

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ANÁLISE DA SECAGEM DE RESÍDUO DE LEITE DE SOJA
“OKARA” EM SECADORES DE LEITO DE JORRO E DE
CILINDRO ROTATIVO ASSISTIDO A MICROONDAS**

Autor : César Augusto Agurto Lescano.
Orientadora : Prof^a. Dr^a. Sandra Cristina dos Santos Rocha.

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo
Abril de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

L563a Lescano, César Augusto Agurto
Análise da secagem de resíduo de leite de soja /
César Augusto Agurto Lescano. --Campinas, SP: [s.n.],
2009.

Orientadores: Sandra Cristina dos Santos Rocha,
Antonio Marsaioli Júnior.

Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Secagem. 2. Leite de soja - Secagem. 3. Leite de
soja. 4. Processo de leite de jorro. 5. Máquinas -
Secagem. 6. Microondas. I. Rocha, Sandra Cristina dos
Santos. II. Marsaioli Júnior, Antonio. III. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química. IV. Título.

Título em Inglês: Drying of soy milk residue in the spouted bed dryer and
rotary cylindrical dryer assisted by microwaves

Palavras-chave em Inglês: Drying, Drying milk soybean, Milk soybean,
Drying machines, Spouted bed processes,
Microwaves

Área de concentração: Engenharia de Processos

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Virgínia Aparecida Silva Moris, Osvaldir Pereira
Taranto, Nádia Rosa Pereira, Michele Nehemy Berteli

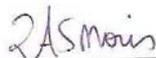
Data da defesa: 13/04/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

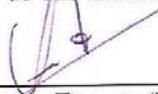
Tese de Doutorado defendida por César Augusto Agurto Lescano e aprovada em 13 de abril de 2009 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof.^a Dr.^a Sandra Cristina dos Santos Rocha (Orientadora)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Prof.^a Dr.^a Virgínia Aparecida Silva Moris (Titular)
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto (Titular)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)



Prof.^a Dr.^a Nádia Rosa Pereira (Titular)
Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF)



Dra. Michele Nehemy Berteli (Titular)
Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL)

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química.



Prof^a Dr^a Sandra Cristina dos Santos Rocha (Orientadora)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)

*Aos meus pais Gerardo e Mercedes,
aos meus irmãos Hellen, Lalo, Gigi e Ceci e
aos meus sobrinhos Javi, Chalo e Joaquim.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, primeiramente pela força e luz durante a minha vida.

À minha Orientadora Prof^a. Dra Sandra Cristina dos Santos Rocha e meu Co-Orientador Prof. Dr. Antonio Marsaioli Júnior pela orientação, amizade, carinho e paciência.

Aos membros da banca Profs. Dr^a. Virgínia Aparecida Silva Moris, Dr. Osvaldir Pereira Taranto, Dr^a. Nádia Rosa Pereira e Dr^a. Michele Nehemy Berteli, pela ajuda na melhora desta pesquisa e pelo apoio incondicional no desenvolvimento do mesmo.

À minha mãe, Mercedes, por me fazer sempre sonhar e acreditar que com esforço os meus sonhos podem virar realidade.

Ao Lalo (meu Bro), Renata e Joaquim (meu afilhado), por estarem sempre presentes na minha caminhada aqui no Brasil.

Ao meu tio Ludwig, por que ele sempre acreditou em mim, pelos conselhos, as risadas e os lindos momentos que compartilhou sempre comigo, junto com sua família maravilhosa, minha tia Gladys, meu primo Miguel e esposa Lucía, minha prima Bertha, esposo Ricardo e filhote Gabriel e finalmente a caçulinha Bety.

Aos meus alunos de iniciação científica, grandes amigos e excelentes pesquisadores, Vicente, Júlia, Lara e Janayna. Muito obrigado pelo grande apoio nesta pesquisa, sem vocês a pesquisa com certeza não teria sido a mesma.

Aos meus amigos da pós-graduação. Não colocarei nomes, porque adquiri muitos no caminho e me sinto muito feliz pelas pessoas maravilhosas que eles são, pessoas que fazem parte da minha vida, que respeito e admiro muito.

Aos membros do laboratório de fluidodinâmica e de secagem (FEQ) assim como o laboratório de microondas aplicadas (FEA): obrigado pela ajuda e pelas boas conversas.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O aproveitamento de resíduos industriais tem se tornado muito importante para evitar contaminação do meio e reaproveitar recursos até então considerados desperdícios ou perdas nas indústrias químicas e de alimentos. Na atualidade não se tem um valor aproximado da produção de leite de soja no mundo, mas sabe-se que grandes quantidades de resíduo são geradas pela produção do leite de soja, resíduo este que na literatura se denomina “Okara”. Uma forma de aproveitar este resíduo é através de uma operação de secagem. A secagem é uma tecnologia amplamente utilizada pelas indústrias para manter a qualidade e prolongar a vida de prateleira dos produtos devido à diminuição das reações degradativas. Outro resultado da secagem é a diminuição do tamanho e peso do produto, facilitando assim seu transporte e armazenamento. No entanto, ainda hoje, apesar dos avanços tecnológicos nas indústrias químicas e de alimentos, persistem problemas quanto aos métodos específicos adequados para a secagem dos diferentes materiais biológicos, especialmente aqueles usados para alimentação humana. O resíduo de leite de soja é rico em proteínas, fibras e vitaminas, o que o torna de grande importância para diminuir o grande déficit de proteína que tem a população mundial, além de ser possível elaborar novos produtos utilizando o Okara seco como ingrediente e desta forma dar valor agregado aos novos produtos. O Okara apresenta-se como um material particulado muito úmido 80% (b.u.), e com alto teor de umidade superficial. A realização de uma operação mecânica de prensagem anterior à operação de secagem é necessária, para reduzir o teor de umidade até cerca de 60% (b.u.), otimizando dessa maneira a secagem, sem gastos não necessários de energia. O Okara é um material termo-sensível e, enquanto úmido, altamente deteriorável. Após o processo de prensagem, este material é particulado, altamente coesivo, de difícil escoamento, poroso e com alto teor de umidade interna (não podendo ser caracterizado como uma pasta). O objetivo desta pesquisa é estudar a secagem do resíduo do leite de soja, Okara, utilizando três tipos de secadores: secador de leito de jorro, secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas e secador de forno de microondas. A secagem no leito de jorro foi realizada em batelada, enquanto, no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, foi realizada em forma contínua. Foi necessária a utilização de material inerte nestes dois secadores: no secador de leito de jorro o inerte que apresentou melhor fluidodinâmica junto com o Okara úmido foi o polipropileno; diferente do secador rotativo, onde o inerte que apresentou melhor acompanhamento no transporte do Okara

dentro do cilindro foi o poliestireno. O processo de elaboração do Okara foi o mesmo para os dois equipamentos. As variáveis de processo analisadas no secador de leito de jorro foram: temperatura do ar de secagem, razão entre a vazão do ar e a vazão de jorro mínimo e tempo de trituração do material; no secador rotativo com aplicação de microondas as variáveis independentes analisadas foram: temperatura e vazão do ar de secagem e potência das microondas. Para os dois secadores foi elaborado um planejamento fatorial 2^3 , tendo como respostas avaliadas: teor de umidade para um determinado tempo de secagem e constantes do modelo de Page para a cinética de secagem (esta última apenas para o secador de leito de jorro). Foi ainda avaliado o desempenho operacional de ambos secadores, através da produtividade e eficiência térmica do processo. Foram também determinadas as propriedades físicas para o material antes e à saída nos secadores. O secador de forno de microondas foi utilizado para determinar as curvas de secagem, controlando-se as mesmas variáveis independentes analisadas no secador de cilindro rotativo.

Palavras chave: Secagem, Okara, Leito de jorro, Cilindro rotativo, Microondas.

ABSTRACT

The use of industrial residues has become more and more important to avoid the environment contamination and to make use of resources considered wastes in the chemical and food industries. Actually, the approximated soy milk production in the world is unknown; however, it is known that large amounts of its residue, named “Okara”, are generated by its production. Drying is an operation that could make this residue viable. The drying is a technology widely used by the industries to improve the quality and extend the shelf-life of the products due the decrease of the degraded reactions. Another result of a drying process is the decrease of the product’s weigh and size, facilitating its transport and storage. However, until now, despite the technologic overhauls in the chemical and food industries, problems persist on defining the specific appropriate methods to dry different biological materials, mainly those used as human food. The soy milk residue is rich in proteins, fibers and vitamins, what makes it important in decreasing the enormous protein deficit of the world population, beyond the possibility of elaborating new products using Okara as ingredient, thus giving aggregate value to these new products. Okara is a very moist particulate material, 80% (b.u.), with high content of superficial moisture. A mechanic pressing operation before drying is indicated to decrease the Okara initial moisture content to around 60% (b.u.) and in this way optimize the drying process, without non-necessaries energy losses. The Okara is a thermo-sensible material and, while wet, highly deteriorative. After pressing, this material is particulate, highly cohesive, hard flowing, porous and with highly internal moist content (being not possible to be characterized as a paste). The objective of this research is the analysis of the soy milk residue drying using three types of dryers: conventional spouted bed dryer, rotary cylindrical dryer assisted by microwaves and microwave oven drier. The drying in the spouted bed was made in batch process while, in the rotary cylindrical dryer with application of microwaves it was conducted continuously. The use of inert material inside the dryer was necessary in both cases: in the spouted bed dryer, the inert that showed better fluid-dynamic with the Okara was the polypropylene, while in the rotary dryer the inert that showed better transport monitoring of Okara particles was the polystyrene. The same procedure was followed to prepare the Okara for both equipments. The variables analyzed in the spouted bed dryer were: drying air temperature, ratio between the air flow rate and minimum spout flow rate and time of material shredding; in the rotary cylindrical dryer

assisted by microwaves, the independent variables were: drying air temperature and flow rate and microwave power. For both dryers, an experimental factorial design, 2^3 , was applied and the responses analyzed were: Okara moisture content for a fixed drying time and parameters of Page model for the drying kinetics (the last for the spouted bed dryer only). Operational performance was also determined for both dryers by productivity and process thermal efficiency. Physical properties were determined for Okara before drying and after the dryer exit. The microwave oven dryer was used to determine the drying kinetics, controlling the same variables as in the rotary cylindrical dryer.

Keywords: Drying, Okara, Spouted bed, Rotary cylindrical, Microwaves.

Sumário

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE SÍMBOLOS	xxi
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	01
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	05
2.1 A soja	05
2.2 O Okara	07
2.2.1 Aplicações e características do Okara	09
2.3 Secagem	11
2.4 Determinação das curvas de secagem através dos modelos matemáticos	12
2.5 Secagem do Okara	15
2.6 Secador de leito de jorro	16
2.6.1 Condições necessárias para o jorro	19
2.6.2 O mecanismo fluidodinâmico	20
2.6.3 Estabilidade do jorro	22
2.6.3.1 Efeito da geometria da coluna	22
2.6.3.2 Efeito das propriedades do sólido	23
2.6.3.3 Efeito da vazão de gás	23
2.6.4 A secagem em leito de jorro	24
2.7 Secador de cilindro rotativo	27
2.7.1 Variáveis pertinentes ao sistema	27

2.7.2	Algumas considerações para secador rotativo	28
2.7.3	A secagem em cilindro rotativo	28
2.8	Secador com aplicação de microondas	30
2.8.1	Fundamentos de microondas	30
2.8.2	Propriedades dielétricas	32
2.8.3	Secagem com aplicação de microondas	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	Elaboração do Okara	39
3.2	Prensagem	40
3.3	Caracterização física das partículas	42
3.3.1	Diâmetro médio das partículas	42
3.3.2	Densidade aparente das partículas	43
3.3.3	Densidade volumétrica das partículas	44
3.3.4	Densidade real das partículas	44
3.3.5	Porosidade das partículas	45
3.3.6	Ângulo de repouso das partículas	45
3.3.7	Escoabilidade das partículas	46
3.3.8	Circularidade das partículas	46
3.4	Secagem em secador de leito de jorro e em cilindro rotativo com aplicação de microondas	47
3.4.1	Secador de leito de jorro	47
3.4.1.1	Material inerte no leito de jorro	48
3.4.1.2	Testes para determinar a relação massa de material úmido (Okara)/massa de material inerte (polipropileno)	49

3.4.1.3	Secagem em leito de jorro	50
3.4.1.4	Planejamento experimental no leito de jorro	50
3.4.2	Secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas	52
3.4.2.1	Material inerte no cilindro rotativo com aplicação de microondas	53
3.4.2.2	Secagem em cilindro rotativo com aplicação de microondas	53
3.4.2.3	Planejamento experimental no cilindro rotativo com aplicação de microondas	56
3.4.3	Secagem em forno de microondas adaptado	57
3.4.3.1	Planejamento experimental no forno de microondas adaptado	59
3.4.4	Avaliação energética dos processos de secagem	60
3.4.4.1	Avaliação energética para o secador de leito de jorro	60
3.4.4.2	Avaliação energética para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1	Caracterização das partículas inertes	63
4.2	Caracterização do Okara úmido	64
4.3	Secagem no leito de jorro	65
4.3.1	Curvas fluidodinâmicas	65
4.3.2	Quantidade de material úmido (Okara) e material úmido inerte (polipropileno)	66
4.3.3	Cinéticas de secagem para o secador de leito de jorro	68
4.3.4	Resultado do planejamento experimental para o secador de leito de jorro	74
4.3.4.1	Análise estatística para a constante de difusividade k	74

4.3.4.2	Análise estatística para o parâmetro do modelo de Page modificado n	78
4.3.4.3	Análise estatística para a umidade base seca X% (b.s.) medida aos 40 minutos do processo de secagem	81
4.3.5	Caracterização do Okara seco em leito de jorro	87
4.3.6	Avaliação energética do secador de leito de jorro	89
4.4	Secagem com aplicação de microondas	91
4.4.1	Secagem cilindro rotativo com aplicação de microondas	91
4.4.2	Resultado do planejamento experimental para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas	97
4.4.2.1	Análise estatística para umidade média final do produto seco	97
4.4.3	Caracterização do Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas	101
4.4.4	Secagem em forno microondas adaptado com circulação de ar quente	103
4.4.4.1	Resultado do planejamento experimental para o forno de microondas	107
4.4.4.1.1	Análise estatística para o constante de difusividade k	107
4.4.4.1.2	Análise estatística para a umidade aos 50 minutos de secagem no forno adaptado	111
4.4.5	Avaliação energética do secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas	114
4.4.6	Avaliação comparativa da densidade energética dos processos nos secadores de cilindro rotativo com aplicação de microondas e no forno de microondas adaptado	118
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	120

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
ANEXO A - Densidade energética da secagem no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas para o experimento 9 (ponto central)	135
ANEXO B - Densidade energética da secagem no secador de forno de microondas adaptado para o experimento 9 (ponto central)	137

Lista de Figuras

	Página
Figura 2.1 - Comparação da produção anual de soja dos principais produtores nos anos de 1998 e 2008, em milhões de toneladas	5
Figura 2.2 - Comparação da produção anual de soja dos principais produtores nos anos de 1998 e 2008, em valores percentuais	6
Figura 2.3 - Resíduo do leite de soja “Okara”	9
Figura 2.4 - Desenho esquemático do secador de leite de jorro	17
Figura 2.5 - Esquema de um leite de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974)	18
Figura 2.6 - Transição de regimes (MATHUR e EPSTEIN, 1974)	19
Figura 2.7 - Diagrama de regime, trigo, $dp=3,2 \times 6,4 \text{mm}$, $D_c=0,152 \text{m}$, $D_i=0,0125 \text{m}$ (MATHUR e EPSTEIN, 1974)	20
Figura 2.8 - Curva típica de queda de pressão versus velocidade de ar (MARTHUR e EPSTEIN, 1974)	21
Figura 2.9 - Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por microondas	31
Figura 2.10 - Desenho esquemático do secador de cilindro rotativo assistido a microondas. (1) Depósito de matéria prima; (2) Alimentador; (3) Cavidade de microondas (M.O.); (4) Produto seco; (5) Toco triplo; (6) A/B Sistema medidor de M.O.; (7) Guia de onda flexível; (8) Gerador de M.O.; (9) Aquecedor de ar; (10) Sensor de temperatura; (11)/(12) Entrada de ar/exaustão; (13) Ciclone; (14) Painel de controle; (15)/(16) Medidor de fluxo de ar; (17) Ventilador	35
Figura 3.1 - Fluxograma para elaboração de Okara, LESCANO e TOBINAGA (2003)	40
Figura 3.2 - Prensa helicoidal horizontal contínua	40
Figura 3.3 - Okara úmido prensado e estocado	41
Figura 3.4 - Desenho esquemático do porosímetro de mercúrio (WEBB e ORR, 1997) (1) Reservatório de fluido, baixa pressão; (2) Bomba; (3) Multiplicador de pressão; (4) Transdutor de pressão; (5) Reservatório de fluido-alta pressão; (6) Reservatório de mercúrio; (7) Bomba de vácuo. (Allen, 1997b).	44

