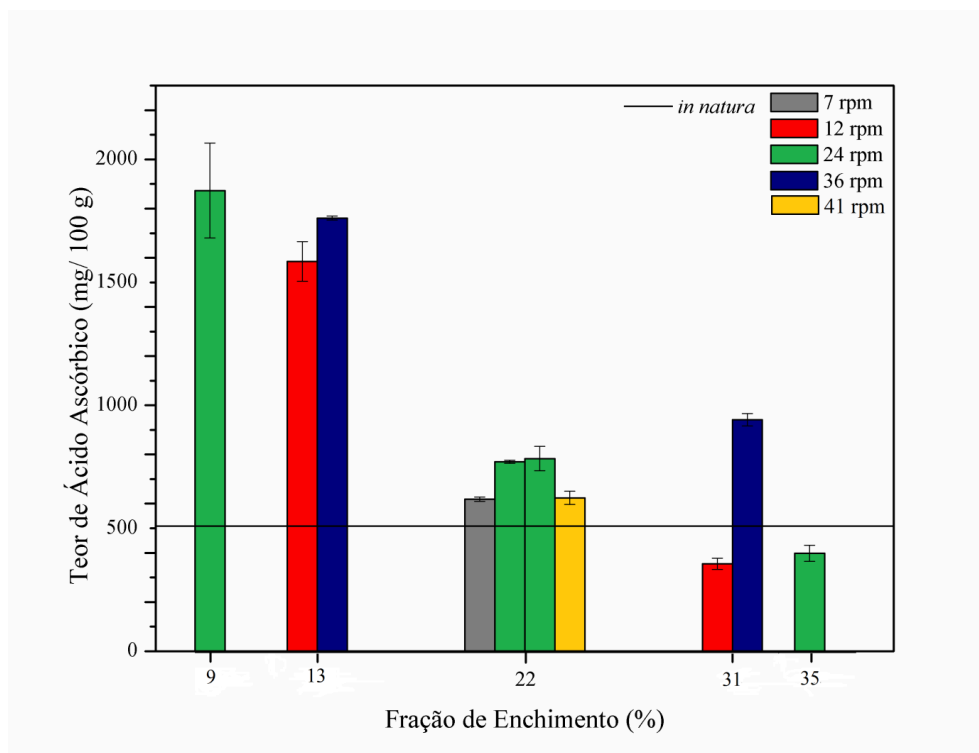


Figura 4.40: Teor de ácido ascórbico em função do grau de enchimento e da velocidade de rotação.

Os resultados discutidos, em relação aos teores de compostos antioxidantes sob efeito da variação de grau de enchimento e velocidade de rotação, são comprovados estatisticamente pelas Equações 4.12 a 4.14. Ambas as variáveis em estudo apresentam efeito significativo nos teores de fenólicos e flavonoides. Enquanto que, para a vitamina C, menores graus de enchimento favoreceram sua elevação e, novamente, para este composto, a velocidade de rotação não se mostrou significativa, no nível de significância de 15%.

$$TPT = 269,13 - 16,40 \cdot x_3 - 10,40 \cdot x_3^2 + 10,43 \cdot x_2' \quad (4.12)$$

$$R^2 = 0,9247$$

$$TFT = 1,96 - 0,16 \cdot x_3 - 0,12 \cdot x_3^2 + 0,15 \cdot x_2' - 0,20 \cdot x_2'^2 - 0,17 \cdot x_3 \cdot x_2' \quad (4.13)$$

$$R^2 = 0,9348$$

$$TAA = 768,37 - 516,96 \cdot x_3 + 253,28 \cdot x_3^2 \quad (4.14)$$

$$R^2 = 0,8778$$

4.3.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Os resultados de microscopia permitiram analisar a morfologia do material após a desidratação. Nas Figuras 4.41 a 4.43 são apresentadas as imagens após a desidratação com grau de enchimento de 9, 22, e 35%, respectivamente, no nível intermediário de velocidade (24 rpm). Na Figura 4.41 ($f = 9\%$), a estrutura apresenta poros, porém também é identificado certo enrugamento, devido ao intenso aquecimento fornecido à amostra. Na Figura 4.42, a porosidade aumenta, caracterizando uma estrutura com maior área superficial, que facilita a extração dos compostos antioxidantes quando em contato com um solvente adequado. Para 35% de fração de enchimento (Figura 4.43), a estrutura é caracterizada por enrugamento, que indica maior dificuldade de extração dos compostos, causada pelo menor aquecimento por unidade de massa.

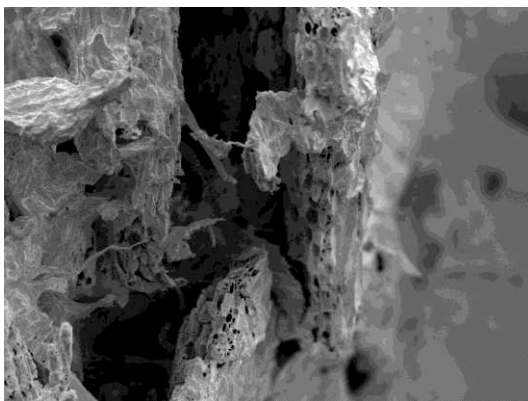


Figura 4.41: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 9% e a 24 rpm.

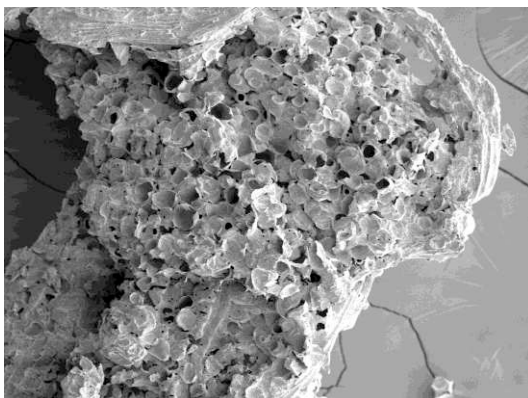


Figura 4.42: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 22% e a 24 rpm.

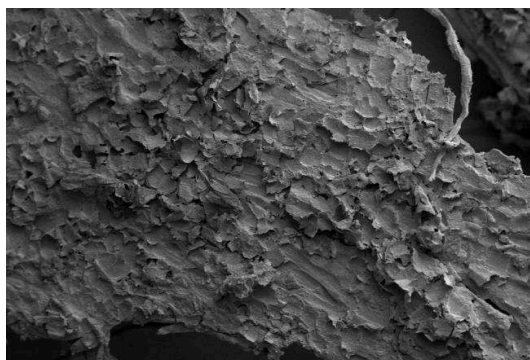


Figura 4.43: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 35% e a 24 rpm.

Para analisar a influência da velocidade de rotação, as Figuras 4.44 e 4.45 mostram a estrutura do material com 22% de grau de enchimento após a secagem em velocidade de rotação de 7 e 41 rpm, respectivamente. A Figura 4.42, já apresentada, representa a condição de 22% e 24 rpm. De acordo com as imagens, conclui-se que a estrutura se torna mais porosa quanto maior for a velocidade de rotação. Isto é mais pronunciado ao passar da Figura 4.44 à Figura 4.42 (7 a 24 rpm), indicando que a velocidade de 7 rpm é muito baixa para fornecer homogeneidade suficiente ao processo. Já nas Figuras 4.42 e 4.45, não é verificada uma diferença muito grande, indicando que velocidades médias já foram capazes de promover homogeneidade. Em todos os casos (Figuras 4.41 a 4.45), a estrutura se mostra mais porosa quando comparada à amostra *in natura* (Figura 4.30).

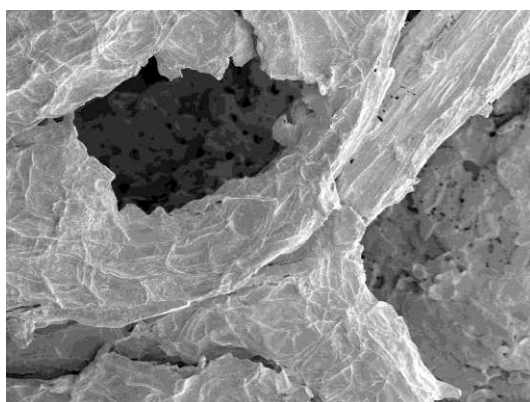


Figura 4.44: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 22% e a 7 rpm.

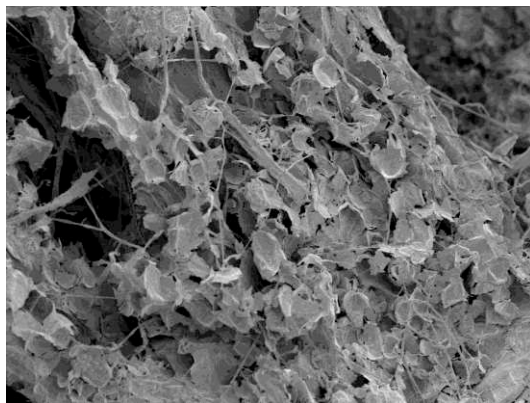


Figura 4.45: MEV com ampliação de 400 vezes para resíduo de acerola desidratado com 22% e a 41 rpm.

Desta forma, como, em grau de enchimento de 13%, foram obtidos teores elevados dos três compostos antioxidantes e altas remoções de umidade, esse nível foi selecionado como o mais adequado, dentre a faixa estudada. Além disso, devido à baixa umidade do produto seco, as amostras finais deste nível de grau de enchimento apresentaram atividade de água abaixo de 0,6, indicando que seu armazenamento é conveniente devido à baixa probabilidade de ação microbiana. Este resultado também reforça os resultados anteriormente obtidos, pois representa densidade de potência de 2,12 W/g, que gerou resultados de concentração de compostos bioativos elevada no planejamento de secagem anterior. Por fim, nos experimentos relacionados à dinâmica da partícula, também foi concluído que a mistura foi satisfatória com a mesma fração de enchimento.

4.3.3 Efeito do grau de enchimento na remoção de umidade

Para verificar se o grau de enchimento exerce influência sobre a quantidade de umidade removida durante o processo de secagem, foram realizados experimentos adicionais, nos quais a potência e a energia específica (energia por unidade de massa, dada em Wh/g ou kWh/kg) permaneceram constantes. No nível de densidade de potência de 2,12 W/g, potência de 300 W, grau de enchimento de 13% e tempo de 34 min, obtém-se energia específica de 1,2 Wh/g. Desta forma, variou-se a fração de enchimento nos níveis anteriormente estudados e, consequentemente, o tempo requerido para que a amostra recebesse a mesma energia específica. Em todos os experimentos, a velocidade de rotação utilizada foi de 30 rpm. A velocidade de rotação não foi variada, já que, conforme discutido anteriormente, não exerce influência significativa na remoção de umidade. A Tabela 4.8 apresenta os níveis de grau de

enchimento e tempo variados nos experimentos realizados, e os respectivos resultados obtidos em relação à umidade removida.

Tabela 4.8: Umidade removida a diferentes graus de enchimento e potência e energia específica constantes.

Grau de Enchimento (%)	Tempo (h)	Umidade Inicial (%)	Umidade Final (%)	Umidade Removida (%)
9	0,39	79,98±0,98	46,54±4,06	41,81
13	0,57	79,98±0,98	37,68±3,12	52,89
22	0,96	79,98±0,98	17,25±1,78	78,44
31	1,35	78,35±0,67	7,93±0,28	89,88
35	1,53	78,35±0,67	5,42±0,23	93,09

A partir dos resultados, observa-se que, com o aumento do grau de enchimento e do tempo de processo, a quantidade de umidade removida foi maior. Como discutido nos resultados anteriores, maior quantidade de umidade foi removida em menores graus de enchimento. Isso indica que o aumento da remoção de umidade foi ocasionado pelo maior tempo de processo. Segundo Fasina *et al.* (1997), a prolongada exposição do material ao aquecimento pode provocar a degradação térmica do mesmo.

Desta forma, conclui-se que o grau de enchimento não é a variável mais expressiva do processo. Isso possibilita uma escolha do grau de enchimento por outros critérios. Neste trabalho, as frações de enchimento foram escolhidas analisando o grau de mistura das partículas e a concentração de compostos antioxidantes.

4.3.4 Comparação entre secadores na desidratação de resíduos de acerola

Com o intuito de verificar a eficiência de diferentes configurações de secadores em relação à qualidade do produto final, realizou-se uma comparação entre secadores estudados na FEQUI/UFU que processaram resíduo de acerola. A comparação consiste em uma análise qualitativa, pois, devido às diferenças dos equipamentos, diferentes variáveis foram avaliadas. Os resultados coletados representam as máximas concentrações obtidas em cada sistema de secagem, sendo calculados em relação ao teor do respectivo resíduo *in natura*. A Tabela 4.9 apresenta o maior teor de compostos bioativos obtidos na desidratação de resíduo de acerola em secador roto-aerado (SILVA, 2014), micro-ondas a vácuo (NOGUEIRA, 2016) e micro-ondas associado a tambor rotativo, o sistema estudado neste trabalho.

Tabela 4.9: Teor de compostos bioativos obtidos na desidratação de resíduo de acerola por diferentes secadores.

	Teor de Fenólicos Totais (mg/ 100 g)	Teor de Flavonoides Totais (mg/ 100 g)	Teor de Ácido Ascórbico (mg/ 100 g)
Roto-aerado	Aumentou 100%	Aumentou 365%	Aumentou 663%
Micro-ondas a vácuo	Degradou 69%	Aumentou 173%	Aumentou 211%
Micro-ondas acoplado a tambor rotativo	Aumentou 78%	Aumentou 84%	Aumentou 268%

A principal vantagem que o micro-ondas a vácuo oferece em relação ao micro-ondas convencional é a diminuição da temperatura do processo, podendo evitar a degradação térmica do material em níveis de potência mais elevados. Monteiro *et al.* (2015) observaram que a aplicação do vácuo na secagem em micro-ondas promove a expansão das estruturas internas, aumentando a porosidade em até 28%, o que pode facilitar a extração de compostos bioativos. É importante destacar que esse sistema não possuía um sistema de agitação do material e a quantidade de amostra processada era inferior ao sistema composto por micro-ondas e tambor rotativo.