Figura 3.5 - Secador de leito de jorro	48
Figura 3.6 - Secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas	53
Figura 3.7 - Secador de forno de microondas adaptado com circulação de ar quente	58
Figura 4.1 - Curva característica de queda de pressão do leito versus vazão de ar de jorro; esferas de polipropileno ($d_p = 3,13$ mm, $M_i = 2,0$ kg, $H_o = 19$ cm)	65
Figura 4.2 - Cinéticas de secagem para os experimentos 1, 2, 3, 7, 8 e 9	67
Figura 4.3 - Curvas de secagem no ponto central	69
Figura 4.4 - Influência da temperatura nas curvas de secagem (experimentos 12 e 13)	70
Figura 4.5 - Influência da vazão de ar nas curvas de secagem (experimentos 1 e 3)	70
Figura 4.6 - Influência do tempo de trituração nas curvas de secagem (experimento 16 e experimento 17)	71
Figura 4.7 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para k	75
Figura 4.8 - Superfície de resposta para k em função da temperatura do ar e Q/Q_{jm}	76
Figura 4.9 - Superfície de resposta para k em função da temperatura do ar e tempo de trituração	77
Figura 4.10 - Valores preditos e experimentais para o valor de k	77
Figura 4.11 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para n	79
Figura 4.12 - Superfície de resposta para n em função do tempo de trituração e temperatura do ar	80
Figura 4.13 - Superfície de resposta para n em função do tempo de trituração e Q/Q_{jm}	80
Figura 4.14 - Valores preditos e experimentais para o valor de n	81
Figura 4.15 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para X%	83
Figura 4.16 - Superfície de resposta para X% em função da temperatura do ar e Q/Q_{jm}	84
Figura 4.17 - Superfície de resposta para X% em função da temperatura do ar e tempo de trituração	85
Figura 4.18 - Valores preditos e experimentais para o valor de X%	85
Figura 4.19 - Gráfico de taxa constante e taxa decrescente para o experimento 9	86
Figura 4.20 - Okara seco em leito de jorro	87
Figura 4.21 - Umidade médias finais para os experimentos 9, 10 e 11 (ponto central)	93
Figura 4.22 - Comparação entre os experimentos 1, 2, 3 e 4	94

Figura 4.23 - Comparação entre os experimentos 5, 6, 7 e 8	94
Figura 4.24 - Comparação entre os ensaios 4 e 8	95
Figura 4.25 – Comparação entre os 1 experimentos e 8 (pontos extremos)	96
Figura 4.26 - Umidade final média para os pontos axiais do planejamento	97
Figura 4.27 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para X (b.u.)	99
Figura 4.28 - Superfície de resposta para X (b.u) em função da temperatura e vazão do ar	100
Figura 4.29 - Superfície de resposta para X (b.u) em função da temperatura e potência das microondas	100
Figura 4.30 - Valores preditos e experimentais para o valor de X (b.u)	101
Figura 4.31 – Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas	101
Figura 4.32 – Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Page modificado	105
Figura 4.33 – Gráfico de taxa constante e taxa decrescente para o experimento 9 para o secador de leite de jorro e secador de forno de microondas	107
Figura 4.34 – Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para k	108
Figura 4.35 – Superfície de resposta para k em função da temperatura do ar e potência das microondas	110
Figura 4.36 – Valores preditos e experimentais para o valor de k	110
Figura 4.37 – Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para $U_{t=50\text{min}}$	112
Figura 4.38 – Superfície de resposta para $U_{t=50\text{min}}$ em função da temperatura do ar e potência das microondas	113
Figura 4.39 – Valores preditos e experimentais para o valor de $U_{t=50\text{min}}$	114
Figura 4.40 – Representação esquemática do sistema de operação de secagem	117

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 3.1 - Relações m_o/m_i utilizadas	49
Tabela 3.2 - Planejamento experimental	51
Tabela 3.3 - Planejamento experimental completo para o leito de jorro	51
Tabela 3.4 - Variáveis que se mantiveram constantes no sistema de secagem	54
Tabela 3.5 - Planejamento experimental	56
Tabela 3.6 - Planejamento experimental: Variáveis codificadas e reais	57
Tabela 3.7 - Planejamento experimental	59
Tabela 3.8 - Planejamento experimental: Variáveis codificadas e reais	59
Tabela 4.1 - Caracterização física do material inerte	63
Tabela 4.2 - Características físicas das partículas do Okara úmido	64
Tabela 4.3 - Cinética de secagem – Valores do adimensional X/X_o em função do tempo para diferentes relações m_o/m_i	66
Tabela 4.4 - Parâmetros do modelo de Page	68
Tabela 4.5 - Cinética de secagem para o experimento 9	69
Tabela 4.6 - Variáveis e respostas do planejamento para o secador de leito de jorro	72
Tabela 4.7 - Coeficientes de regressão significativos para k	74
Tabela 4.8 - Análise de variância para a resposta k	76
Tabela 4.9 – Coeficientes significativos para n	78
Tabela 4.10 – Análise de variância para a resposta n	79
Tabela 4.11 - Coeficientes de regressão significativos para $X\%$ (b.s.)	82
Tabela 4.12 – Análise de variância para a resposta $X\%$ (b.s.)	83
Tabela 4.13 - Caracterização física do Okara seco em leito de jorro	88
Tabela 4.14 - Avaliação energética por unidade de tempo da secagem em leito de jorro	89
Tabela 4.15 - Umidade média final % (b.u.) no secador de cilindro rotativo	92
Tabela 4.16 - Coeficientes de regressão significativos para X (b.u.)	98
Tabela 4.17 - Análise de variância para a resposta X (b.u.)	99

Tabela 4.18 – Caracterização física do Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas	102
Tabela 4.19 - Cinética de secagem do experimento 9 (Ponto central)	104
Tabela 4.20 - Variáveis e respostas do planejamento para o secador de forno de microondas	106
Tabela 4.21 – Coeficientes de regressão significativos para k	108
Tabela 4.22 – Análise de variância para a resposta k	109
Tabela 4.23 – Coeficientes de regressão significativos para unidade após 50 minutos de secagem	111
Tabela 4.24 – Análise de variância para a resposta $U_{t=50\text{min}}$	112
Tabela 4.25 – Condições do ar de secagem para os experimentos 1, 8, 9, 10 e 11	115
Tabela 4.26 – Resultados energéticos por unidade de tempo para os experimentos 1, 8, 9, 10 e 11	116
Tabela 4.27 – Resultados da secagem em termos do balanço de energia por unidade de tempo para os experimentos 1, 8 e 9	118
Tabela 4.28 – Resultados da densidade energética dos processos nos diferentes secadores	119

Lista de Símbolos

Símbolo	Unidade
a : Coeficiente de correlação entre massa de ar utilizada e massa de água evaporada	[-]
A : Constante do modelo de Page	[-]
A_p : Área da seção da partícula	[mm ²]
A_1 : Água evaporada	[kg.h ⁻¹]
A_2 : Água removida pelo ar	[kg de H ₂ O.(kg ar seco) ⁻¹]
A_3 : Água total removida	[kg de água.h ⁻¹]
A_4 : Água removida pelo ar	[g.(kg ar seco) ⁻¹]
A_5 : Água total removida pelo ar	[kg de H ₂ O.h ⁻¹]
C : Circularidade	[-]
C _{ls} : Calor latente da soja	[cal.g ⁻¹]
C _{p0} : Calor específico do Okara	[kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
C _{pi} : Calor específico do inerte	[kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
C _{pp} : Calor específico do polipropileno	[kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
C _{ps} : Calor específico da soja	[kJ.kg ⁻¹ .°C ⁻¹]
dp : Diâmetro da partícula no leito de jorro	[mm]
\bar{D} : Diâmetro médio da abertura da peneira superior e inferior	[mm]
$\overline{D_p}$: Diâmetro médio da partícula	[mm]
D _c : Diâmetro da coluna do secador de leito de jorro	[m]
D _{ef} : Difusividade efetiva	[-]
D _r : Diâmetro do cilindro rotativo	[m]
D _i : Diâmetro do orifício de entrada do secador de leito de jorro	[m]
E : Energia retirada pelo ar por unidade de tempo	[kJ.s ⁻¹ =kw]
E _{água} : Energia da água evaporada por unidade de tempo	[kJ.s ⁻¹ =kw]
E _{aq} : Energia do ar quente por unidade de tempo	[kj ⁻¹ =kW]

E_{ar}	: Energia do ar por unidade de tempo	$[kJ.s^{-1}=kW]$
ED	: Energia dissipada no processo	$[%]$
E_e	: Energia específica	$[J.kg^{-1}]$
E_{esp}	: Energia específica consumida por unidade de tempo para remover 1 kg de água	$[MJ.(kg \text{ de } H_2O)^{-1}]$
EF	: Eficiência do processo	$[%]$
E_{hO}	: Energia calorífica do Okara por unidade de tempo	$[kJ.s^{-1}=kW]$
E_{hps}	: Energia calorífica do polipropileno por unidade de tempo	$[kJ.s^{-1}=kW]$
E_{inerte}	: Energia consumida para aquecer o inerte	$[kJ.s^{-1}=kW]$
E_{MW}	: Energia das microondas por unidade de tempo	$[kJ.s^{-1}=kW]$
E_{MWR}	: Energia das microondas refletida por unidade de tempo	$[kJ.s^{-1}=kW]$
E_{MWT}	: Energia total das microondas por unidade de tempo	$[kJ.s^{-1}=kW]$
Ev	: Taxa de evaporação volumétrica	$[kg.m^{-3}.s^{-1}]$
E_{Okara}	: Energia consumida para aquecer o Okara	$[kJ.s^{-1}=kW]$
ED	: Energia dissipada	$[%]$
ET	: Eficiência térmica	$[%]$
F	: Parâmetro de Distribuição F	$[-]$
h	: Altura do leito	$[m]$
h_M	: Altura máxima de jorro	$[m]$
H	: Entalpia	$[kJ.kg^{-1}]$
H_{aq}	: Entalpia de entrada da água	$[kJ.(kg \text{ de ar seco})^{-1}]$
H_o	: Altura do leito de jorro nos experimentos	$[cm]$
H_e	: Entalpia de entrada do ar	$[kJ.(kg \text{ de ar seco})^{-1}]$
H_{ex}	: Entalpia do ar de exaustão	$[kJ.kg^{-1}]$
H_h	: Entalpia de entrada do ar quente	$[kJ.kg^{-1}]$
H_i	: Entalpia de entrada do ar de entrada	$[kJ.kg^{-1}]$
H_s	: Entalpia de saída do ar	$[kJ.(kg \text{ de ar seco})^{-1}]$

H_{wO}	: Energia da água evaporada do okara por unidade de tempo	[kJ.s ⁻¹ =kW]
k	: Constante de secagem	[s ⁻¹]
L	: Comprimento do secador de tambor rotativo	[m]
m_p	: Massa das partículas	[g]
m_i	: Massa de inertes	[g]
m_o	: Massa de Okara	[g]
M_a	: Vazão mássica de alimentação	[kg.h ⁻¹]
M_{oc}	: Vazão mássica de entrada de Okara	[kg.h ⁻¹]
M_{os}	: Vazão mássica de saída de Okara	[kg.h ⁻¹]
M_{total}	: Vazão mássica de material + inerte	[kg.h ⁻¹]
M_{ps}	: Vazão mássica de polipropileno	[kg.h ⁻¹]
M_{ou}	: Vazão mássica de Okara	[kg.h ⁻¹]
n	: Constante do modelo de Page	[-]
P	: Potência das microondas	[W]
P_p	: Perímetro da seção da partícula	[mm]
p	: Intervalo de confiança	[-]
Q	: Vazão de jorro	[kg.min ⁻¹]
Q_{ar}	: Vazão do ar de jorro	[kg.min ⁻¹]
Q_{jm}	: Vazão de jorro mínimo	[-]
R	: Coeficiente de correlação	[-]
r	: Raio	[mm]
R_{esf}	: Raio máximo (da partícula esférica)	[mm]
t	: Parâmetro de Student	[-]
T	: Temperatura do ar de secagem	[°C]
t	: tempo	[s]
T_{aa}	: Temperatura do ambiente	[°C]
$\tan \alpha$: Tangente de perdas	[-]
T_{bs}	: Temperatura de bulbo seco	[°C]
T_{bu}	: Temperatura de bulbo úmido	[°C]

T_{ev}	: Taxa de evaporação volumétrica	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}]$
T_{final}	: Temperatura final da soja	$[\text{°C}]$
T_h	: Temperatura do ar quente	$[\text{°C}]$
$T_{inicial}$: Temperatura inicial da soja	$[\text{°C}]$
T_{orv}	: Temperatura de orvalho	$[\text{°C}]$
U_0	: Umidade inicial do Okara	$[\%]$
U_f	: Umidade final do Okara	$[\%]$
U_j	: Velocidade do ar no secador de leito de jorro	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
U_{mf}	: Velocidade mínima de fluidização no leito de jorro	$[\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}]$
UR	: Umidade relativa	$[\%]$
$U_{t=50\text{min}}$: Umidade após 50 minutos de secagem (b.u.)	$[\%]$
V	: Vazão do ar	$[\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}]$
V_{esp}	: Volume específico do ar	$[\text{m}^3 \cdot (\text{kg ar seco})^{-1}]$
V_{poros}	: Volume dos poros da partícula	$[\text{cm}^3]$
V_{recp}	: Volume do recipiente	$[\text{cm}^3]$
V_s	: Volume da estrutura do sólido	$[\text{cm}^3]$
V_{total}	: Volume total da partícula	$[\text{cm}^3]$
W	: Água evaporada do Okara	$[\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}]$
w	: Água removida por quantidade de ar seco	$[\text{g} \cdot (\text{kg ar seco})^{-1}]$
w_o	: Umidade na saída do secador	$[\text{g} \cdot (\text{kg ar seco})^{-1}]$
w_i	: Umidade na entrada do secador	$[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
W_e	: Umidade absoluta do ar de entrada	$[\text{kg de H}_2\text{O} \cdot (\text{kg ar seco})^{-1}]$
W_s	: Umidade absoluta do ar de saída	$[\text{kg de H}_2\text{O} \cdot (\text{kg ar seco})^{-1}]$
X_1	: Variável codificada do planejamento experimental	$[-]$
X_2	: Variável codificada do planejamento experimental	$[-]$
X_3	: Variável codificada do planejamento experimental	$[-]$
$X\%$: Umidade (base seca)	$[\%]$
X_{bu}	: Umidade (base úmida)	$[\%]$
X_{bs}	: Umidade (base seca)	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$

X_0	: Umidade inicial (base seca)	$[\text{g de H}_2\text{O (g matéria seca)}^{-1}]$
X_e	: Umidade de equilíbrio (base seca)	$[\text{g de H}_2\text{O (g matéria seca)}^{-1}]$
Y	: Razão de quantidade de umidade	$[-]$
ΔP	: Queda de pressão no secador de leito de jorro	$[\text{cm}_{\text{água}}]$
ΔP^*	: Queda de pressão no secador de leito de jorro	$[\text{kN.m}^{-2}]$
ΔP_j	: Queda de pressão no jorro estável	$[\text{cm}_{\text{água}}]$
ΔP_{jm}	: Queda de pressão no jorro mínimo	$[\text{cm}_{\text{água}}]$
ΔP_m	: Queda de pressão máxima	$[\text{kN.m}^{-2}]$
ΔP_{\max}	: Queda de pressão máxima	$[\text{cm}_{\text{água}}]$
Δx	: Fração mássica retida na peneira	$[-]$
α	: Ponto axial do planejamento experimental	$[-]$
Φ	: Ângulo de repouso	$[\text{°}]$
ε'	: Permissividade relativa (constante dielétrica)	$[-]$
ε''	: Fator de perda relativa	$[-]$
ε_p	: Porosidade	$[\%]$
λ_{ev}	: Calor de evaporação da água	$[\text{kJ.g}^{-1}]$
ρ_{ap}	: Densidade aparente	$[\text{g.cm}^{-3}]$
ρ_{real}	: Densidade real	$[\text{g.cm}^{-3}]$
ρ_{vol}	: Densidade volumétrica	$[\text{g.cm}^{-3}]$
τ	: Tempo de trituração da soja	$[\text{s}]$

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Dentro da engenharia química, os três grandes temas de interesse dos países desenvolvidos no início deste século são: saúde humana, energia e problemas ambientais. O aproveitamento do resíduo de leite de soja através de novas metodologias ajuda a desenvolver estes três temas. Em relação à saúde humana, a soja é um produto amplamente estudado para a prevenção de doenças; na área de energia, a utilização de métodos convencionais combinados aos de aplicação de microondas geram aumentos na eficiência dos equipamentos. Por outro lado, no âmbito de problemas ambientais, pode-se evitar poluição do meio, aproveitando o resíduo do leite de soja através de uma operação de secagem.

Estimativas da FAO (Food and Agriculture Organization) e da OMS (Organização Mundial da Saúde, ONU) indicam que a quantidade de proteína requerida diariamente por uma pessoa adulta é de aproximadamente 0,75g por quilograma de peso corporal. Considerando que a população mundial em 2010 será aproximadamente 6,91 bilhões de habitantes (UNITED NATIONS, 2008) e estimando-se ainda um valor de 60 kg de peso corporal médio, atinge-se uma necessidade de consumo de 113,5 milhões de toneladas por ano. A desnutrição protéica energética afeta principalmente as crianças, ocasionando graves danos no desenvolvimento das capacidades física, mental, imunológica e reprodutora das pessoas. Uma das fontes mais importantes de proteínas vegetais é a soja, cujos derivados são reconhecidos pelo seu alto valor biológico e nutricional. A FAO e a OMS deram à soja a avaliação de PDCAAS 1,0 (Protein Digestibility – Corrected Amino Acid Score), o que representa o valor máximo que um alimento protéico pode atingir por seu conteúdo de aminoácidos utilizados para o crescimento.

A produtividade de materiais alimentícios de origem animal é menos eficiente e consideravelmente mais custosa do que a de materiais de origem vegetal. Por essas razões, a tendência da indústria moderna tem sido procurar matérias-primas vegetais alternativas, de alto teor protéico e vitamínico, que possam substituir ou complementar as proteínas de origem animal na formulação de seus produtos. Dentre as diversas opções, a soja ocupa um lugar relevante, não só pela quantidade e qualidade das proteínas disponíveis, mas também pelo seu menor custo.

Tradicionalmente, as indústrias brasileiras que produzem o leite de soja não aproveitam o resíduo do processo (Okara) para a alimentação humana, destinando-o à alimentação animal ou simplesmente ao descarte. O Okara apresenta-se como uma massa de alta coesão, composição química complexa e elevado teor de umidade 80% (b.u.), o que resulta em uma alta capacidade de deterioração em condições normais de umidade e temperatura. O processo de degradação desse resíduo descartado gera fortes e desagradáveis odores, além das contaminações na indústria e do meio ambiente. A preocupação com este problema tem estimulado o desenvolvimento de diversos estudos para o Okara, visando o aproveitamento deste resíduo em diferentes processos de reutilização. Dentre eles, destacam-se os estudos de aproveitamento do resíduo particulado do leite de soja (Okara) através da secagem.

Segundo LESCANO (2004) a secagem promove um significativo aumento no tempo de vida de prateleira do Okara, viabilizando o transporte e armazenamento sem deterioração, e permitindo assim a utilização na elaboração de novos produtos de valor protéico agregado. O Okara desidratado, com elevado conteúdo de fibras e proteínas, poderá ser utilizado tanto na incorporação quanto na elaboração de produtos mais nutritivos e com maior valor agregado, como pães, massas, sopas e cremes, entre outros.

A proposta deste trabalho é apresentar os resultados de diferentes tipos de secagem de Okara – convectiva e com aplicação de microondas, contínua e em batelada – e fazer um estudo comparativo de eficiência energética nos diferentes processos de secagem, com a finalidade de obter um produto de características físicas adequadas a um produto farináceo (umidade final de 8% b.u.) com gastos menores de energia.

Para estudar a secagem deste produto, foi desenvolvido um planejamento fatorial completo para a secagem de Okara em três tipos de secadores diferentes: (i) secador de leito de jorro (batelada) (ii) secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas (contínuo) e (iii) secador adaptado de forno de microondas (batelada); nos últimos dois secadores as variáveis independentes analisadas foram as mesmas, de modo a se estabelecer uma comparação entre os resultados. O objetivo dos planejamentos foi identificar as variáveis estatisticamente significativas na secagem do Okara pelos diferentes métodos, analisando como resposta: umidade final, coeficientes de difusividade e constante n do modelo de Page modificado, além de comparar os valores das difusividades em cada processo. Em testes preliminares, verificou-se a necessidade da utilização de partículas inertes na

secagem, tanto no secador de leite de jorro, como no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, para facilitar a movimentação do material e quebra dos aglomerados dentro dos secadores. Os materiais inertes avaliados foram: polipropileno, poliestireno e ABS[®] (Acrylonitrile Butadiene Styrene). O polipropileno foi o material que se mostrou mais adequado para realizar a secagem em leite de jorro, devido à melhor fluidodinâmica da mistura dentro do leite enquanto o poliestireno foi o material que acompanhou melhor o transporte contínuo do Okara dentro do secador de cilindro rotativo. Estes materiais inertes ajudam a movimentação do produto e a secagem dentro de ambos secadores, evitando aglomerações das partículas e aderência às paredes do equipamento. Além disso, foi feito um estudo comparativo dos parâmetros de eficiência e energia no ponto central do planejamento dos dois processos: secagem em leite de jorro com inertes e secagem em secador de cilindro rotativo assistido a microondas com inertes. Também foi realizada a análise estatística do planejamento fatorial completo da secagem das partículas do resíduo do leite de soja (Okara) com material inerte, tendo como respostas os parâmetros de eficiência e energia do processo de secagem no cilindro rotativo com aplicação de microondas.

O objetivo geral desta pesquisa foi estudar comparativamente as secagens do resíduo de leite de soja “Okara” em três tipos diferentes de secadores: leite de jorro e de cilindro rotativo e forno com aplicação de microondas.

Os objetivos específicos foram:

- 1) Determinação das variáveis significativas na secagem para cada tipo de secador, assim como o material inerte utilizado, tanto para o secador de leite de jorro quanto para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas;
- 2) Estudo estatístico do planejamento experimental completo para cada secador;
- 3) Análises físicas do material inerte e do Okara inicial (posterior a prensagem) e Okara final (ponto central do planejamento experimental) posterior à secagem;
- 4) Estudo comparativo dos parâmetros de eficiência e energia dos processos de secagem de Okara.

No Capítulo 2 apresenta-se a literatura relacionada ao Okara, como produção mundial da soja e do Okara, necessidade de proteína no mundo, aplicações do Okara,

modelos matemáticos para descrever o processo de secagem e princípios de secagem por convecção e com aplicação de microondas.

O Capítulo 3 foi dividido em cinco etapas. Na primeira etapa, mostra-se o processo de elaboração de Okara como subproduto do leite de soja; na segunda, mostra-se o processo de prensagem como alternativa viável e econômica para a redução de quantidades de energia gastos em processos mecânicos comparados com processos convectivos ou com aplicação de microondas; na terceira etapa, apresenta-se a metodologia para caracterização física das partículas; na quarta etapa, apresenta-se a metodologia da secagem no secador de leite de jorro e secador rotativo com aplicação de microondas e na quinta e última etapa, apresenta-se a metodologia para a avaliação energética de ambos secadores.

No Capítulo 4 apresentam-se os resultados em quatro etapas. Na primeira etapa são mostrados os resultados da caracterização física do material inerte; na segunda etapa, os resultados da caracterização física da matéria prima ou Okara úmido, após o processo de prensagem; na terceira parte, os resultados da secagem no leite de jorro (cinética de secagem, resultados dos planejamentos experimentais, caracterização do Okara seco em leite de jorro e avaliação energética no secador do leite de jorro) e na quarta e última etapa, os resultados da secagem no secador de cilindro rotativo (resultados do planejamento experimental, caracterização do Okara seco em secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, elaboração da cinética de secagem num secador adaptado de forno de microondas e avaliação energética do secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas).

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais desta pesquisa e as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A soja

A soja (*Glycine max*) é uma leguminosa domesticada pelos chineses há cerca de cinco mil anos. Há três mil anos, se espalhou pela Ásia e no início do século XX passou a ser cultivada comercialmente nos Estados Unidos. A partir de então, houve um rápido crescimento na produção, com o desenvolvimento dos primeiros cultivos comerciais (LIU, 2004).

No Brasil, a soja foi introduzida na Bahia por Gustavo Dutra, em 1882, com sementes trazidas dos Estados Unidos. Entretanto, os primeiros relatos do seu cultivo comercial datam de 1924, no Rio Grande do Sul. Em 1941, a soja aparecia pela primeira vez nas estatísticas agrícolas oficiais (EMBRAPA, 1981; COSTA, 1996).

A estimativa atual, para 2008, é que o mundo produza em torno de 219,85 milhões de toneladas de soja. Destas, 70,36 milhões de toneladas são produzidas nos Estados Unidos (32,0%); 61,00 milhões de toneladas produzidas no Brasil (27,7%); 47,00 milhões de toneladas produzidas na Argentina (21,4%) e 14,30 milhões de toneladas produzidas na China (6,5%), (USDA, 2008). Esses dados podem ser visualizados na Figura 2.1.

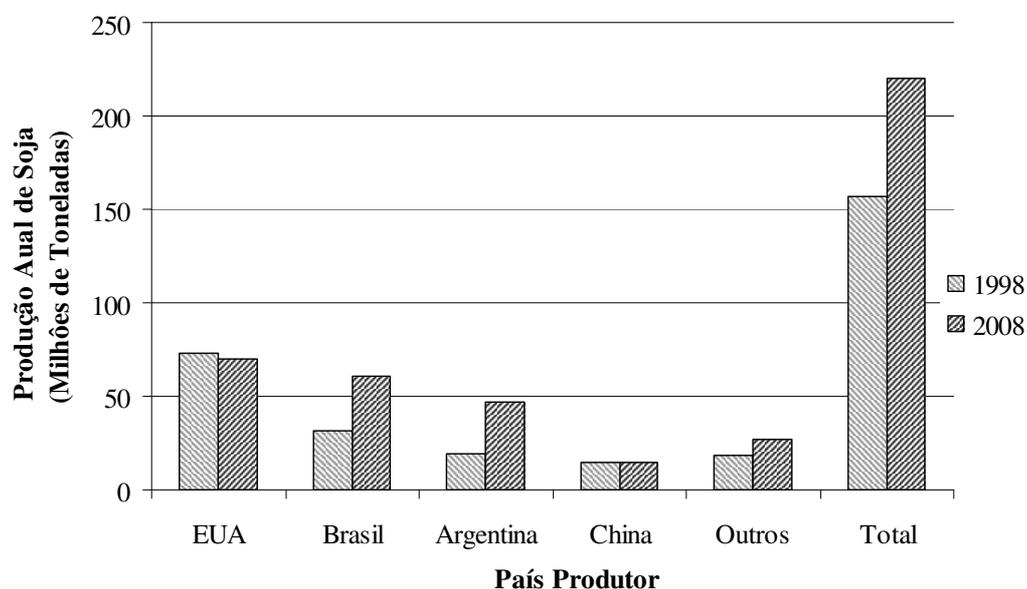


Figura 2.1 - Comparação da produção anual de soja dos principais produtores nos anos de 1998 e 2008, em milhões de toneladas

O Brasil, além de ser atualmente o segundo produtor mundial de soja, é também o país que apresentou o maior crescimento de produção dentro dos últimos dez anos, como se observa nos dados e na Figura 2.2. No ano de 1998 a produção de soja no mundo foi de 156,73 milhões de toneladas, o que mostra um aumento percentual de 40,27%. Neste mesmo período, as estatísticas mostram que o aumento da produção de soja no Brasil foi de 31,31 milhões toneladas para 61,00 milhões de toneladas, 29,7 milhões de toneladas a mais, saltando de 19,98% em 1998 para 27,70% em 2008 da produção de mundial; a Argentina teve o segundo maior crescimento neste período, aumentando de 19,2 milhões de toneladas em 1998 para 47,00 milhões de toneladas em 2008, ou seja, de 12,25% da produção mundial em 1998, passou a contribuir com 21,4% do mercado em 2008; nos EUA, houve uma queda, uma vez que a produção caiu de 73,18 milhões de toneladas em 1998 para 70,36 milhões de toneladas em 2008, deixando de significar 46,69% da produção mundial em 1998 e passando a significar 32,0% da produção de 2008; e a China, por sua vez, também apresentou uma queda, partindo de 14,728 milhões de toneladas em 1998 para 14,300 milhões de toneladas previstas para 2008, passando a contribuir com 6,50% do mercado de 2008 contra 9,40% em 1998. (USDA, 1999; USDA 2008).

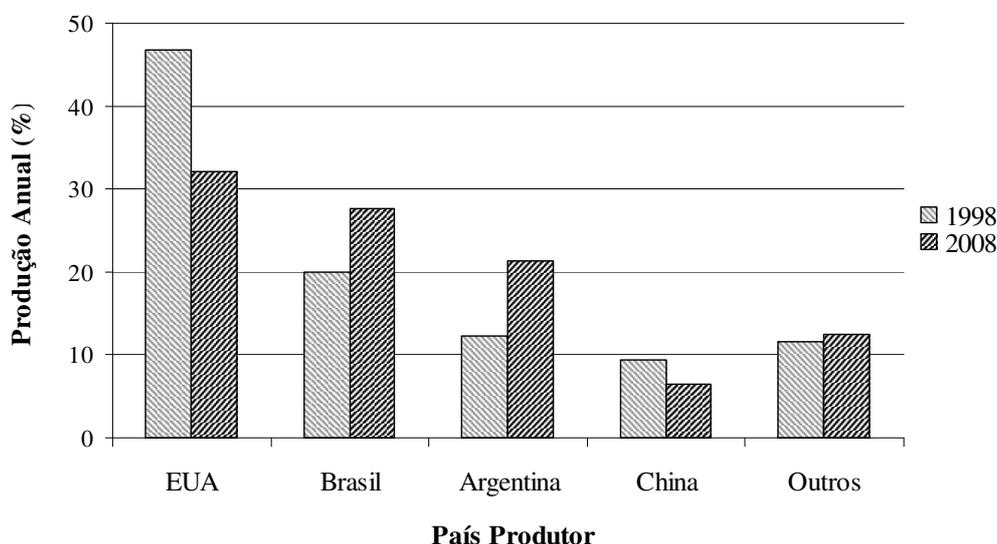


Figura 2.2 - Comparação da produção anual de soja dos principais produtores nos anos de 1998 e 2008, em valores percentuais

Isso demonstra o grande potencial que o Brasil apresenta de crescer cada vez mais no mercado mundial de soja, assumindo mercados que antes pertenciam ao grande produtor em queda (Estados Unidos). Esse aumento tende a potencializar a produção de leite de soja e, por consequência, a obtenção de mais Okara em um curto período de tempo, o que destaca a importância de um método de secagem suficientemente eficiente e rápido para acompanhar as demandas de produção, e melhorar as características físicas de Okara utilizado para consumo humano.

Apesar de não existirem estimativas oficiais da produção de leite de soja no mundo, o potencial de aumento da produção deste derivado, seguindo a tendência da própria soja, pode ser observado, por exemplo, com base em um programa dos órgãos internacionais de finanças (The World Bank, IITA, FAO, UNICEF, WHO, The OPEC Fund, AIS, FAZ) e outros investidores privados, que pretende beneficiar até 81,7 milhões de crianças em 61 países. O programa propõe um investimento, tanto público quanto privado, de modo a produzir cerca de 21,8 litros de leite de soja, por criança, por ano, totalizando uma produção mundial de 1,78 bilhões de litros por ano, apenas para esse programa (SHURTLEFF e AOYAGI, 2007).