Comparando os resultados obtidos por secagem em micro-ondas a vácuo e micro-ondas associado a tambor rotativo, observa-se que o teor de fenólicos e ácido ascórbico aumentou mais no sistema com tambor rotativo, enquanto que maior concentração de flavonoides foi obtida com aquecimento por micro-ondas a vácuo. O vácuo aplicado exerce maior influência para o teor de fenólicos em níveis de potência mais baixos, aumentando o valor do teor de fenólicos totais com o aumento do vácuo aplicado. Já para flavonoides, a variável é mais sensível para níveis de potências mais altos. Níveis de potência altos, desde que não causem a degradação térmica do material, favorecem o rompimento dos constituintes celulares. Assim, a liberação dos compostos da matriz interna pelo elevado aquecimento e o efeito positivo do vácuo no processo faz com que o teor de flavonoides totais seja maior na desidratação por micro-ondas a vácuo. Para o teor de fenólicos, o vácuo tem maior atuação em níveis de potência mais baixos. Portanto, o fato de o vácuo não ter efeito tão expressivo quanto nos teores de flavonoides em potências que rompam as estruturas internas mais efetivamente, somado à heterogeneidade, característica de um processo de secagem por

micro-ondas a vácuo, torna o sistema com tambor rotativo mais vantajoso na conservação deste composto.

O aumento de vitamina C foi maior para o sistema composto por micro-ondas e tambor rotativo, porém a diferença não foi muito discrepante, já que, conforme os resultados anteriormente discutidos, a velocidade de rotação não interferiu significativamente na concentração deste composto.

O teor dos três compostos antioxidantes teve um aumento mais expressivo no processo que empregou secador roto-aerado. Isto indica que o contato das partículas com o ar de secagem, ausente nas outras configurações, favorece a transferência de calor e de massa. Este sistema também permite a homogeneização do processo pela rotação do tambor.

Apesar das diferenças, os três secadores geraram resultados satisfatórios. Com exceção da concentração do teor de fenólicos do produto seco por micro-ondas a vácuo, todas as condições representaram aumento da concentração do composto antioxidante. O objetivo desta comparação não foi indicar qual o melhor secador, pois isso depende de outros fatores, como custo de instalação, consumo energético, quantidade de carga, dentre outros. A motivação foi mostrar como cada variável influencia em diferentes resultados, mostrando novas possibilidades de associações e adaptações no processo de secagem.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A caracterização do resíduo de acerola *in natura* mostrou a existência de compostos bioativos e a possibilidade de seu reaproveitamento a partir da diminuição de seu elevado teor de umidade, por meio da operação de secagem.

O estudo da dinâmica das partículas mostrou que não ocorre segregação axial. Já no estudo da segregação radial, os resultados permitiram verificar que o aumento da velocidade de rotação contribuiu para a elevação do grau de mistura das partículas. Enquanto que a eficiência da mistura decresceu com o aumento do grau de enchimento. Durante a análise da influência da umidade, menores índices de segregação foram obtidos em umidades mais baixas. Porém, os resultados foram próximos, indicando que a mistura não foi muito influenciada pela umidade. Essa pequena diferença é interessante ao processo de secagem, já que a etapa é iniciada com o resíduo com maior teor de umidade.

Nos experimentos de secagem em micro-ondas associado a tambor rotativo, o sistema permitiu obter produtos com baixo teor de umidade, ou seja, reduzida atividade de água, e, conseqüentemente, possibilita o apropriado armazenamento do material. A concentração de compostos antioxidantes foi superior ao do resíduo *in natura* em praticamente todas as condições estudadas. O aumento da velocidade de rotação, na maior parte dos experimentos, contribuiu para a elevação do teor de fenólicos e flavonoides, devido à maior homogeneidade fornecida pelo movimento das partículas. Por sua vez, o aumento da densidade de potência (aumento da potência ou diminuição do grau de enchimento) favoreceu expressivamente a elevação da concentração de ácido ascórbico. Para fenólicos e flavonoides, níveis intermediários se mostraram mais eficientes, indicando aquecimento insuficiente em densidade de potência baixa e iminência de superaquecimento do material em elevada densidade de potência. Dessa forma, a condição operacional que apresentou melhores resultados foi 2,12 W/g, correspondente à potência de 300 W e ao grau de enchimento de 13%.

A microscopia eletrônica de varredura permitiu obter imagens da estrutura do material após a desidratação e detectar a presença de poros, indicando a abertura da matriz interna e a exposição dos compostos antioxidantes. Estruturas caracterizadas por uma quantidade de

poros mais volumosa corresponderam aos materiais submetidos às condições de secagem que geraram maior concentração dos compostos bioativos.

É importante destacar que, no intervalo de velocidade de rotação avaliado, apesar de a variável ter efeito significativo nos processos analisados, a influência da densidade de potência foi mais relevante. Essas diferenças não muito discrepantes advindas dos resultados em diferentes velocidades de rotação simbolizam a eficiência de homogeneização do sistema de secagem por si só. Por fim, o exposto enfatiza a viabilidade da técnica no ramo de secagem de resíduos agroindustriais, alcançando o objetivo de evitar o aquecimento heterogêneo.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os resultados advindos deste trabalho e o comparativo realizado com outras configurações de secadores permitem a sugestão de adaptações no secador que podem aprimorar o processo. Dentre elas:

- Aplicação de suspensores (flights) no tambor rotativo para verificar se há diferença no efeito da velocidade de rotação no processo, em termos de umidade removida e teor de compostos antioxidantes;
- Adição de um sistema a vácuo para remoção da umidade do interior do sistema, a fim de diminuir o tempo de processo;
- Injeção de corrente de ar no tambor rotativo através de um compressor, visando ao aumento da taxa de remoção de umidade.

Além das adaptações citadas, têm-se ainda como sugestões:

- Realizar a mesma metodologia de desidratação com outros resíduos;
- Acoplar um termopar ao sistema para monitorar a temperatura do leito de partículas ao longo do tempo;
- Projetar outros equipamentos referentes à desidratação híbrida envolvendo micro-ondas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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. Braz. J. Food Technol., v. 12, n. 4, p. 257-265, 2009.
- AGOSTINI-COSTA, T. S.; ABREU, L. N.; ROSSETTI, A. G. Efeito do congelamento e do tempo de estocagem de polpa de acerola sobre o teor de carotenoides. Revista Brasileira de Fruticultura, vol. 25, 2003.
- AISSA, A.A.; DUCHESNE, C.; RODRIGUE, D. Polymer powders mixing part II: multicomponent mixing dynamics using RGB color analysis. Chem. Eng. Sci. 65, 3729–3738, 2010.
- ANTUNES, A. J.; CANHOS, V. Aditivos em Alimentos. Campinas: Editora da UNICAMP, 1984.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA. Erna Regina Reetz, Benno Bernardo Kist, Cleiton Evandro dos Santos, Cleonice de Carvalho e Marluci Drum. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, p. 8, 2015.
- ANUÁRIO BRASILEIRO DA FRUTICULTURA. Michelle Treichel, Benno Bernardo Kist, Cleiton Evandro dos Santos, Cleonice de Carvalho e Romar Rudolfo Beling. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, p. 16, 2016.
- AOAC, Official methods of analysis. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, 1995.
- ARRUDA, E. B. Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotativo convencional: secagem de fertilizantes. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- AYMERICH, T.; PICOUE, P. A.; MONFORT, J. M. Decontamination technologies for meat products. Meat Science, v. 78, p. 114-129, 2008.
- BAKER, C. G. J. Cascading rotary dryers. Advances in Drying, Hemisphere, New York, (ed), v. 2, p. 1-51, 1983.
- BALASUNDRAM, N.; SUNDRAM, K.; SAMMAN, S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial byproducts: antioxidant activity, occurrence, and potential uses. Food Chemistry, v.99, n.1, p.191-203, 2006.
- BANIK, S.; BANDYOPADHYAY, S.; GANGULY, S. Bioeffects of microwave: a brief review. Bioresource Technology, v. 87, p. 155–159, 2003.
- BARBOZA, A. C. R. N.; CRUZ, C. V. M. S.; GRAZIANI, M. B.; Lorenzetti, M. C. F.; SABADINI, E. Aquecimento em forno de micro-ondas / desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. Química Nova, 24 (6): 901-904, 2001.
- BELITZ, H.-D.; GROSCH, W.; SCHIEBERLE, P. Fruits and fruit products. Food Chemistry, p. 807–861. Berlin: Springer, 2009.
- BIRT, D. F.; HENDRICH, S.; WANG, W. Dietary agents in cancer prevention: flavonóides and isoflavonoids. Pharmacology. Therapeutics., v. 90, p. 157-177, 2001.
- BOBBIO, F. O; BOBBIO, P. A. Introdução a química de alimentos, 2. Ed. São Paulo, 1995.
- BORTOLOTTI, C. T. Estudo experimental da fluidodinâmica de uma mistura de resíduo de acerola e soja em leito de jorro. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- BOTHA, G. E.; OLIVEIRA, J. C.; AHRNÉ, L. Microwave assisted air drying of osmotically treated pineapple with variable power programmes. Journal of Food Engineering, 108:304-31, 2012.

- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. Lebensmittel-Wissenschaft Technologie, London, v. 28, p. 25-30, 1995.
- BRENNA, O.V.; PAGLIARINI, E. Multivariate analyses of antioxidant power and polyphenolic composition in red wines. J. Agric. Food Chemistry. Chicago: v.49, p. 4841-4844, 2001.
- BRIDGWATER, J. Mixing of powders and granular materials by mechanical means — a perspective. Particuology, 10, 397–427, 2012.
- BRITTON, P. F.; SHEEHAN, M. E.; SCHNEIDER, P. A. A physical description of solids transport in flighted rotary dryers. Powder Technology, v. 165, n. 3, p. 153-160, 2006.
- CANUMIR, J. A.; CELIS, J. E.; BRUIJN, J.; VIDAL, L. V. Pasteurisation of Apple Juice by Using Microwaves. Food Science and Technology, v. 35, p. 389–392, 2002.
- CAO, W. F.; LANGRISH, T. A. G. Comparise of residence time models for cascading rotary dryers. Drying Techonology, v. 17, n. 4, p. 825-836, 1999.
- CARLEY-MACAULY, K.; DONALD, M. The mixing of solids in tumbling mixers—I. Chemical Engineering Science, 17, 493–506, 1962.
- CHANG, C. H.; Lin, H. Y.; CHANG, C. Y.; LIU, Y. C. Comparisons on the Antioxidant Properties of Fresh, Freeze-Dried and Hot- Air- Dried Tomatoes. Journal of Food Engineering, 77, p. 478-485, 2006.
- CHISM, G. W.; HAARD, N. F. Characteristics of edible plant tissues. Food Chemistry, 3^a Ed., p. 943-1011. New York; Marcel Dekker, Inc, 1996.
- CHOU, S.H.; LIAO, C.C.; HSIAU, S.S. An experimental study on the effect of liquid content and viscosity on particle segregation in a rotating drum, Powder Technology, vol. 201, p. 266-272, 2010.
- CLARY, C. D.; WANG, S. J.; PETRUCCI, V. E. Fixed and incremental levels of microwave power application on drying grapes under vacuum. Journal of Food Science, 70(5), 344-349, 2005.
- COOK, N. C.; SAMMAN, S. Flavonoids – chemistry, metabolism, cardioprotective effects, and dietary sources – review. The Journal of Nutrition Biochemistry. v. 7, n. 1, p. 66-76, 1996.
- COSTA, R.P.; MENENDEZ, G.; BRICARELLO, L.P.; ELIAS, M.C.; ITO, M. Óleo de peixe, fitosteróis, soja e antioxidantes: impactos nos lipídios e aterosclerose. Revista da Sociedade de Cardiologia, São Paulo, v.10, n.1, p.819-832, 2000.
- CUI, Z.W.; XU, S. Y.; SUN, D.W. Temperature changes during microwave-vacuum drying of sliced carrots. Drying Technology, 23, 1057e1074, 2005.
- DATTA, A. K.; DAVIDSON, P. M. Microwave and radio frequency processing. Journal of Food Science, 65, 32–41, 2000.
- DAUMANN, B.; FATH, A.; ANLAUF, H.; NIRSCHL, H. Determination of themixing time in a discontinuous powder mixer by using image analysis. Chem. Eng. Sci., 64, 2320–2331, 2009.
- DORTA, E.; LOBO, M. G.; GONZALEZ, M. Using drying treatments to stabilize mango peel and seed: effect on antioxidant activity. LWT – Food Science and Technology, v. 45, p. 261–268, 2012.
- DURANCE, T. D.; WANG, J. H. Energy consumption, density and rehydration rate of vacuum microwave- and hot-air convection-dehydrated tomatoes. Journal of Food Science, 67, 2212e2216, 2002.
- DÜRUST, N.; GOGAN, S.; DÜRUST, Y. Ascorbic acid and element content of foods of trabzon (Turkey). J. of Agric and Food Chem., v.45, p.2085-2087, 1997.
- FAN, L.T., CHEN, S.J., WATSON, C.A. Solids mixing, Industrial e Engineering Chemistry Research, vol. 62, p. 53-69, 1970.

- FASINA, O. O.; TYLER, B.; PICKARD, M. Infrared heating of legume seeds effect on physical and mechanical properties. ASAE Paper N°: 976013, 1997.
- FENG, H.; TANG, J. Microwave finish drying of diced apples in spouted bed. Journal of Food Science, 63, 679–683, 1998.
- FENNEMA, O.R. Química de los alimentos. 2.ed. Zaragoza: Acribia, 1993.
- FREITAS, C. A. S.; MAIA, G. A.; COSTA, J. M. C.; FIGUEIREDO, R. W.; RODRIGUES, M. C. P.; SOUSA, P. H. M. Estabilidade do suco tropical de acerola (*Malpighia emarginata* d.c.) adoçado envasado pelos processos *hot-fill* e asséptico. Food Science and Technology, v.26, n. 3, Campinas-SP, 2006.
- FUNEBO, T.; OHLSSON, T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. Journal of Food Engineering, 38, 353–367, 1998.
- FURLANETO, F. P. B.; NASSER, M. D. Panorama da cultura da acerola no estado de São Paulo. Pesquisa & Tecnologia, vol. 12, n. 1, 2015.
- GEANKOPLIS, C. J. Transport process and unit operations. 3. ed. New Jersey: Prattice Hall, p, 921, 1993.
- GRAJALES, L. M. Avaliação de um biorreator rotativo para fermentação em estado sólido. UNESP, São José do Rio Preto/SP, 2010.
- GRAJALES, L. M. Desenvolvimento de um biorreator rotativo para produção de enzimas celulolíticas por fermentação em estado sólido. UNESP, São José do Rio Preto/SP, 2014.
- GRAJALES, L. M.; XAVIER, N. M.; HENRIQUE, J. P.; THOMEO, J. C. Mixing and motion of rice particles in a rotating drum. Powder Technology, Lausanne, v. 222, p. 167–175, 2012.
- HALLIWELL, B. Vitamin C and genomic stability. Mutat. Res., 475, 29, 2001.
- HOFFMANN, F. L. HIGIENE - Fatores limitantes à proliferação de microorganismos em alimentos. BRASIL ALIMENTOS - n° 9 - Julho/Agosto de 2001.
- HUANG, A. N.; KUO, H. P. A Study of the three-dimensional particle size segregation structure in a rotating drum. American Institute of Chemical Engineers Journal, vol. 58, p. 1076-1083, 2012.
- JAYA, S.; DAS, H. A vacuum drying model for mango pulp. Drying Technology, v.21, p.1215–1234, 2003.
- JONES, P.L. High frequency dielectric heating in paper making. Drying Technology, v.4, 2, p.103-107, 1986.
- KAWAGUCHI, T. MRI measurement of granular flows and fluid-particle flows, Adv. Powder Technol., 21, 235–241, 2010.
- KHAN, M. A.; KUMAR, Y.; ZAIDI, S.; ALI, I. Microwave assisted fluidized bed drying of beetroot (*Beta vulgaris* L.). Dept. of Post Harvest Engg. e Tech., A.M.U., Aligarh, India, 2010.
- KHOSHTAGHAZA, M. H.; DARVISHI, H.; MINAEI, S. Effects of microwave - fluidized bed drying on quality, energy consumption and drying kinetics of soybean kernels. J. Food. Sci. Technol., 52: 4749, 2015.
- KHRAISHEH, M. A. M.; COOPER, T. J. R.; MAGEE, T. R. A. Microwave and air drying. Fundamental considerations and assumptions for the simplified thermal calculations of volumetric power absorption. Journal of Food Engineering, 33(2), 207–219, 1997.
- KHRAISHEH, M. A. M.; MCMINN, W. A. M.; Magee, T. R. A. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. Food Research International, 37, 497-503, 2004.
- KIRANOUDIS, C. T.; TSAMI, E.; MAROULIS, Z. B. Microwave vacuum drying kinetics of some fruits. Drying Technology, 15, 2421e2440, 1997.

- KUO, H.P.; HSU, R.C.; HSIAO, Y.C. Investigation of axial segregation in a rotating drum. Powder Technology, 153, 196 – 203, 2005.
- LAGUERRE, M.; LECOMTE, J.; VILLENEUVE, P. Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: Existing methods, new trends and challenges. Review. Progress in Lipid Research, v. 46, p. 244-282, 2007.
- LANGRISH, T. A. G.; PAPADAKIS, S. E.; BAKER, C. G. J. Residence times of two- and three-component mixtures in cascading rotary dryers. Drying Technology, v. 20, n. 2, p. 325-350, 2002.
- LEHNINGER, L. A. Lehninger principles of biochemistry. 4th ed. New York: W. H. Freeman, 2005.
- LI, Z.Y.; WANG, R. F.; KUDRA, T. Uniformity issue in microwave drying. Dry. Technol. 29 (6), 652–660, 2011.
- LIM, S.Y.; DAVIDSON, J.F.; FORSTER, R.N.; PARKER, D.J.; SCOTT, D.M.; SEVILLE, J.P.K. Avalanching of granular material in a horizontal slowly rotating cylinder: PEPT studies, Powder Technol. 138, 25–30, 2003.
- LISBOA, M. H. Estudo de secadores rotatórios na secagem de fertilizantes. Dissertação de Mestrado. UFU, Uberlândia/MG, 2005.
- LISBOA, M. H.; VITORINO, D. S.; DELAIBA, W. B.; FINZER, J. R. D.; BARROZO, M. A. S. A study of particle motion in rotary dryer, Braz J. Chem. Eng., v. 24, p. 365-374, 2007.
- LIU, X.; ZHANG, C.; ZHAN, J. Quantitative comparison of image analysis methods for particle mixing in rotary drums. Powder Technology, 282, 32–36, 2015.
- LIU, X.Y.; XU, X.; ZHAN, Y.Y. Experimental study on time features of particle motion in rotating drums, Chem. Eng. Technol. 34, 997–1002, 2011.
- LOBO, S.; DATTA, A. K. Characterization of spatial non-uniformity in microwave reheating of high loss foods. The Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 33, 158–166, 1998.
- LOUSADA Jr., J. E.; COSTA, J. M. C.; NEIVA, J. N. M.; RODRIGUEZ, N. M. 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.
- MACIEL, M. I. S.; MÉLO, E.; LIMA, V.; SOUZA, K. A.; SILVA, W. Caracterização físico-química de frutos de genótipos de aceroleira (*Malpighia emarginata* D.C.). Ciência e Tecnologia de Alimentos, 30, 865-869, 2010.
- MARCHAND, L. L. Cancer preventive effects of flavonóides – a review. Biomed Pharmacother. v. 56, p. 296-301, 2002.
- MARSAIOLI Jr., A. Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Campinas – SP, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, p. 218, 1991.
- MASKAN, M. Microwave/air and microwave finish drying of banana. Journal of Food Engineering, 44, 71–78, 2000.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Operaciones unitarias en ingeniería química. Madrid: McGraw-Hill. p. 1112, 1991.
- MELLMANN, J., The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior, Powder Technology, vol. 118, p. 251-270, 2001.
- MELO, E. A.; MACIEL, M. I. S.; LIMA, V. A. G. L.; NASCIMENTO, R. J. Capacidade antioxidante de frutas. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, v.44, n.2, p.193-201, 2008.

- MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.
- MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para modificação da textura de bananas desidratadas em campo de microondas. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 4517-4524, 2015.
- MOUSA, N.; FARID, M. Microwave vacuum drying of banana slices. Drying Technology, 20, 2055e2066, 2002.
- NINDO, C.; TING, S.; WANG, S. W.; TANG, J.; POWERS, J. R. Evaluation of drying technologies for retention of physical and chemical quality of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.). LWT-Food Science and Technology, 36(5), 507e516, 2003.
- NITYANAND, N.; MANLEY, B.; HENEIN, H. An analysis of radial segregation for different sized spherical solids in rotary cylinders. Metallurgical Transactions B, v. 17B, 247, 1986.
- NÓBREGA, E. M. M. A. Secagem do resíduo de acerola (Malpighia emarginata DC.): Estudo do processo e avaliação do impacto sobre o produto final. Dissertação de mestrado. UFRN. Natal, RN, 2012.
- NOGUEIRA, G. D. R. Estudo de técnicas híbridas de desidratação de resíduos de acerola. Dissertação de Mestrado. UFU, Uberlândia/MG, 2016.
- NOGUEIRA, R. J. M. C.; MORAES, J. A. P. V.; BURITY, H. A. Efeito do estágio de maturação dos frutos nas características físico-químicas de acerola. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.37, n.4, p.463-470, 2002.
- OU, B.; HUANG, D.; HAMPSCH-WOODILL, M.; FLANAGAN, J.A.; DEEMER, E.K. Analysis of antioxidant activities of common vegetables employing oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and ferric reducing antioxidant power (FRAP) assays: a comparative study. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 50, 3122-3128, 2002.
- OZKAN, A.; AKBUDAK B.; AKBUDAK, N. Microwave drying characteristics of spinach. Journal of Food Engineering, 78:577-583, 2007.
- PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 21(3): 288-292, set-dez. 2001.
- PELZER, L. E.; GUARDIA, T.; JUAREZ, O. A.; GUERREIRO. Acute and chronic antiinflammatory eddects of plant flavonoids, Farmaco, v. 53, p.421-423, 1998.
- PEREIRA, N. R. Estudo da aplicação de microondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente. Tese de doutorado. FEA/UNICAMP, Campinas/SP, 2007.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; Perry's Chemical Engineers' Handbook, 7th ed., Mc-Graw-Hill, New York, 1997.
- PETERSON, J.; DWYER, J. Flavonoids: dietary occurrence and biochemical activity. Nutrition Research. v. 18, n. 12, p. 1995-2018, 1998.
- PRABHANJAN, D. G.; RAMASWAMY, H. S.; RAGHAVAN, G. S. V. Microwave assisted convective air drying of thin layer carrots. Journal of Food Engineering, 25(2), 283–293, 1995.
- PUYVELDE, D. R. V.; YOUNG, B. R.; WILSON, M. A.; SCHMIDT, S. J. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis. Powder Technology, Lausanne, v. 106, p. 183 – 191, 1999.
- RICHARDS, J.C. "The Storage and Recovery of Particulate Solids" Institution of Chem. Engineers, Working Party Report, 1966.
- RODRIGUEZ, S.; SANROMAN, M. Application of solid-state fermentation to food industry: a review. Journal of Food Engineering, Essex, v. 76, n. 3, p. 291 – 302, 2006.

- ROSA, J. G. Secagem de cenoura (*Daucus carota* L.) em micro-ondas. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – São Carlos – SP, Universidade Federal de São Carlos - UFSCAR, 96p, 2010.
- SAGAR, V. R.; KUMAR, P. Recent advances in drying and dehydration of fruits and vegetables: a review. Journal Food Science and Technology, v,47, p.15–26, 2010.
- SALAZAR-GONZALEZ, C.; SAN MARTIN-GONZALEZ, M. F.; LOPEZ-MALO, A.; SOSA-MORALES, M. E. Recent studies related to microwave processing of fluid foods. Food Bioprocess and Technology, 5, 31–46, 2012.
- SANFRATELLO, L.; FUKUSHIMA, E. Experimental studies of density segregation in the 3D rotating cylinder and the absence of banding. Granular Matter, 11:73–78, 2009.
- SANTOMASO, A.; OLIVI, M.; CANU, P. Mechanisms of mixing of granular materials in drum mixers under rolling regime. Chem. Eng. Sci., 59, 3269 – 3280, 2004.
- SANTOS, D. A.; DADALTO, F. O.; SCATENA, R.; DUARTE, C. R.; BARROZO, M. A. S. A hydrodynamic analysis of a rotating drum operating in the rolling regime. Chemical Engineering Research and Design, vol. 94, p. 204-212, 2015.
- SANTOS, D. A. Estudo experimental e numérico da dinâmica de partículas em um tambor rotatório. Tese de Doutorado. UFU, Uberlândia/MG, 2015.
- SCHUTYSER, M.; WEBER, F.; BRIELS, W.; BOOM, R.; RINZEMA, A. Heat and water transfer in a rotating drum containing solid substrate particles. Biotechnology and Bioengineering, New York, v. 82, n. 5, p. 552 – 563, 2003.
- SEBBEN, J. A. Desenvolvimento de tambor rotativo para micro-ondas e aplicação no processamento de batata-doce. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.
- SENISE, J. T. A utilização de rádio-frequência e micro-ondas na eletrônica industrial. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 8, n. 1, p. 51-56, 1985.
- SEVILLE, J.P.K.; INGRAM, A.; PARKER, D.J. Probing processes using positrons, Chem. Eng. Res. Des. 83, 788–793, 2005.
- SHAHHOSSEINI, S.; CAMERON, I. T.; WANG, F. Y. A simple dynamic model for solid transport in rotary dryers. Drying Technology, v. 18, n. 4, p. 867-886, 2000.
- SHARMA, G. P.; PRASAD, S. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. Journal of Food Engineering, 50, 99-105, 2001.
- 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. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2015 a.
- SILVA, D. I. S.; NOGUEIRA, G.D.R.; DUZZIONI, A. G.; BARROZO, M. A. S. Changes of Antioxidant Constituents in Pineapple (*Ananas comosus*) residue during drying process. Industrial Crops and Products, v. 50, p. 557-562, 2013.
- SILVA, F. A., MARSAIOLI Jr, A. Aspecto econômico de um processo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) assistida a micro-ondas. Revista Ciências Exatas e Naturais, 5 (2):157-167, 2003.
- SILVA, F. A.; MARSAIOLI Jr., A.; MAXIMO, G. J.; SILVA, M. A. A. P.; GONÇALVES, L. A. G. Microwave assisted drying of macadamia nuts. Journal of Food Engineering, 77, 550–558, 2006.
- SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; JUNIOR, C. C.; GOMES, F. C. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.8, n.1, p.17-23, 2006 a.
- SILVA, N. C. Desidratação de resíduos do processamento de maracujá-amarelo por diferentes metodologias. Dissertação de Mestrado. UFU, Uberlândia/MG, 2015.