Segundo CABRAL e CASTRO (1994), um quilograma de soja rende, em média, sete quilogramas de leite de soja. Para estimar a quantidade de Okara desperdiçado só no programa descrito por SHURTLEFF e AOYAGI (2007), pode-se avaliar que serão necessárias aproximadamente 254 mil toneladas de soja por ano para tal produção de leite de soja, o que geraria neste projeto, 102 mil toneladas de Okara seco, apto para consumo humano.

O projeto e os cálculos supracitados, considerando apenas uma das inúmeras iniciativas envolvendo produção de leite de soja, são significativos para demonstrar a enorme quantidade de Okara que deverá ser obtida em todo o mundo ao longo dos próximos anos.

2.2 O Okara

Segundo VAN DER RIET *et al.* (1989), o Okara seco contém de 25,4 a 28,7% de proteína, de 9,3 a 10,9% de lipídeos e de 52,8 a 58,1% de fibras. No trabalho de LESCANO (2004), encontrou-se um alto conteúdo de proteína bruta (42%) e baixo conteúdo de fibra (13%).

Segundo SUREL e COUPLET (2005), o Okara seco apresentou 37,5% de proteínas, 20% de lipídeos, 6,6% de açúcares e 1,8% de amidos. Estes valores foram comparáveis com a composição de Okara descritos por SCHWEIZER *et al.* (1983), que por sua vez registrou um conteúdo de proteína de 37,5% e de 31,1% de fibra alimentar. Este último valor de teor de fibras foi intermediário entre os de VAN DER RIET *et al.* (1989) (de 53 a 58% de fibras) e de BOURNE *et al.* (1976) (14,5% de fibras solúveis).

Os valores de lipídeos obtidos por SUREL e COUPLET (2005) (20% da matéria seca), foram superiores aos resultados obtidos por BOURNE *et al.* (1976), (15,2% de lipídeos) e VAN DER RIET *et al.* (1989) (9,3 a 10,9% de lipídeos).

Segundo GUERMANI *et al.* (1992), o Okara apresenta cerca de 27 % de proteína e 22% de lipídeos. MA *et al.* (1996) obtiveram valores de cerca de 26,8% de proteína, 12,3% de lipídeos e 52,9% de carboidratos.

O'TOOLE (1999) comparou as composições de Okara obtidas por BOURNE *et al.* (1976), VAN DER RIET *et al.* (1989), GUERMANI *et al.* (1992) e MA *et al.* (1996). Segundo ele, a composição decimal do Okara depende da quantidade de água extraída dos grãos de soja, além da quantidade de água adicionada para extrair os componentes solúveis residuais. Segundo SUREL e COUPLET (2005), a composição do Okara depende também do processo de elaboração do leite de soja (principalmente a etapa de moagem) e da qualidade da matéria-prima (sementes e variedades de soja).

Outra característica importante na composição do Okara é que cerca de um terço das isoflavonas (substância que ajuda a prevenir o câncer) que se encontram no grão da soja são transferidas para o Okara (JACKSON *et al.*, 2001). BOWLES e DEMIATE (2006) encontraram uma concentração de 35,7 mg% de isoflavonas totais no subproduto Okara analisado. A isoflavona genistina atingiu a maior concentração dentre todas as isoflavonas determinadas, 9,3 mg%, seguida de 6"-O-Acetil-genistina com 8,19 mg%, 6"-O-Malonil-daidzina com 7,2 mg% e daidzina com 5,4 mg%. Pode-se admitir também que o Okara apresenta aproximadamente 108 mg% de isoflavonas totais. Esta pode variar dependendo da variedade de com concentrações de isoflavonas abrangendo a faixa de 141,0 mg% a 389 mg%. CARRÃO-PANIZZI *et al.* (1999), encontraram variações do teor de isoflavonas de diferentes cultivares de soja em torno de 140 mg% a 300 mg%, enquanto PARK *et al.* (2001) encontraram concentrações que variaram de 114 mg% a 300 mg%.

Uma das funções já comprovadas das isoflavonas é seu poder antioxidante o que ajuda a prevenir doenças crônico-degenerativas como alguns tipos de câncer e doenças cardíacas. Por tal motivo é muito importante destacar a presença das isoflavonas em produtos desenvolvidos a base de Okara, dando origem a novos produtos para consumo humano que ajudem na prevenção de certas patologias.

O Okara que se mostra na Figura 2.3 é obtido do processamento do leite de soja, sendo separado por filtração após aquecimento a 100°C, conforme procedimento descrito por LESCANO (2004).



Figura 2.3 - Resíduo do leite de soja “Okara”

Para a obtenção de Okara, satura-se um quilograma de grãos de soja do mercado local em 3 litros de água, durante 8 horas, período no qual o grão aumenta até aproximadamente 2,3 vezes a sua massa. De cada quilograma do Okara úmido, que apresenta umidade de 80% (b.u.), obtém-se uma média de 220 gramas de Okara seco com aproximadamente 8% (b.u.) de umidade. Em outras palavras, para cada quilograma de soja bruta utilizada na elaboração do leite de soja, obtém-se aproximadamente 0,4 kg de Okara seco, apto para o consumo humano.

2.2.1 Aplicações e características do Okara

Apesar dos componentes nutritivos e funcionais do Okara (alta quantidade de carboidratos insolúveis, fibras dietéticas, proteínas e gordura de soja, além de um suave aroma quando cozido), que tornam potencial sua aplicação em produtos alimentícios como pães e outros produtos de confeitaria, de modo a aumentar a qualidade nutricional e o valor agregado desses produtos, seu uso é mais comum na fabricação de rações para animais

(PARK *et al.*, 2001). Isso ocorre devido ao fato do Okara ser considerado um resíduo da fabricação do leite de soja (LIU, 2004). LESCANO (2004) propõe a utilização deste resíduo já seco, além de um tratamento térmico nos grãos de soja para evitar o processo enzimático que dá o sabor de grão no leite de soja e no resíduo.

A maior barreira da utilização do Okara em alimentação humana é realmente a rápida degradação. Não refrigerado, o Okara fermenta em aproximadamente 8 horas, impossibilitando seu consumo. Deste modo, a melhor maneira de proceder seria a imediata utilização do Okara após a obtenção do leite de soja. Entretanto, os altos volumes gerados fazem com que seja impraticável este processo. Assim, a melhor solução é secar o Okara, possibilitando seu uso posterior (PERUSSELLO, 2008).

No oriente, o Okara úmido faz parte da dieta alimentaria do homem. No ocidente, tem conquistado cada vez mais espaço, sendo usado como ração animal e como parte de adubo composto, e a partir dos anos 70 ele vem sendo introduzido na alimentação humana (SHILTON, 2002).

Segundo CORONEL e TOBINAGA (2004), o Okara tem a capacidade de reter água e óleo simultaneamente, o que torna a utilização do Okara uma alternativa viável para evitar a separação de fases em produtos com essas características. Nesta pesquisa foi estudada a capacidade de absorção de água e óleo assim como a atividade de água no produto seco, propriedade física que está diretamente relacionada com a capacidade de conservação do alimento.

RIBEIRO (2006) estudou a adição de Okara na fabricação de paçoca com a finalidade de aumentar o valor protéico do produto, verificando que a substituição do fubá de amendoim por Okara favoreceu o aumento de proteínas, extrato etéreo e fibras na paçoca, além de amenizar a falta de lisina e manter a mesma quantidade de aminoácidos da soja no produto. Essa adição de Okara não depreciou a aceitabilidade do produto final em relação à cor, ao sabor, à textura e à impressão geral.

No trabalho de BOWLES e DEMIATE (2006), foi estudado o enriquecimento do pão francês com Okara, visando o aumento da concentração de lipídeos, proteínas e fibras. Os pães com 10% de adição de Okara (que podem receber denominação “rico em fibras”) tiveram bons níveis de aceitação sensorial, e revelaram média 4,2 numa escala de intenção de compra de 1 a 5, mostrando, então, uma avaliação favorável do ponto de vista comercial.

Na Universidade Nacional de La Plata (Argentina), foi realizado um projeto de empreendimento solidário de produção, elaboração e distribuição de alimentos de soja para assistência alimentar em refeitórios comunitários daquela cidade. Neste projeto, vários produtos provenientes de soja entram como matérias-primas básicas no processamento de alimentos. O subproduto Okara faz parte das matérias-primas utilizadas, sendo relatado como um composto de alto valor nutritivo. O Okara é incorporado em alimentos como hambúrgueres e produtos de panificação (PROYETO PILOTO, 2002).

WALISZEWSKI, PARDIO e CARREON (2002), após avaliação química e sensorial do Okara, incluindo um perfil da composição de aminoácidos, complementaram omeletes com diferentes porcentagens de Okara, obtendo resposta sensorial positiva em formulações onde o Okara foi adicionado em concentrações de até 10%. Essa adição aumentou a concentração de lisina, triptofano, treonina e isoleucina. LAROSA *et al.* (2003) demonstraram que a incorporação de farinha de Okara na fabricação de biscoitos doces resulta em produtos que apresentam características sensoriais de boa aceitação pelos consumidores. GENTA *et al.* (2002) obtiveram boa aceitação sensorial em formulações de doce de soja elaborado com amendoim. A formulação com 18,3% de Okara e 27,4% de amendoim foi a que obteve melhor aceitação.

Pelos resultados promissores das pesquisas relatadas anteriormente, pode-se concluir que o resíduo de leite de soja (Okara) apresenta-se como um produto de alta aceitação e altamente favorável na elaboração de novos produtos. Portanto, deve-se estudar com muito cuidado um processo de secagem adequado de forma a se obter Okara seco próprio para ser incorporado em produtos alimentícios.

2.3 Secagem

Sabe-se que povos primitivos praticavam a secagem de diferentes tipos de carne ao sol, para sua preservação. Atualmente, esse ainda é um método de preservação aplicado e muito estudado.

A secagem refere-se, em geral, à remoção de líquido de um sólido através do fornecimento de calor (PERRY, 1984). O calor do agente de secagem (geralmente ar quente) é absorvido pelo material, e transforma-se em calor latente necessário para remover a água de sua superfície. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor da água entre o ar e o interior da partícula ocasiona uma transferência de massa para remoção de

água do produto. Como parte do calor que chega ao produto é utilizada para evaporar água, toda a transferência de massa é feita na forma de vapor de água na superfície (FELLOWS, 2000). A secagem pode ser definida, de um modo geral, como um processo complexo que envolve a transferência simultânea de calor e massa, sendo que o transporte de umidade do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente.

O processo de secagem é empregado em alimentos para redução da atividade de água, visando à redução da atividade enzimática e da velocidade de crescimento dos microorganismos e o aumento da vida de prateleira dos produtos. Ademais, a secagem facilita etapas como manuseio, armazenamento e transporte do produto, além de possibilitar o aumento da concentração de nutrientes (KAREL e LUND, 2003). Porém, a secagem inadequada pode causar deterioração na qualidade e no valor nutricional do produto e por isso é importante utilizar processos e equipamentos que irão minimizar os efeitos indesejáveis obtendo-se taxas de secagem eficientes (SHILTON, 2002).

Dependendo da intensidade e efeito da secagem, pode-se ter a perda ou inutilidade do produto para uma determinada função, seja ela alimentícia ou germinativa (PERUSSELLO, 2008). Para obter um produto final de boa qualidade e apto para consumo humano é muito importante controlar as variáveis que influenciam a composição do produto durante o processo de secagem (LESCANO, 2004).

2.4 Determinação das curvas de secagem através dos modelos matemáticos

Na literatura, encontram-se vários modelos matemáticos para o estudo da cinética de secagem de produtos úmidos. Um dos principais mecanismos de transferência de umidade que ocorre na secagem é a difusão de líquido e de vapor. Difusão é o processo pelo qual a matéria é transportada de um sistema para outro, como resultado de um movimento molecular aleatório devido a um gradiente de concentração (CRANK, 1975).

FICK (1855) foi o primeiro a propor uma analogia entre a transferência de massa e calor por difusão, visto que a transferência de calor por condução também ocorre pelo movimento molecular aleatório. Dessa forma, ele descreveu matematicamente a teoria de difusão em substâncias isotrópicas (condutibilidade térmica igual em todas as direções), baseado na hipótese que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla X) \quad (2.1)$$

CRANK (1975) obteve diversas soluções analíticas da equação de difusão para diferentes condições iniciais e de contorno, considerando a difusividade constante ou variando com a umidade. Estas soluções se aplicam aos sólidos com formas geométricas simples e regulares, como esféricas, cilíndricas e placas planas infinitas ou paralelepípedo. Assumindo a forma geométrica de uma esfera para a partícula, onde a transferência interna de umidade durante a secagem é predominantemente unidirecional, a Equação (2.1) torna-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right\} \quad (2.2)$$

Quando a difusividade efetiva, D_{ef} , é considerada constante, a umidade inicial X_0 , distribuída uniformemente no interior do produto, desprezando as resistências externas à transferência de massa, a umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo, e seu valor corresponde ao termo umidade de equilíbrio X_e do produto; desprezando o encolhimento do produto durante a secagem chega-se à seguinte condição inicial e as seguintes condições de contorno:

$$\text{C.I.} \quad X = X_0 \quad 0 \leq r \leq R_{esf} \quad t = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{C.C.1} \quad X = X_e \quad r = R_{esf} \quad t > 0 \quad (2.4)$$

$$\text{C.C.2} \quad \frac{\partial X}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \quad t > 0 \quad (2.5)$$

A solução da Equação (2.2), com as condições dadas pelas Equações (2.3, 2.4 e 2.5), é dada por CRANK (1975), como:

$$\frac{X - X_0}{X_e - X_0} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-D_{ef} n^2 \pi^2 t / R_{esf}^2\right) \quad (2.6)$$

Onde:

$$X = \frac{3}{R_{esf}^3} \int_0^{R_{esf}} X r^2 dr \quad (2.7)$$

Uma importante correlação na secagem dos alimentos é a lei exponencial; esta lei estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício na forma:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (2.8)$$

Onde o fator de proporcionalidade k é denominado de constante de secagem. Esta equação é a expressão da lei de resfriamento de Newton, se for levado em conta que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se na camada limite, desconsiderando os efeitos no interior do material; é por isto chamada de modelo semi-empírico. A equação é normalmente utilizada na forma integrada como:

$$\frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-k t) \quad (2.9)$$

Em alguns casos pode-se assumir umidade de equilíbrio (X_e) como sendo nula. Essa consideração é baseada em outros trabalhos e no fato de que a umidade de equilíbrio do Okara encontra-se muito próxima de zero. Além disso, a umidade final apresenta um valor muito inferior em relação à umidade inicial e o termo pode ser desconsiderado para tempos de secagem longos. A Equação (2.6) pode ser, neste caso, representada por:

$$\frac{X}{X_0} = A \exp(-k.t) \quad (2.10)$$

Sendo que:

$$k = \frac{D_{ef}}{R_{esf}^2} \quad (2.11)$$

Uma modificação foi proposta por PAGE (1949) com a inclusão de mais um parâmetro na equação para descrever a secagem de milho. Esse modelo tem apresentado bons ajustes para os dados de secagem de produtos alimentícios.

$$\frac{X}{X_0} = A \exp(-k.t^n) \quad (2.12)$$

Posteriormente foi proposto o modelo de Page modificado, onde o anterior parâmetro influencia também na constante de difusividade, como mostra a Equação (2.13):

$$\frac{X}{X_0} = \exp(-(k.t)^n) \quad (2.13)$$

Apesar dos modelos não terem apresentado a influência do encolhimento, salienta-se que, de maneira geral, os alimentos sofrem encolhimento durante a secagem, sendo esta perda de volume causada pela remoção de água. Os alimentos com altos teores de umidade inicial sofrem apreciável variação de volume pela secagem (JASON, 1958).

2.5 Secagem do Okara

A água encontra-se em grandes quantidades no Okara úmido, fazendo com que este possua alta atividade de água. Por esse motivo, ele possui alta capacidade de deterioração, gerando odores desagradáveis e contaminação na indústria (O'TOOLE, 1999). A secagem do Okara, então, representa, além da possibilidade de sua utilização na alimentação humana, uma solução para minimizar a contaminação na indústria e no meio ambiente (VALENTAS *et al.*, 1997).

Para que o Okara possa ser utilizado na fabricação de outros produtos alimentícios, é necessário que possua baixo conteúdo de umidade, tal que evite sua degradação, e que possua cor clara, para que possa ser submetido a novos processos térmicos durante a fabricação de outros alimentos, sem comprometer sua aparência, textura e sabor (PERUSSELLO, 2008).

LEMA *et al.* (1998), ao realizarem estudos preliminares da cinética de secagem do Okara em leito fixo, em faixa de temperatura entre 40°C e 70°C, identificaram que a velocidade do ar afeta a taxa de secagem do Okara e que a umidade final do produto não é totalmente controlada pela difusão da umidade da amostra. Apesar disso, constataram que, devido à estrutura muito porosa do material, a difusividade efetiva da secagem do Okara é superior à encontrada em outros materiais biológicos.

CORONEL e TOBINAGA (2004) estudaram a secagem do Okara em secador de leito de jorro contínuo, obtendo um produto seco com característica de farinha homogênea e com 7% de umidade em base úmida. No mesmo trabalho, CORONEL e TOBINAGA (2004) identificaram que o tempo de retenção no secador e a temperatura de secagem tiveram grande influência nas propriedades e na atividade de água no Okara.

TARUNA e JINDAL (2002) utilizaram um secador de leito móvel em regime contínuo e, junto com o Okara úmido, adicionaram partículas inertes com movimento

helicoidal. Foi obtido Okara seco com umidade mínima de 5% em base úmida. Os resultados mostraram também que a temperatura do ar de entrada teve influência na umidade relativa do ar de saída e na sua temperatura, e que uma maior taxa de alimentação de Okara aumentou a taxa de evaporação de água e reduziu o consumo de energia no processo.

WACHIRAPHANSKUL e DEVAHASTIN (2005) analisaram a secagem do Okara em leito de jorro, obtendo Okara seco com qualidade aceitável em termos de cor, conteúdo protéico, e especialmente atividade de urease, que é uma indicadora indireta do inibidor da tripsina. Concluíram também que a ação de partículas inertes melhora o processo em termos de cinética e qualidade do produto seco (nível de oxidação, solubilidade de proteínas e capacidade de reidratação).

Segundo PERUSSELLO (2008), o Okara seco em secador de bandejas apresenta escurecimento devido à reação de Maillard provocada pela ação da temperatura e tempos prolongados de processamento; a secagem por spray-drier apresenta problemas na granulometria do produto, além de possuir baixa produtividade e eficiência energética do equipamento; a secagem por secador pneumático exige tubo de secagem excessivamente grande devido à elevada umidade do produto, causando assim altos tempos de residência; a secagem utilizando apenas cilindro rotativo forma grumos difíceis de secar, devido ao fato do produto estar muito úmido e altamente coeso e, portanto, possuir superfície adesiva; e, por último, a secagem em secador a tambor não apresenta a adesividade necessária entre o produto e a superfície do equipamento.

Porém, de modo geral, como observado pelos diversos autores, nenhum dos princípios de secagem de alimentos usado isoladamente é totalmente adequado para secar o Okara, desta forma precisa-se estudar de forma mais profunda as diferentes variáveis significativas na secagem de Okara para os diferentes secadores.

2.6 Secador de leito de jorro

A tecnologia do leito de jorro foi desenvolvida inicialmente por GISHLER e MATHUR, em 1954 como um método para secagem de trigo. O leito de jorro, na forma em que foi inicialmente concebido, consiste, em forma resumida, de uma coluna cilíndrica acoplada a uma base cônica, onde um jato de fluido, usualmente gás, é injetado na sua extremidade inferior. A circulação dos sólidos tem início quando a vazão de gás torna-se

suficiente para que a velocidade do jato provoque a movimentação ascendente das partículas. Forma-se então uma região de alta porosidade (jorro) onde as partículas são arrastadas pneumaticamente, estabelecendo-se uma fonte de partículas que se espalham radialmente no topo e descem pelo espaço anular que envolve o jorro, movimentando-se em contracorrente com o fluido. Na região anular, o movimento descendente dos sólidos assemelha-se ao leito deslizante e é caracterizada pela baixa porosidade (SALINAS, 1993). Na Figura 2.4 observa-se a representação esquemática de um secador de leito de jorro.

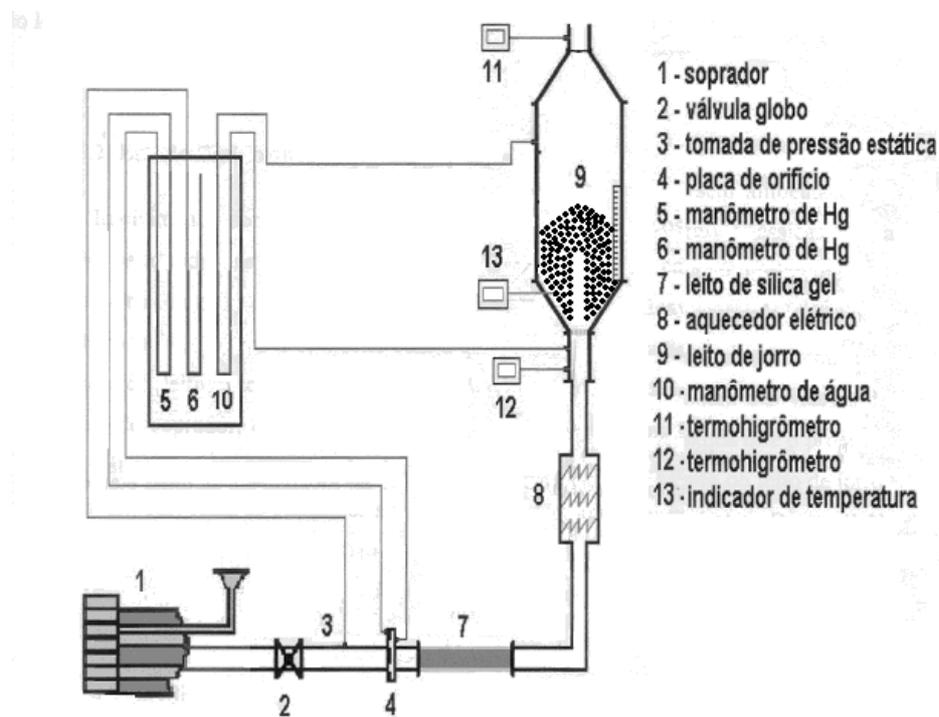


Figura 2.4 – Desenho esquemático do secador de leito de jorro

Um fator positivo na utilização de secadores de leito de jorro é a sua eficácia na desidratação de produtos termicamente sensíveis como suspensões de proteínas com baixa viscosidade e conteúdo de gordura (PASSOS *et al.*, 1997).

Para entender de forma mais detalhada o fenômeno dentro do secador, serão descritas as três principais regiões distintas do leito: o jorro, o ânulo e a fonte; podemos observar também: superfície do leito e interface jorro-ânulo, conforme mostra a Figura 2.5.

O jorro ou região central (fase diluída) apresenta alta porosidade, em torno de 0,90. Nessa região os sólidos possuem movimentos ascendentes, concorrente com o do fluido. O ânulo ou região anular corresponde à fase densa, com movimento descendente de

sólidos e com percolação contracorrente do fluido, sua porosidade é aproximadamente a da condição de um leito fixo expandido. A fonte é a região superior ao ânulo onde as partículas movimentam-se em regime desacelerado do jorro, caindo no ânulo.

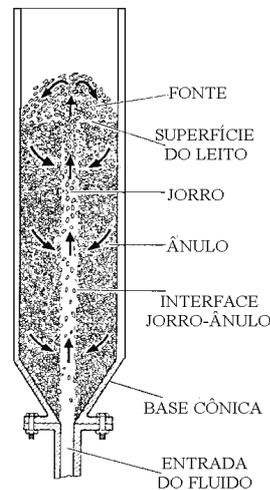


Figura 2.5 - Esquema de um leito de jorro (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

Com o conjunto das três regiões, um movimento sistemático e cíclico dos sólidos é estabelecido, ocasionando um sistema fluidodinâmico único, que caracteriza o leito de jorro. Dentro do espectro de contato gás-sólido, o leito de jorro apresenta-se como uma mistura de leito móvel e fluidizado, por proporcionar uma boa mistura e recirculação de sólidos. Suas principais características são:

- Altas taxas de recirculação de sólidos no leito;
- Mistura intensa das partículas;
- Contato íntimo gás-partículas;
- Diâmetro mínimo de partícula para jorro de 1,0 mm;
- Altas taxas de transferência de massa e calor.

A obtenção do jorro estável está limitada pela altura máxima do leito, acima da qual ocorre a instabilidade do processo, que pode dar-se na forma de uma fluidização ou de um movimento pistonado das partículas. Desta forma, pode-se estudar o comportamento do sistema pela altura da carga de sólidos, sofrendo ainda influência das propriedades e dimensões das partículas envolvidas e dos parâmetros geométricos da coluna (ângulo de cone e relação entre os diâmetros da parte cilíndrica e do orifício de entrada do gás).

Além desses parâmetros, visando-se um melhor entendimento dos diversos fenômenos de transferência envolvidos na operação, é conveniente conhecer as distribuições de gás no leito e a porosidade, as dimensões das regiões do leito, além da velocidade e taxa de circulação dos sólidos e os coeficientes de transferência de calor e massa.

2.6.1 Condições necessárias para o jorro

Segundo MATHUR e EPSTEIN (1974) o jorro, que é um fenômeno visível, ocorre a partir de um valor definido de velocidade do gás para uma dada combinação de gás, sólidos e configuração do equipamento. Na Figura 2.6, podem-se observar as transições entre os regimes de leito estático, leito de jorro, leito borbulhante e “slugging” (leito pistonado).

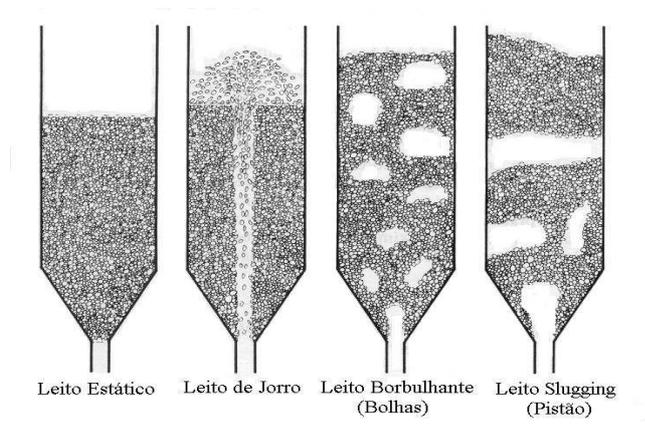


Figura 2.6 - Transição de regimes (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

Essas transições podem ser representadas quantitativamente por diagramas de fase, que relacionam a velocidade do ar de entrada e a altura do leito no comportamento do mesmo, e são representadas como a Figura 2.7.

Para um dado material sólido em contato com um fluido específico em um leito de geometria fixa, existe uma altura máxima de jorro (h_M), acima da qual não ocorre jorro e sim uma fluidização de má qualidade.

Diagramas de fase também indicam que, para um determinado conjunto que envolve natureza do sólido, velocidade do gás e diâmetro da coluna, existe um tamanho máximo de entrada de gás, acima do qual não ocorre jorro estável, passando diretamente do

leito móvel para o estado de fluidização agregativa. A Figura 2.7 apresenta um exemplo desses diagramas.

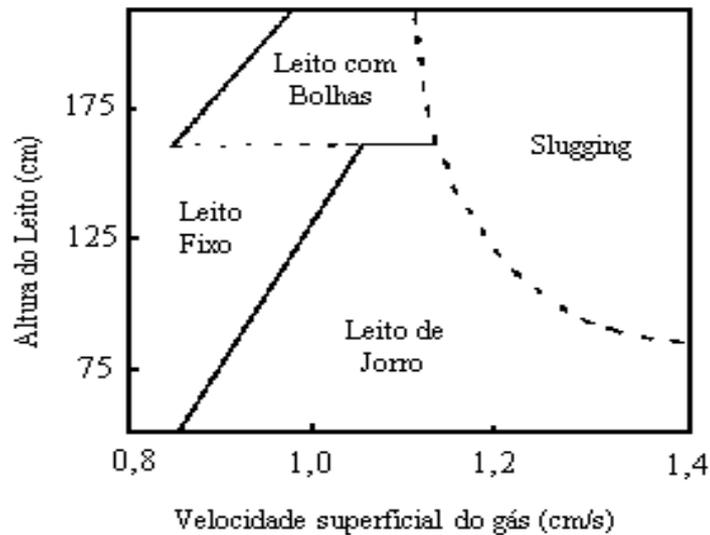


Figura 2.7 - Diagrama de regime, trigo, $d_p = 3,2 \times 6,4$ mm, $D_c = 0,152$ m, $D_i = 0,0125$ m (MATHUR e EPSTEIN, 1974)

A velocidade mínima de jorro em um leito pode estar acima da velocidade de mínima fluidização correspondente, U_{mf} .

Um leito de jorro típico tem uma altura substancial, a qual no caso de um recipiente cilíndrico é geralmente no mínimo da ordem do diâmetro da coluna, medido a partir do orifício de entrada de fluxo para a superfície do ânulo. Se o leito for muito pequeno, o sistema se torna inadequado ao processo de jorro.

O diâmetro mínimo da partícula recomendado para a utilização em um leito de jorro é cerca de 1 mm. Este tamanho de partícula está próximo do limite, no qual a efetividade do contato gás-líquido em leito fluidizado é seriamente prejudicada pela passagem do gás na forma de grandes bolhas.

2.6.2 O mecanismo fluidodinâmico

Do ponto de vista da fluidodinâmica, os principais parâmetros relacionados ao projeto de leitos de jorro são: a velocidade de jorro mínimo, a queda de pressão máxima, a queda de pressão de jorro estável. Esses parâmetros são obtidos através da curva

característica do equipamento. A Figura 2.8 mostra uma curva típica característica de queda de pressão em função da vazão de gás.

A partir dos pontos de velocidade de jorro mínimo, a queda de pressão máxima e a queda de pressão de jorro estável determinam-se a menor vazão de gás que propicia o fenômeno de jorro, a potência máxima a ser fornecida pelo soprador e a potência consumida durante a operação.

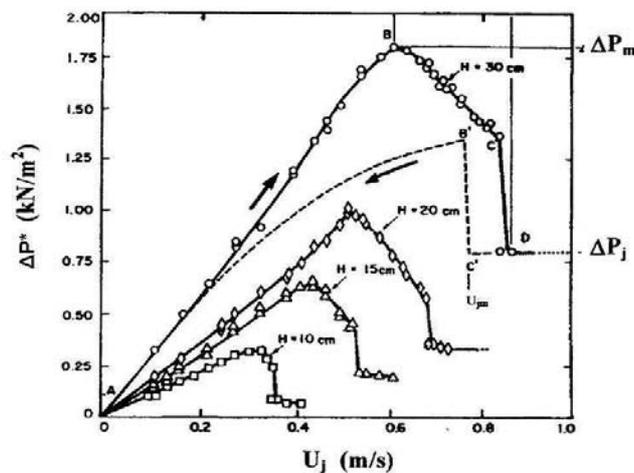


Figura 2.8 - Curva típica de queda de pressão versus velocidade de ar
(MARTHUR e EPSTEIN, 1974)

Inicialmente com pequenas vazões, o gás apenas passa sem perturbar as partículas e o sistema comporta-se como um leito fixo. Com o aumento da vazão, as partículas próximas ao orifício de entrada do gás se deslocam, surgindo então uma cavidade circundada por uma camada sólida compacta, ainda mais resistente à passagem do gás, acarretando maior queda de pressão no leito. Com o aumento da vazão, a cavidade vai se alongando, havendo formação de um jorro interno. A queda de pressão continua a aumentar, até atingir o valor máximo. A partir deste ponto o efeito de jorro interno é maior que o da camada de sólido que limita a cavidade e, conseqüentemente, a queda de pressão passa a diminuir. A partir de certo ponto a curva é descendente, denominado jorro incipiente, e qualquer incremento na vazão de gás faz com que a queda da pressão caia bruscamente até o ponto no qual o jorro aflora através da superfície do leito. Essa vazão é denominada vazão de jorro mínimo. Neste ponto, a queda de pressão torna-se constante e um aumento na vazão do gás provoca somente a elevação da fonte.