- SILVA, P. B. Secagem de resíduos de frutas em secador roto-aerado. Dissertação de mestrado. UFU. Uberlândia, MG. 2014.
- SILVÉRIO, B. C. Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em diferentes tipos de secadores roto-aerados, Tese de Doutorado, UFU, Uberlândia/MG, 2012.
- SIMÃO, A.M. Aditivos para alimentos sob o aspecto toxicológico. São Paulo: Nobel, 1985.
- SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A., Colorimetry of total phenolics with phosphomolibdic phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, v. 16, p. 144-158, 1965.
- SOARES, S. E. Ácidos fenólicos como antioxidantes. Revista de Nutrição, Campinas, v. 15, n. 1, p. 71-81, 2002.
- SONG, Y.; THIBAUT, J.; KUDRA, T. Dynamic characteristics of solids transportation in rotary dryers. Drying Technology, v. 21, n. 5, p. 755-773, 2003.
- SOUSA, M. S. B.; VIEIRA, L. M.; SILVA, M. J. M.; LIMA, A. Caracterização nutricional e compostos antioxidantes em resíduos de polpas de frutas tropicais. Ciênc. Agrotec., v.35, n.3, p.554-559, maio/jun, 2011.
- TABERLET, N.; NEWBY, M.; RICHARD, P.; LOSERT, W. On axial segregation in a tumbler: an experimental and numerical study. Journ. of Stat. Mech.: Theor. and Exp., 2006.
- TORRINGA, E.; ESVELD, E.; SCHEEWE, I.; BERG, V.B.; BARTELS, P. Osmotic dehydration as a pre-treatment before combined microwave- hot-air drying of mushrooms. Journal of Food Engineering, 49, 185–191, 2001.
- UCHÔA, A. M. Adição de pós-alimentícios obtidos de frutas tropicais na formulação de biscoitos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, CE, 2007.
- VAN DEN BERG, C.; BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: ROCKLAND, L. B.; STUART, G. F. Water Activity: Influences on Food Quality. London, Academic Press Inc., p. 1-61, 1981.
- VAN PUYVELDE, D. R.; YOUNG, B.R.; WILSON, M.A.; SCHMIDT, S.J. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis. Powder Technology. 106, 183–191, 1999.
- VASCO, C. Phenolic compounds in ecuadorian fruits. Tese (Doutorado em Ciência dos Alimentos) - Swedish University of Agricultural Sciences, Faculty of Natural Resources and Agricultural Sciences, Department of Food Science, Uppsala, 2009.
- VEGA-GÁLVEZ, A.; DI SCALA, K.; RODRÍGUEZ, K.; LEMUS-MONDACA, R.; MIRANDA, M.; LÓPEZ, J.; PEREZ-WON, M. Effect of air-drying temperature on physico-chemical properties, antioxidant capacity, colour and total phenolic content of red pepper (*Capsicum annuum*, L. var. Hungarian). Food Chem, v. 117, p. 647-652, 2009.
- VIEIRA, R. K.; SILVEIRA, A. M. Nota sobre o cascadeamento de sólidos em um secador tambor rotativo considerando apenas um suspensor, Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Vol. 1, p.403-412, Maringá – PR, 1995.
- WANG, J.; XI, Y. S.; YU, Y. Microwave drying characteristics of potato and the effect of different microwave powers on the dried quality of potato. European Food Research and Technology, 219, 500–506, 2004.
- WANG, R. Soybean drying characteristics in microwave Rotary dryer with forced convection. Frontiers of Chemical Engineering in China, v. 3, n. 3, p. 289-292, 2009/09/012009. ISSN 1673-7369, 2009.
- WILLIAMS, J. C.; KHAN, M. I. The mixing and segregation of particulate solids of different particle size. The Chemical Engineer. pp. 19-25, 1973.
- WOJDYŁO, A.; FIGIEL, A.; OSZMIANSKI, J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of

- strawberry fruits. Journal of agricultural and food chemistry, v. 57, n. 4, p. 1337-1343, 2009.
- XAVIER, N. M.; GRAJALES, L. M.; THOMÉO, J. C. Característica de movimentação e mistura de partículas de um biorreator rotativo para fermentação em estado sólido. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia/MG, 2009.
- YAN, W.; ZHANG, M.; HUANG, L.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S.; SUN, J. Study of the optimisation of puffing characteristics of potato cubes by spouted bed drying enhanced with microwave. J. Sci. Food Agric., 90, 1300–1307, 2010.
- YANG, C. S., et al. Inhibition of carcinogenesis by Inhibition of carcinogenesis by dietary polyphenolic compounds. Annu. Rev. Nutr., v. 21, p. 381-406, 2001.
- YILDIRIM, A.; MAVI, A.; KARA, A.A. Determination of antioxidant and antimicrobial activities of *Rumex crispus* L. extracts. J. Agric. Food Chemistry, v. 49, p. 4083-4089, 2001.
- ZHANG, M.; LI, C. L.; DING, X. L. Effects of heating conditions on the thermal denaturation of white mushroom suitable for dehydration. Drying Technology, 23(5), 1119e1125, 2005.
- ZHANG, M.; LI, C. L.; DING, X. L. Optimization for preservation of selenium in sweet pepper under low-vacuum dehydration. Drying Technology, 21(3), 569e579, 2003.
- ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S.; WANG, S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science e Technology, v. 17, p. 524 534, 2006.
- ZHENG, W.; WANG, S.Y. Antioxidant activity and phenolic compounds in selected herbs. J. Agric. Food Chemistry. Chicago: v.49, p. 5165-5170, 2001.
- ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T.; JIANMING, W. The Determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, v. 64, p. 555-559, 1999.
- ZLOTORZYNSKI, A. The application of microwave radiation to analytical and environmental chemistry. Crit. Rev. Anal. Chem. 25, 43, 1995.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Índice de segregação para resíduos com 10% de umidade

As Figuras A.1 a A.3 mostram a influência da velocidade de rotação no valor do índice de segregação, para resíduos com 10% de umidade. Nas Figuras A.4 a A.6, verifica-se o comportamento do índice de segregação ao longo do tempo quando há variação do grau de enchimento.

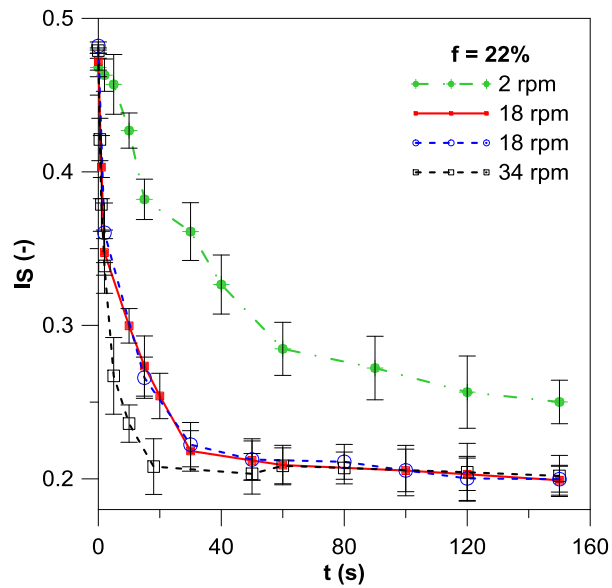


Figura A.1: Variação transiente do I_s com $f = 22\%$ e $v = 2, 18$ e 34 rpm.

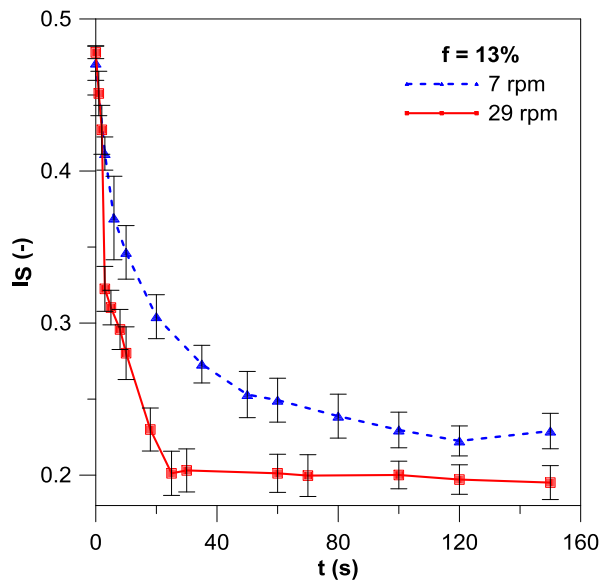


Figura A.2: Variação transiente do I_s com $f = 13\%$ e $v = 7$ e 29 rpm.