Entretanto, devido à instabilidade gerada pela ação da ruptura do leito de partículas, as vazões de jorro incipiente e de início de jorro estável não são exatamente reprodutíveis, sendo preferível operar com o processo inverso. No processo inverso, com a redução da vazão de gás, a queda de pressão mantém-se constante até o ponto correspondente ao jorro mínimo, a partir do qual ocorre um pequeno aumento. No jorro mínimo determina-se a menor vazão de gás com a qual se pode obter um jorro estável. Prosseguindo-se com a redução da vazão do gás, chega-se a um ponto máximo de queda de pressão, que é bem inferior ao ponto máximo no incremento da vazão, já que no processo inverso a perda de carga deve-se somente à interação gás-líquido. A partir de então, a queda de pressão decresce com a vazão (LIMA, 1992).

2.6.3 Estabilidade do jorro

A estabilidade do leito de jorro é criticamente dependente de certas condições. Se essas condições não forem satisfeitas o movimento de sólidos torna-se aleatório, assumindo estado de fluidização agregativa. Com o aumento do fluxo gás, o leito torna-se “slugging” (empistonado).

2.6.3.1 Efeito da geometria da coluna

- Razão D_i/D_c : Em uma dada coluna, a altura máxima do leito de jorro diminui com o aumento do diâmetro do orifício de entrada do gás (D_i) até um valor limite. Acima deste valor, o jorro não ocorre. Se o diâmetro da coluna (D_c) aumenta sem o correspondente aumento do orifício, o jorro fica confinado em uma pequena região perto do orifício, deixando os sólidos circunvizinhos estagnados. Para colunas cilíndricas, BECKER (1961) sugere um valor crítico para a razão diâmetro do orifício e diâmetro da coluna $D_i/D_c = 0,35$. Do mesmo modo, NEMETH e PALLAI (1970) propõem um valor de $D_i/D_c = 0,30$ e sugerem um valor de D_i/d_p entre 40 e 50, onde d_p é o diâmetro médio da partícula.

- Ângulo do cone: Uma menor seção cônica do leito facilita o fluxo de sólidos do ânulo para a região do jato de gás. O ângulo limite do cone depende do atrito interno das partículas e, para a maioria dos materiais, o ângulo varia entre 40° e 60° .

- Projeto do orifício de entrada do jorro: MANURUNG (1964) observou, após vários experimentos, que o jorro torna-se mais estável quanto menor for o orifício de entrada do gás na parte mais estreita do cone. A estabilidade máxima é obtida com o projeto do orifício

de entrada que facilite o fluxo de jato de forma mais direcionada, a fim de se evitar o desvio do jato antes que ele atinja o leito de partículas.

2.6.3.2 Efeito das propriedades do sólido

- Tamanho da partícula: Embora o tamanho mínimo recomendado para a operação de um leito de jorro seja de 1mm de diâmetro, GHOSH (1965) sugere que a ação de jorro pode ser obtida com materiais ainda mais finos, desde que o diâmetro do orifício de entrada não ultrapasse 30 vezes o diâmetro da partícula. MALEK e LU (1965) descobriram, através de experimentos com quatro tamanhos diferentes de trigo, que a altura máxima do jorro decresce com o aumento do tamanho das partículas.

- Distribuição do tamanho: A uniformidade do tamanho das partículas favorece a estabilidade de jorro devido a uma distribuição mais efetiva do gás. A presença de uma pequena proporção de finos ou de partículas mais grossas em um leito pode prejudicar seriamente a estabilidade do jorro.

- Densidade: Não existem claras evidências que mostrem se a estabilidade do jorro é afetada ou não pela densidade das partículas. Sólidos com grandes diferenças de estabilidade podem ser jorados e o jorro pode ser alcançado para qualquer valor de densidade.

2.6.3.3 Efeito da vazão de gás

Em leitos relativamente rasos a relação entre altura do leito e diâmetro do cilindro $h/D_c < 3$, o aumento da taxa muito acima do valor mínimo requerido para o jorro faz com que o jorro acima da superfície do leito perca sua forma bem definida. O movimento dos sólidos nessa região torna-se caótico e o movimento descendente das partículas no ânulo permanece intacto. Em leitos profundos, por outro lado, o movimento dos sólidos é desfeito para altas taxas de escoamento. Em geral, a estabilidade do jorro, com respeito ao escoamento do gás, aumenta com o aumento do tamanho das partículas, aumento do diâmetro da coluna, diminuição do diâmetro do orifício da coluna e diminuição da profundidade do leito.

Pode-se afirmar depois de ter discutido de forma mais detalhada o comportamento fluidodinâmico no leito de jorro, que suas aplicações incluem entre outras a secagem, o recobrimento, a granulação, a solidificação e as reações químicas.

2.6.4 A Secagem em leito de jorro

A secagem em leito de jorro tem sido indicada também para materiais termo-sensíveis segundo PHAM (1983), RÉ e FREIRE (1987) e BARRET e FANE (1990). Sua indicação para a secagem desses materiais é consequência do curto tempo de permanência do material no interior do equipamento e também, das menores temperaturas na região anular quando comparadas com a temperatura de entrada do gás. A esse equipamento é atribuído um baixo custo de instalação e de operação e alta taxa de secagem por unidade de volume do equipamento, o que reduz os custos de produção (PATEL *et al.*, 1989).

FENG e TANG (1998) também usaram o equipamento para secar maçã fatiada, utilizando ainda o auxílio de microondas. Eles partiram de amostras de maçã com cerca de 24% de umidade, secando-as até cerca de 5% de umidade. Os pesquisadores utilizaram quatro potências de microondas a uma mesma temperatura de ar de secagem (70°C). Concluíram que o auxílio de microondas reduz em mais de 80% o tempo de processo, além de uniformizar a temperatura das fatias de maçã. O produto seco com esse método apresentou pouca descoloração e taxas de reidratação maiores em comparação com o processo de secagem com ar quente.

MEDEIROS *et al.* (2001) secaram polpas frutas tropicais de diversas composições com auxílio de vários tipos de inertes, concluindo que a composição das polpas influi sobre o ângulo de repouso e escoabilidade do material. Concluíram também que, para as características das polpas, o melhor inerte foi o poliestireno. Testou-se também a mudança no escoamento a partir da adição de água nas polpas, concluindo que esta adição influi positivamente no escoamento.

ALMEIDA e ROCHA (2002) recobriram e secaram sementes de brócolos em leito de jorro e leito fluidizado, e concluíram que o processo de secagem não provocou danos na germinação das sementes secas com os dois tipos de processo de secagem. Os valores da queda de pressão máxima, vazão de jorro mínimo, vazão de jorro estável e queda de pressão no mínimo jorro foram obtidas a partir dos gráficos de queda de pressão-vazão para o leito de jorro. Os valores de velocidade de jorro mínimo e as quedas de pressão foram comparados aos correspondentes valores obtidos por equações empíricas citadas na literatura.

Diversos outros autores realizaram secagens em leito de jorro. Entre alguns experimentos, podemos citar NINDO *et al.* (2003), que compararam aspargos frescos secos em diversos secadores, incluindo secador de leito de jorro e secador de leito de jorro assistido à microondas. O produto seco com secador de leito de jorro assistido a microondas apresentou menor perda de nutrientes (maior retenção de antioxidantes) e grande facilidade de reidratação de todos os métodos de secagem envolvendo uso de ar quente. Além disso, esse secador apresentou tempos de secagem até cinco vezes menores do que os outros métodos testados.

NG *et al.* (2006) secaram arroz *paddy* utilizando diferentes temperaturas de secagem, vazões de ar de entrada e alturas de leito, adicionando ou não tubo interno no equipamento. Encontraram que a maior taxa de secagem foi obtida ao utilizar um equipamento sem tubo interno e com a menor altura de leito possível, aplicando alta temperatura de secagem e vazão de ar de entrada. Concluíram que o secador de leito de jorro é uma opção viável à secagem de grãos grosseiros como arroz, milho e feijão devido ao baixo custo de instalação em relação aos secadores de leito fixo e secadores de coluna e, principalmente, devido à rapidez de secagem pós-colheita.

Comprovando a possibilidade de secagem de material orgânico em leito de jorro, ROCHA *et al.* (2008) secaram levedura com umidade inicial de 70% com ajuda de inertes e alimentação intermitente, sendo uma das variáveis a velocidade do ar de entrada (0,185m/s a 0,241m/s). Encontraram que a taxa de produção de levedura seca mostrou-se uniforme, e que as condições operacionais influenciaram fortemente o resultando, atingindo eficiências de 40 a 90%. Concluíram que a eficiência de produção de levedura foi alta (cerca de 90%), com alto teor de proteína, superior aos encontrados por outros autores, estando dentro dos limites da legislação.

RODRIGUES e TOBINAGA (2001) também utilizaram o leito de jorro para secagem de material biológico, secando suspensão protéica de peixe e avaliando o efeito dos parâmetros hidrodinâmicos e da temperatura do ar de saída sobre a solubilidade, índices de atividade e capacidade emulsificante das suspensões. Concluíram que a secagem desta suspensão em leito de jorro mostrou-se viável, e que os melhores resultados em termos de propriedades funcionais no produto seco foram obtidos com a temperatura do ar de saída a 75°C e com altura de jorro em torno de 14 cm, e que as mesmas foram afetadas negativamente com o aumento da vazão de alimentação.

MADHIYANON *et al.* (2002) também utilizaram leite de jorro para realizar secagens do arroz *paddy*, desta vez para comparar os resultados obtidos experimentalmente com o modelo matemático teórico desenvolvido por eles, para previsão de umidade final, temperatura do grão e do ar e consumo energético. Concluíram que os resultados experimentais diferiram dos teóricos. Além disso, resultados simulados indicaram que é difícil ou impossível atingir através de apenas um estágio de secagem no equipamento, alta qualidade do produto e baixa umidade para estocagem. Entretanto, uma secagem com mais de um estágio resolveria o problema.

ANDRADE JUNIOR *et al.* (2005) utilizaram o secador de leite de jorro com partículas inertes de polietileno de alta densidade para obtenção de leite em pó. Eles realizaram ensaios a 80°C com alimentação contínua de leite, variando-se a carga de inerte e a vazão de alimentação e mantendo-se a vazão de ar 30% acima da vazão de jorro mínimo. Concluíram que a secagem de leite em leite de jorro com inertes pode ser viável, já que o equipamento operou de forma estável nas condições mais favoráveis. O pó obtido apresentou umidade média de 2,6 %, apropriado para conservação. Maiores vazões de ar e de alimentação favoreceram a produção de pós mais úmidos. A eficiência de produção do pó foi ainda considerada baixa (cerca de 48%), mas pode ser melhorada otimizando as condições operacionais e recuperando os finos do processo.

OLIVEIRA (2006) comparou o secador de leite de jorro com secador de camada delgada para secagem de uma alga microscópica multicelular (*Spirulina platensis*) diluída em diferentes concentrações, sendo a temperatura uma das variáveis do processo. O secador de leite de jorro apresentou comportamento estável durante o período de secagem, concluindo que através do leite de jorro, houve maior recuperação de ficocianina, pigmento verde azulado, em relação à matéria prima.

MARRETO (2006) secou microcápsulas de caseína e pectina no leite de jorro e *spray dryer*, comparando a influência dos dois tipos de secagem sobre as características e o desempenho de liberação de microcápsulas contendo diferentes fármacos modelo. Concluiu que o secador de leite de jorro empregou maior capacidade evaporativa volumétrica para a água, além de um aproveitamento energético mais do que duas vezes superior em comparação com o *spray dryer*. O secador de leite de jorro ainda permitiu maior retenção de fármaco no sistema, com um tempo de residência médio de 16 minutos. O autor ainda

concluiu que a temperatura e vazão do ar de entrada não alteraram o tempo médio de residência, mas afetaram o grau de interação entre os componentes das cápsulas.

2.7 Secador de cilindro rotativo

O secador de cilindro rotativo é um dos equipamentos de secagem mais usados em processos contínuos. É simples e versátil e em consequência, ideal para secagem rápida de grandes quantidades de material e baixo custo de implantação (DEL VALLE, 1998).

Desde que o propósito da secagem é a eliminação de água por vaporização, um suprimento de calor deve ser continuamente fornecido de alguma maneira e em quantidade suficiente para que haja a devida secagem (KITAHARA, 1987). Nos secadores rotativos a carcaça cilíndrica pode ser horizontal ou levemente inclinada. A alimentação do material a ser processado é realizada por uma das extremidades do secador e o produto descarregado pela outra, voltada para o vértice do ângulo de inclinação do cilindro. Normalmente dispõem-se aletas no interior do cilindro para promover a movimentação do material da parte inferior para a superior da câmara, seguida da queda livre do mesmo (BURJAILI, 1996).

2.7.1 Variáveis pertinentes ao sistema

Segundo NONHEBEL (1971), as variáveis pertinentes a um secador de cilindro rotativo estão divididas em três fatores fundamentais de um processo de secagem. Com respeito ao material, as variáveis são as características físicas do material úmido, a taxa de alimentação do material para dentro do secador e a temperatura de alimentação do material; com respeito ao gás de secagem, as variáveis são a taxa de alimentação do ar de secagem (que geralmente varia na faixa de 0,5m/s até 2,5m/s), a temperatura e a umidade do gás; finalmente com respeito ao equipamento as variáveis são o diâmetro e comprimento do cilindro do secador que geralmente encontram-se na relação $4D_r < L < 15D_r$, a inclinação do cilindro com respeito à horizontal entre 0° até 5° , a velocidade de rotação do cilindro, usualmente de 1-15rpm e finalmente o número e a geometria das aletas.

Todos estes parâmetros, exceto as temperaturas, afetam o tempo de residência das partículas no interior do cilindro e o “hold-up”. Este é definido como uma concentração volumétrica no interior de cilindro, segundo a Equação (2.14).

$$\text{HOLD - UP} = 100 \times \left(\frac{\text{Volume ocupado pelas partículas no cilindro}}{\text{Volume do cilindro}} \right) \quad (2.14)$$

Usualmente, o “hold-up” fica entre 6% e 10%, dependendo da geometria das aletas e do tipo de operação (FRIEDMAN e MARSHAL, 1949).

2.7.2 Algumas considerações sobre o secador rotativo

O aquecimento do material pode ser realizado por contato direto com gases aquecidos (ar ou gases de combustão) ou por vapor condensado em anéis concêntricos de tubos dispostos longitudinalmente na superfície interna da carcaça. Em um arranjo mais sofisticado, foram utilizadas microondas no aquecimento (MARSAIOLI, 1991). Quando o gás e o sólido são alimentados de modo concorrente, o cilindro do secador pode ser horizontal ou inclinado, enquanto que para escoamentos em contracorrente é invariavelmente inclinado (SHERRIT *et al.*, 1993).

A velocidade do ar e o tamanho das partículas do produto têm um papel fundamental sobre a taxa de arraste do material processado no secador. Mesmo pequenas mudanças dessas variáveis afetam significativamente o arraste (RACHEL e JACOB, 1992).

Normalmente os secadores rotativos apresentam-se com comprimentos entre 2,0m e 9,0m e diâmetros entre 0,3m e 5,0m (KELLY, 1987). PERRY (1984) indica a relação comprimento/diâmetro desses equipamentos como 4 até 10. A rotação varia de 1 até 15rpm (KNEULE, 1966) e a inclinação é aproximadamente 2° (DOUGLAS *et al.*, 1992; ANDERSON e JACOB, 1922).

A dinâmica ou movimento do material no secador deve-se à combinação dos efeitos cascata, deslizamento e rolagem das partículas. Do ponto de vista de transferência de calor e de massa, quando o ar aquecido é o meio de transferência de calor, o efeito cascata é o mais importante, já que permite uma movimentação mais intensiva do material em relação aos outros efeitos (KELLY, 1987). Os secadores rotativos aplicam-se na indústria de cimento, fertilizantes, açúcar, milho, plásticos, concentrados minerais entre outros, (KELLY, 1987; DOUGLAS *et al.*, 1992).

2.7.3 A Secagem em cilindro rotativo

No trabalho de LESCANO (2004), o objetivo da pesquisa foi o estudo da secagem de Okara em secador de cilindro rotativo visando obter Okara seco com características físicas próprias às exigidas pela legislação brasileira para produtos farináceos. Ainda neste trabalho, além de obter o produto seco, foram feitas análises que determinaram que este

resíduo seco fosse considerado apto para consumo humano e com teor elevado de proteína e fibra, sendo desconsiderado como um subproduto.