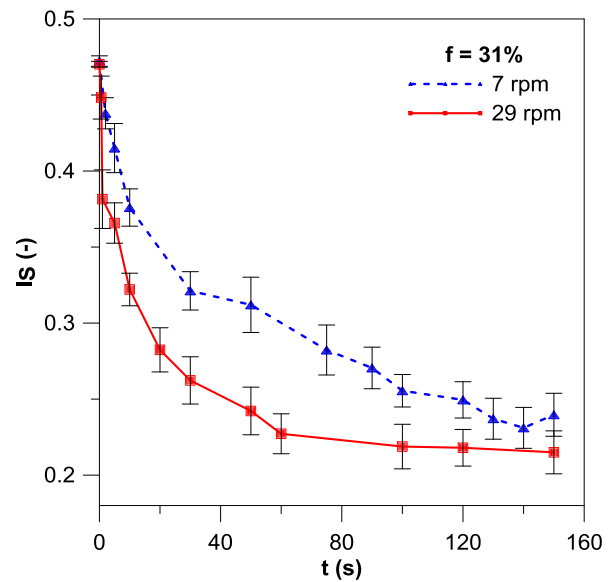


Figura A.3: Variação transiente do I_s com $f = 31\%$ e $v = 7$ e 29 rpm.

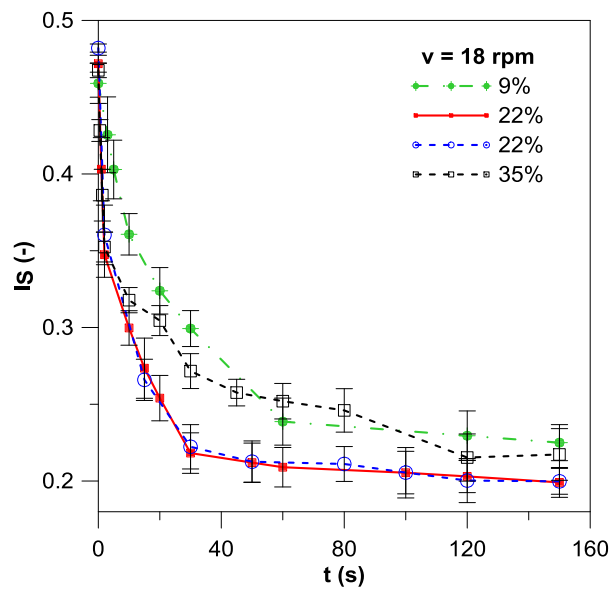


Figura A.4: Variação transiente do I_s com $v = 18$ rpm e $f = 9, 22$ e 35% .

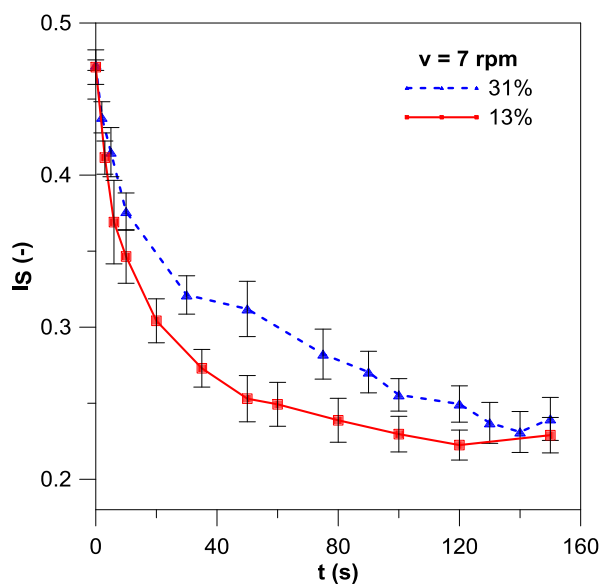


Figura A.5: Variação transiente do I_s com $v = 7$ rpm e $f = 13$ e 31% .

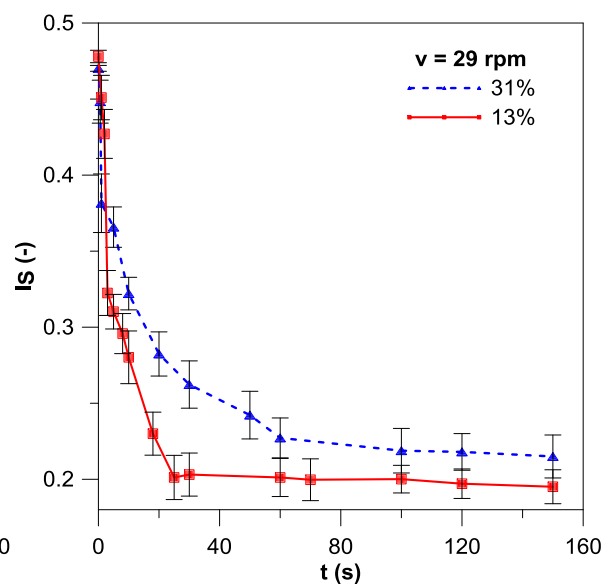


Figura A.6: Variação transiente do I_s com $v = 29$ rpm e $f = 13$ e 31% .

APÊNDICE B - Teste de medida de potência no forno de micro-ondas

Com o intuito de verificar a potência do forno de micro-ondas, a metodologia “IMPI 2–Litros”, adaptada de Buffler (1991), foi utilizada. Inicialmente, o forno de micro-ondas foi aquecido em potência nominal por 5 min, na presença de 2L de água. Posteriormente, dois béqueres de 1 L foram preenchidos com água a $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, totalizando 2000 ± 5 g, dispostos no centro do forno, lado a lado, e este foi ligado por 2 min e 2 s nos níveis de potência a ser medidos. Foram escolhidos os três níveis de potência adotados nos experimentos. Medidas de temperatura foram realizadas antes e após o aquecimento com termômetro com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ (Instrutherm THR-080), agitando-se a água com espátula de plástico antes de cada medição. Nos intervalos de cada teste, devem-se secar as paredes do forno com um pano úmido e frio. A potência é calculada a partir da Equação B.1, onde ΔT_1 e ΔT_2 são as elevações da temperatura da água nos dois béqueres, calculadas pela subtração das respectivas temperaturas iniciais e finais. As medidas são conduzidas três vezes e os resultados individuais não podem variar mais que 5% da média. Os resultados são encontrados na Tabela B.1.

$$P(W) = 70 \cdot \frac{\Delta T_1(^{\circ}\text{C}) + \Delta T_2(^{\circ}\text{C})}{2} \quad (\text{B.1})$$

Tabela B.1: Verificação dos níveis de potência do forno de micro-ondas.

Potência (W)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	ΔT_1	ΔT_2	Potência (W)	Média (W)
200	1000,14	1000,09	2,9	2,7	196	199,5
	1000,2	1000,24	2,9	3,0	206,5	
	1000,44	1000,65	2,8	2,8	196	
300	1000,17	1000,43	4,2	4,4	301	295,1667
	1000,04	1000,33	4,4	3,8	287	
	1000,18	1000,12	4,5	4,0	297,5	
400	1000,72	1000,11	5,6	5,5	388,5	393,1667
	1000,41	1000,32	5,9	5,4	395,5	
	1000,2	1000,26	5,6	5,7	395,5	

Buffler, C. A guideline for power output measurement of consumer microwave ovens. Microwave World 10 (5):15. 1991.