Segundo LESCANO e TOBINAGA (2004), o fluxo contracorrente é essencial quando uma grande quantidade de umidade deve ser retirada do material durante a secagem, o que permite maior tempo de residência do material dentro do cilindro e temperaturas menores do ar de secagem.

No trabalho de BURJAILI (1996), que foi desenvolvido um secador rotativo com recheio de inertes, foram realizados estudos referentes ao comportamento do leito de inertes com relação à velocidade de rotação e aos parâmetros geométricos da parte interna do secador como largura, espessura, número e inclinação das aletas. Maximizou-se a taxa mássica do ar de secagem, avaliando-se a influência do escoamento do ar no arraste dos corpos inertes. Concluíram que o secador mostrou-se adequado e eficiente para este tipo de material.

SARSILMAZ, C.; YILDIZ, C. e PEHLIVAN, D. (2000) secaram damascos em um secador de coluna cilíndrica equipado com um aquecedor solar de ar. Eles procuraram as vazões de ar e velocidades de rotação do cilindro ótimas, de modo a manter as condições de secagem uniformes e higiênicas e reduzir os tempos de secagem. Os damascos secos com tal tecnologia foram comparados com os damascos secos naturalmente no campo. Concluíram que o secador de coluna cilíndrica rotativa acoplada com aquecedor solar de ar aumentou a taxa de secagem, reduzindo o tempo de residência e que a rotação do equipamento provocou ganhos, tanto no tempo de secagem como no trabalho envolvido na secagem.

NEJAD *et al.* (2003) avaliaram o efeito da secagem na qualidade do pistache. Para tanto, compararam diversos tipos de secadores utilizados na etapa de secagem do processamento do pistache, entre eles o secador de cilindro rotativo vertical. Obtiveram que os diferentes secadores não apresentaram influência significativa sobre a qualidade do lipídio nos pistaches. Apenas a aparência e a divisão da casca foram afetadas pelos diferentes métodos de secagem. Apesar de, para o pistache, o secador de cilindro rotativo não ter se apresentado como melhor alternativa visando a qualidade do produto final, o produto seco neste secador apresentou menor umidade final.

MACCARI Jr, A. (2005) avaliou as várias etapas do pré-processamento da erva-mate, entre elas a secagem. O autor visitou diversas ervateiras. Entre as ervateiras do Paraná, encontrou que o secador de cilindro rotativo é o mais utilizado dentre os secadores rápidos, com tempos de residência entre quinze minutos e uma hora. Entretanto, este tipo de secador apresenta maior volume de consumo de energia e lenha. Não houve associação das mudanças na composição química da erva com os secadores, porém o produto seco em cilindro rotativo apresentou sabor mais suave em relação ao amargor da erva, além de suave coloração. De forma geral, os secadores rotativos são considerados os mais modernos para a secagem de erva-mate.

ARJONA *et al.* (2005) utilizaram o cilindro rotativo para secagem do *orujo*, como é conhecido o resíduo do processo de extração de óleo de oliva que ainda contém quantidades significativas de azeite, reduzindo a umidade inicial de 65 para 8% (b.u.). O autor diz que a melhor solução encontrada pela indústria para a secagem deste material foi a utilização combinada de dois cilindros rotativos em série, já que a alta umidade do *orujo* e sua viscosidade tornam o processo de secagem complicado.

2.8 Secador com aplicação de microondas

2.8.1 Fundamentos de microondas

A energia de microonda é uma modalidade de radiação eletromagnética como a luz ultravioleta, raios-X, ondas de televisão, rádios AM e FM e infravermelho. Está situada no intervalo de frequências compreendido entre 300MHz e 300GHz, com comprimentos de onda que se estendem entre 1 m e 1 mm, respectivamente. As bandas de frequências utilizadas para aplicações em eletrotermia (energia elétrica utilizada para produzir calor) são restritas, a fim de se evitar interferências nas faixas de frequência utilizadas em telecomunicações. São reservadas em eletrotermia algumas faixas estreitas de frequências, entre as quais as mais empregadas em microondas são $915\pm 25\text{MHz}$ e $2450\pm 50\text{MHz}$ que correspondem a comprimentos de onda no vácuo de 32,8 cm a 12,25 cm, respectivamente (SENISE, 1985).

De acordo com SMIT (1987), as ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos associados que se propagam pelo espaço. As microondas são geradas pelo “magnetron”, um tubo oscilador alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter energia elétrica de um circuito industrial (60Hz) em energia eletromagnética de

microondas (por exemplo, 2450MHz). A penetração e o aquecimento de alimentos em um campo de microondas são praticamente instantâneos, em contraste com métodos convencionais de aquecimento, onde o transporte de calor da superfície para o centro se dá 10 a 20 vezes mais lentamente.

Um sistema genérico de microondas é composto por um conjunto de componentes que podem ser representados pela Figura 2.9 (TEJO, CONFORTI e ROCHA, 1976).

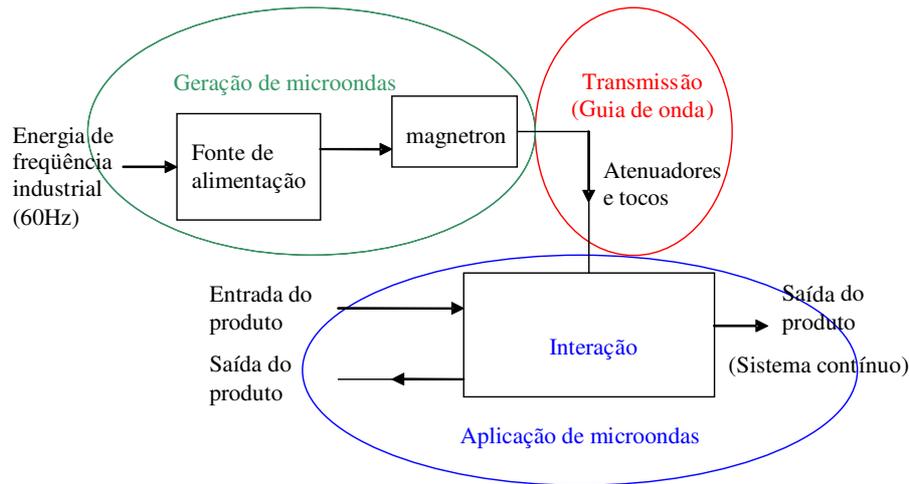


Figura 2.9 - Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por microondas

- Geração de microondas: A partir de um tubo oscilador (usualmente de tipo Magnetron).
- Transmissão (guia de onda): O campo eletromagnético se propaga sob a forma de onda eletromagnética no interior de um guia de onda metálico. As seções podem ser retangulares ou circulares com dimensões dependentes do comprimento de onda. As múltiplas reflexões nas paredes do guia têm por resultante uma determinada distribuição de campos elétricos e magnéticos no espaço interior e de correntes de condução na superfície das paredes, tendo-se uma distribuição de campo elétrico máximo no centro do guia e caindo até zero junto às paredes.
- Aplicação de microondas: Onde está o material e se passa a interação “produto-microondas”. Distinguem-se dois tipos de aplicadores, em um caso a interação ocorrerá em um guia de onda preenchido pelo dielétrico e, em outro, a interação ocorrerá dentro de uma cavidade. No primeiro, o tipo de propagação é monomodal, ou seja, as ondas se propagam em um único sentido. Já a distribuição de campo elétrico dentro de uma cavidade ocorre a partir da propagação multimodal, ocasionada pela reflexão das ondas nas paredes metálicas da cavidade, o que gera um dos principais problemas associados com o aquecimento por

microondas, a produção de zonas quentes e frias no produto. Isso ocorre devido ao fenômeno de onda estacionária, onde ondas refletidas aparecem e se superpõem entre si à onda incidente. A relação entre as intensidades de campo elétrico máximo e mínimo é denominada razão de onda estacionária (ROE). A onda refletida nos pontos em que chega em fase com a onda incidente soma-se à mesma e aumenta o valor do campo elétrico. Isso resulta em uma distribuição não uniforme do campo elétrico dentro de um aplicador e conseqüentemente em um aquecimento não uniforme.

Nas cavidades, uma parte deste aquecimento não uniforme é devido ao aplicador. Este fenômeno é causado pelos valores altos e baixos do campo elétrico, que são intrínsecos à sua estrutura geométrica. Portanto, a geometria do material, assim como as suas propriedades dielétricas, também afetam a uniformidade do aquecimento.

As propriedades dielétricas dos materiais determinam a quantidade de energia acoplada em um produto, sua distribuição dentro do produto e por conseqüência, o tempo e a frequência das microondas necessárias para o aquecimento em processos de transferência de energia por radiação (MUDGETT, 1996).

2.8.2 Propriedades dielétricas

Os materiais dielétricos têm a capacidade de armazenar energia elétrica. Para converter energia de microondas em energia térmica, ocorrem mecanismos em escala molecular e atômica (BUFFLER, 1992). A migração iônica e a rotação dipolar são da maior importância nos sistemas de aquecimento de materiais biológicos através de microondas. Na migração iônica, os componentes ionizados colidem aleatoriamente com moléculas não ionizadas quando submetidos a um campo elétrico. A energia elétrica destes íons é convertida em calor durante as colisões. No caso de aquecimento pela rotação dipolar, moléculas polares como a água e outras moléculas que podem se tornar “dipolos induzidos” devido às tensões causadas pelo campo são influenciadas pela rápida mudança de polaridade deste campo.

Os mecanismos de deslocamento de cargas ou polarização variam com o tipo e temperatura do dielétrico e a frequência do campo elétrico. Os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são:

- Permissividade dielétrica relativa ϵ' (Constante dielétrica): avalia a capacidade de um material armazenar energia elétrica de maneira reversível.

- Fator de perda relativa ϵ'' : parâmetro dado pelas propriedades elétricas de dissipação de energia elétrica sob a forma de calor do material, desta forma, de maneira irreversível.

- Tangente de perdas: O coeficiente dos dois valores dado pela Equação (2.15). Este valor indica a capacidade do material de ser penetrado pelo campo elétrico e de dissipar a energia em forma de calor, ou seja, determina a extensão de reflexão e transmissão de energia dentro do mesmo.

A maioria das aplicações de microondas nas indústrias químicas e de alimentos é relativa à água. A água líquida apresenta em comparação aos dielétricos comuns, os valores mais elevados de ϵ' e ϵ'' . Desta forma podemos concluir que materiais com maior teor de água, são mais “fáceis de aquecer” aplicando microondas.

$$\tan \alpha = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (2.15)$$

2.8.3 Secagem com aplicação de microondas

As características do aquecimento dos materiais por microondas são relativas às suas propriedades dielétricas. Essas características dielétricas influenciam nas transferências internas aos materiais. Mas mesmo no caso da secagem por microondas, os fenômenos externos podem influenciar nas velocidades de secagem, daí o interesse pelos processos de secagem acoplados, tais como secagem por convecção com aplicação de microondas.

Na prática, o aquecimento por microondas e o comprimento de onda a ser utilizado dependem da interação de fatores como volume e formato da cavidade, proporção de água, sais e gordura no material a ser seco, e propriedades dielétricas, estrutura geométrica e estado físico do material. Sabe-se também que a parte sólida do material pouco contribui para seu comportamento dielétrico a níveis elevados de umidade (HENRY e CHAPMAN, 2002).

Como a energia de microondas cria calor no interior dos materiais processados, o aquecimento é praticamente instantâneo, o que resulta em tempos de processamento mais curtos e aquecimento homogêneo com qualidade do produto superior à obtida pelos métodos convencionais. Outra vantagem é a preservação de componentes nutricionais importantes, como vitaminas, proteínas e minerais (HENRY e CHAPMAN, 2002).

A energia de microondas é uma fonte ímpar de energia. Esta propriedade resulta em tempos de processamento mais curtos, maior rendimento do produto final e usualmente em uma qualidade superior à encontrada com técnicas convencionais do processamento (DECAREAU e PETERSON, 1986).

SACHAROW e SCHIFFMANN (1992) destacam que alimentos processados com microondas originam produtos com melhor sabor e com maiores níveis de componentes nutricionais, especialmente por prevenir lixiviação de nutrientes.

Trabalhos anteriores mostram que longos tempos de secagem e temperaturas elevadas acarretam uma degradação substancial nos produtos secos, podendo interferir no sabor, na cor, nos nutrientes, acarretar encolhimento, assim como interferir na capacidade de reidratação. Esta tecnologia tem oferecido nas últimas décadas uma alternativa para os processos de secagem, seja do aspecto de uma melhor eficiência energética comparada com a secagem convectiva por ar quente, principalmente na etapa de taxa de secagem decrescente, ou de uma maior conservação na qualidade dos produtos, dado pelo tempo de processamento menor (MASKAN, 2000).

A combinação de métodos de secagem convencionais com aplicação de microondas cria uma grande vantagem, pois enquanto o ar de secagem carrega a água livre na superfície do produto úmido, as microondas geram calor no interior do produto, facilitando o transporte da água interna para a superfície do material. (GOKSU *et al.* 2004; FENG *et al.*, 2001). Outros estudos sugerem um sistema duplo onde primeiro se trabalha com secagem convectiva e, após o produto atingir umidade crítica, inicia-se a segunda fase com aplicação de microondas.

SMITH (1979) estudou a influência da aplicação de microondas durante o processo de secagem e concluiu que o aquecimento dielétrico, combinado com a convecção forçada convencional e introduzido a partir da umidade crítica, apresenta efeito sinérgico na secagem, ou seja, velocidades de secagem mais altas do que a soma das velocidades dos processos de secagem somente com convecção forçada ou somente com microondas. Isto é possível porque o gradiente de pressão no interior do alimento causado pelo aquecimento dielétrico favorece o transporte da umidade, atuam no mecanismo limitante do processo convectivo de secagem – a difusividade de umidade – não permitindo a queda da velocidade de secagem e reduzindo o tempo de processamento. (FUNEBO e OLHSSON,

1998; DATTA, 1990; SVENSON, 1987; SMITH, 1979; MEISEL, 1976, citado por NITZ, 1999).

As principais vantagens, segundo SCHIFFMANN (1987), no processo de secagem combinado com microondas são a maior preservação do material, o efeito nivelador (maior acoplamento de energia nas áreas mais úmidas), maior uniformidade de secagem, melhora do produto, menor tempo de secagem, maior eficiência, menor espaço e manuseio requeridos.

FENG e TANG (1998) compararam a secagem de cubos de maçã em secador de leito de jorro e secador de leito de jorro com aplicação de microondas, e concluíram que o material seco no equipamento com aplicação de microondas, apresentou menor descoloração e maiores taxas de reidratação, além de uma diminuição de mais de 80% do tempo de secagem, quando comparado com a secagem no equipamento convectivo.

MARSAIOLI (1991) desenvolveu o protótipo de secador rotativo com circulação de ar quente assistido a microondas para produtos granulados. O esquema pode ser observado na Figura 2.10. O equipamento é constituído por um cilindro rotativo de operação contínua com fluxo de ar concorrente ou contracorrente ao produto. O movimento do produto úmido dentro do secador permite uma distribuição uniforme do aquecimento.

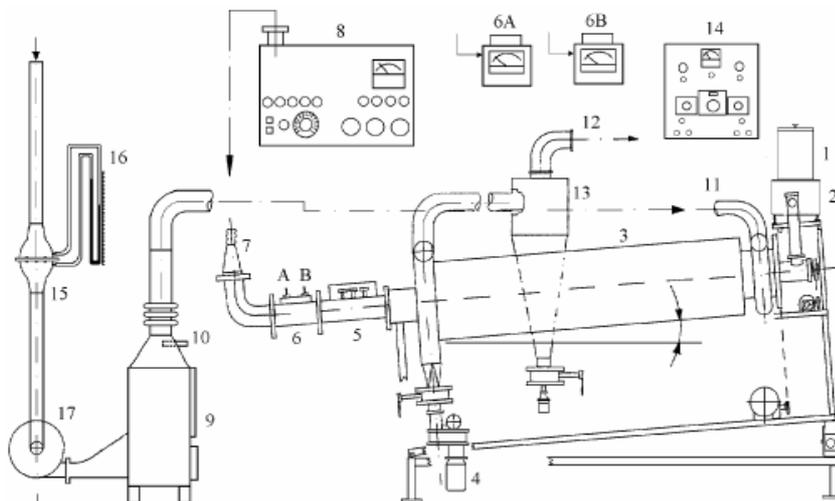


Figura 2.10 - Desenho esquemático do secador de cilindro rotativo assistido a microondas

(1) Depósito de matéria-prima; (2) Alimentador; (3) Cavidade de microondas (M.O); (4) Produto seco; (5) Toco triplo; (6) A/B Sistema medidor de M.O.; (7) Guia de onda flexível; (8) Gerador de M.O.; (9) Aquecedor de ar; (10) Sensor de temperatura; (11)/(12) Entrada de ar/exaustão; (13) Ciclone; (14) Painel de controle; (15)/(16) Medidor de fluxo de ar; (17) Ventilador

O secador foi projetado para funcionar simultaneamente como um aplicador de microondas, e é equipado com recursos para controlar as vazões de ar e de massa do produto, a potência das microondas, a temperatura de entrada do ar quente e o tempo de residência do produto no secador. Isto é possível pelos ajustes independentes da rotação do cilindro e da sua inclinação em relação à horizontal.

RAGHAVAN e SILVEIRA (2001) avaliaram a influência das microondas sobre o encolhimento de morangos osmoticamente desidratados em combinação com microondas. Concluíram, entre outras coisas, que as microondas exercem influência sobre o encolhimento e diâmetro equivalente dos morangos, sendo que amostras secas com maior potência de microondas apresentam diâmetros equivalentes menores (apresentam maior encolhimento).

BEAUDRY *et al.* (2003) secaram oxicoco (*Vaccinium macrocarpon*), também conhecido como cranberry, utilizando um sistema de secagem por ar quente com aplicação de microondas. Eles compararam o tempo de residência e a qualidade final das amostras secas com diferentes densidades de potências (0,75 - 1,0 - 1,25 W/g) e dois ciclos diferentes de processamento (30s forno ligado e 30s de forno desligado - 30s forno ligado e 60s de forno desligado). O produto seco com a maior potência de microondas e com o ciclo mais curto obteve menor tempo de residência. Porém, a partir de análise sensorial (ainda que não estatisticamente validada), concluiu-se que as frutas secas com menor densidade de potência e menor ciclo foram mais bem apreciadas. Além disso, pelo índice Chroma, notou-se que as frutas secas em maiores densidades de potência apresentaram tendência a queimar, apresentando uma coloração preta em sua superfície, inaceitável pelos consumidores. Algumas condições de secagem testadas apresentaram perda na textura do produto. Concluíram que menores densidades de potência resultaram em oxicocos de melhor qualidade, porém com tempo de residência maior. A melhor combinação de parâmetros foi a secagem feita com 0,75 W/g e ciclo de 30/60 segundos (de forno ligado e desligado respectivamente). Sugeriram que potências menores fossem mais bem estudadas em busca de tempos de residência mais condizentes com uma tecnologia de secagem híbrida.

ANDRÉS *et al.* (2004) secaram fatias de maçãs e concluíram que a aplicação de microondas diminuiu o tempo de secagem, especialmente em fatias pré-tratadas osmoticamente antes da secagem.

PIOTROWSKI *et al.* (2004) secaram morangos congelados, com ou sem anterior desidratação osmótica, através de dois tipos de secagem: convectiva e convectiva com assistência de microondas. Concluiu-se que a força de microondas influencia na diminuição do tempo de secagem e que potências mais altas de microondas resultam em maiores diferenças da taxa de secagem entre os produtos previamente desidratados ou não.

BERTELI e MARSAIOLI (2005) compararam a secagem de pasta curta obtido pela utilização de um secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas com resultados de secagem da mesma pasta em secador convectivo. Concluíram que o tempo de secagem no equipamento com microondas diminuiu dez vezes comparado ao tempo do processamento convencional, sem apresentar danos na aparência do produto final. Procederam ainda calculando a estimativa da economia do processo, através de um protótipo de secador de cilindro rotativo assistido a microondas em escala industrial. Esse cálculo concluiu que este novo processo de secagem de macarrão é perfeitamente competitivo com o processo convencional.

ALIBAS (2006) comparou processos de secagem por convecção, por energia de microondas e por combinação entre convecção e energia de microondas. Ele utilizou a acelga (*Beta vulgaris L. var. cicla*) como produto a ser seco, partindo de uma umidade inicial de 9,35% (b.s.) e fixando uma umidade final de cerca de 0,1% (b.s.). Concluiu que a secagem por combinação entre convecção e microondas apresentou o menor tempo de residência (1,5-7,5 minutos, de acordo com a potência), seguida pela secagem com microondas (5-9,5 minutos) e pela secagem convectiva (22-195 minutos). A secagem combinada resultou também em folhas com coloração mais semelhante às folhas frescas. Além do mais, o consumo energético do processo combinado foi apenas pouco maior do que no processo só com microondas (0,08-0,11kWh contra 0,07kWh), enquanto o processo convectivo consumiu 0,18-0,54kWh. Concluiu-se que o processo combinado entre microondas e convecção apresentou o melhor desempenho na secagem de folhas de acelga com umidade de 9,35% para 0,1% (b.s.).

FUMAGALLI e SILVEIRA (2005) utilizaram microondas para secar pêras Packhman Triumph, estudaram a cinética de desidratação osmótica como etapa de pré-tratamento à secagem, as variáveis estudadas na secagem foram temperatura, velocidade do ar e potência das microondas. Também foi feita uma comparação com resultados obtidos via liofilização, avaliando posteriormente a qualidade do produto final.

FUKUDA e SILVEIRA (2008), por sua vez, utilizaram a tecnologia de microondas para secagem de brócolis. Os autores separaram as amostras em três tipos: caule, flor e folha e os submetem às mesmas condições de secagem. A variável estudada foi a densidade de potencia (W/g) caracterizando o produto após a secagem *in natura* e desidratado osmoticamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Elaboração do Okara

A soja em grão (*Glycine max*) foi adquirida no comércio local. O Okara foi obtido do leite de soja, processado como mostra a Figura 3.1.

1ª Etapa. 1 kg de soja foi deixado em água potável durante 8 horas, para que ela se saturasse, isto é, absorvesse umidade e aumentasse seu peso em até aproximadamente 2,3 vezes. Esta operação foi realizada com o objetivo de reduzir a força requerida para a desintegração, diminuir o tempo de aquecimento, aumentar o rendimento do extrato solúvel e a capacidade de dispersão e suspensão dos sólidos durante a extração;

2ª Etapa. A soja foi selecionada e posteriormente cozida a 100°C durante 5 minutos (tratamento térmico), mantendo uma relação próxima de dois quilogramas de soja para cada litro de água. Este tratamento térmico é necessário para inativar os fatores antinutricionais como os inibidores de tripsina e lectinas, desnaturar as proteínas para torná-las mais digeríveis, aumentar a vida útil do leite soja, facilitar a extração do leite de soja e inativar a enzima lipoxigenase;

3ª Etapa. Após limpa e peneirada, a mistura foi triturada, com um triturador da marca SKYMSEN modelo LS-04, durante um tempo pré-determinado segundo os planejamentos experimentais. Esta operação foi realizada numa relação de um quilograma de soja úmida para cada dois litros de água, com a finalidade de diminuir o tamanho das partículas de soja e facilitar a extração do leite de soja;

4ª Etapa. O material triturado obtido foi misturado com mais 4 litros de água. Esta mistura foi aquecida numa panela industrial (30 litros) até atingir uma temperatura de 100°C e mantida no cozimento por 5 minutos após a fervura, sendo posteriormente resfriada e filtrada.

5ª Etapa. O material retido no filtro (Okara) foi separado e prensado segundo item 3.2, de modo a obter-se um teor de umidade inicial de 80% (b.u.) após o processo de peneiramento e de 60% (b.u.) após o processo de prensagem. Este material foi embalado em sacolas de PVC seladas em seladora de aquecimento instantâneo da marca BARBI. Finalmente o material embalado foi pesado e estocado a uma temperatura de -5°C.

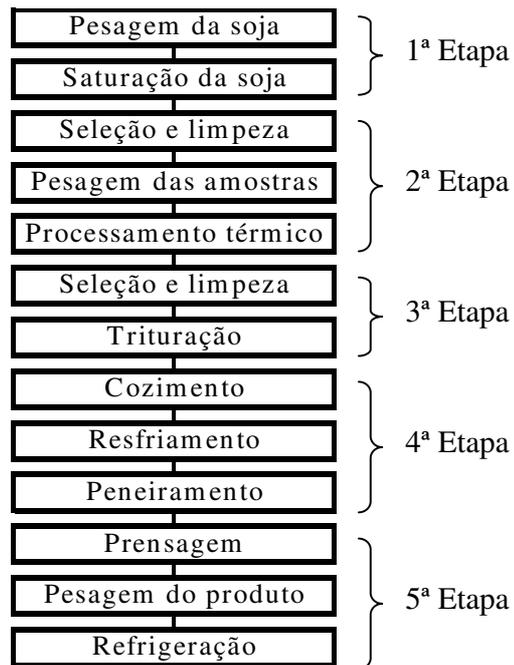


Figura 3.1 - Fluxograma para elaboração de Okara, LESCANO e TOBINAGA (2003)

3.2 Prensagem

A prensagem foi feita utilizando uma prensa helicoidal, horizontal, contínua de aço inoxidável de 3CV, mostrada na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Prensa helicoidal horizontal contínua

A etapa de prensagem foi necessária, pois o Okara logo após a preparação possui aproximadamente 80% (b.u.) de umidade; com essa umidade o material fica aderido nas paredes do leito e cilindro dos secadores utilizados neste trabalho. Para evitar esse problema é necessário que o Okara esteja a aproximadamente 60% de umidade. Porém, nos primeiros experimentos a prensa só funcionava a 23,2 rpm e com essa velocidade o material saía a 70 % (b.u.) de umidade. Foi então necessária a instalação de um inversor de frequência no motor da prensa, para possibilitar o ajuste para 3,9 rpm, com o a qual o material atingiu a umidade desejada de 60% (b.u.). O material prensado foi empacotado e estocado como se mostra na Figura 3.3, para a posterior operação de secagem.



Figura 3.3 - Okara úmido prensado e estocado

Além de facilitar a secagem, aumentando a eficiência energética da operação, a prensagem facilita o manuseio e alimentação do material para dentro do secador. Outra vantagem é a diminuição de água livre e, conseqüentemente, redução da massa na entrada no secador. A perda de umidade do Okara de 80% (b.u.) para 60% (b.u.) acarreta uma perda de massa de 50% em relação à massa inicial, massa esta equivalente à massa de água livre que se encontra no Okara antes do processo de prensagem. Esta operação mecânica de prensagem é importante, considerando que a retirada de quantidade de água livre do material feita por processos mecânicos, comparada com processos de secagem, exige menores quantidades de energia.

3.3 Caracterização física das partículas

Foram escolhidos três tipos de partículas inertes com diferentes características físicas, para testes preliminares de secagem: polipropileno, poliestireno e ABS[®]. Estes inertes foram caracterizados segundo a forma, diâmetro médio da partícula, densidade aparente, densidade volumétrica, densidade real, ângulo de repouso e porosidade.

Para as partículas de Okara úmido prensado foram feitas as seguintes caracterizações físicas: diâmetro médio da partícula, umidade, índice de escoabilidade, densidade volumétrica, densidade aparente e circularidade.

Para as partículas de Okara seco (ponto central do planejamento experimental) foram feitas as seguintes caracterizações físicas: diâmetro médio da partícula, umidade, índice de escoabilidade, ângulo de repouso, densidade volumétrica, densidade aparente, porosidade e circularidade.

As metodologias para caracterizar as partículas inertes e as partículas do Okara úmido e seco estão descritas a seguir.

3.3.1 Diâmetro médio das partículas

A análise granulométrica foi feita a partir do peneiramento do produto seco em peneiras padronizadas Tyler. O diâmetro médio foi obtido através da definição Sauter dado na Equação (3.1).

$$\bar{D}_p = \sum \frac{1}{\frac{\Delta x}{D}} \quad (3.1)$$

Onde:

Δx : Fração mássica retida na peneira;

\bar{D} : Diâmetro médio da abertura da peneira superior e inferior (mm).

Para as partículas de Okara úmido ocorre a impossibilidade de determinação do diâmetro médio por peneiramento, devido à sua elevada umidade e coesão. Para determinar o diâmetro médio da partícula úmida, foram feitas micrografias através de um microscópio tri-óptico marca Cole Parmer modelo #48920-20 acoplado a um sistema de aquisição de microfotografias Cole Parmer NTSC (aquisição de imagem) modelo 49901-30. Em cada micrografia foram colocadas 6 partículas com a finalidade de poder realizar a medições das partículas em triplicata. Para se determinar a quantidade mínima de partículas para serem

analisadas, coletou-se pelo programa *SigmaScan Pro4*[®] o valor diâmetro médio de um número determinado de partículas; para cada partícula foi medido o valor diâmetro médio em triplicata e obtido o desvio médio respectivo. Após, calculou-se o desvio padronizado entre os valores médios das triplicatas para os valores diâmetros médios das partículas a fim de determinar o número de microfotografias mínimo a ser utilizado. O número mínimo de partículas da amostra é determinado quando este desvio padronizado torna-se constante ou diminui, o que ocorreu para um total de 60 microfotografias, perfazendo um total de 360 partículas analisadas.

3.3.2 *Densidade aparente das partículas*

A densidade aparente da partícula é definida como a razão da massa pelo seu volume total, incluindo o volume que os poros ocupam, mas excluindo os espaços entre as partículas, conforme a Equação (3.2). Para as partículas de Okara seco, a densidade aparente foi determinada por porosimetria de mercúrio, sendo utilizado o equipamento Autopore II, da marca Micromeritics, USA. Para as partículas de Okara úmido utilizou-se a técnica de balança hidrostática para a obtenção da densidade aparente; na qual, pelo princípio de Arquimedes, determina-se o volume das partículas através de deslocamento de líquido. Utilizou-se etanol P.A. para as análises.

$$\rho_{ap} = \frac{m_p}{V_{pen} - V_{Hg}} \quad (3.2)$$

Onde:

- m_p : Massa das partículas (g);
- V_{pen} : Volume do penetrômetro (cm³);
- V_{Hg} : Volume de Mercúrio (cm³).

Na Figura 3.4 estão representados todos os componentes básicos de um porosímetro que usa mercúrio. Há vários modelos comerciais, mas todos têm a mesma estrutura básica. Pode-se observar (1) Reservatório de fluido, baixa pressão; (2) Bomba; (3) Multiplicador de pressão; (4) Transdutor de pressão; (5) Reservatório de fluido-alta pressão; (6) Reservatório de mercúrio; (7) Bomba de vácuo.

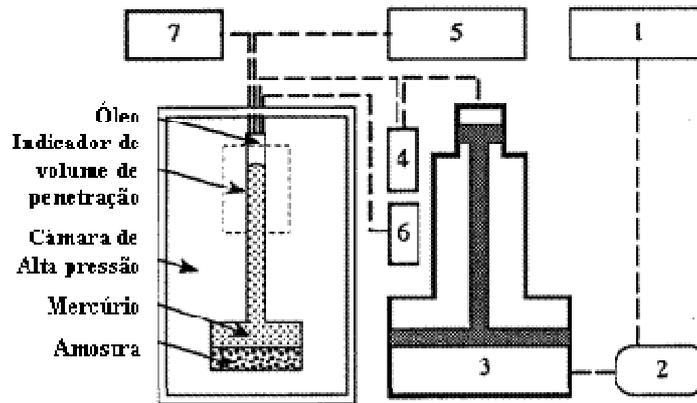


Figura 3.4 - Desenho esquemático do porosímetro de mercúrio (WEBB e ORR, 1997)

3.3.3 Densidade volumétrica das partículas

A densidade volumétrica (também conhecida como densidade *bulk*) dos sólidos é definida como a razão entre a massa de partículas e o volume que elas ocupam em um recipiente quando em arranjo normal, ou seja, quando são dispostas em queda livre em um recipiente de volume calibrado, conforme a Equação (3.3). Esse teste foi realizado no mínimo 15 vezes para cada material.

$$\rho_{\text{vol}} = \frac{m_p}{V_{\text{recep}}} \quad (3.3)$$

Onde:

m_p : Massa das partículas (g);

V_{recep} : Volume do recipiente (cm^3).

3.3.4 Densidade real das partículas

A densidade real é definida como a razão entre a massa da partícula e o volume que a estrutura do sólido ocupa, ou seja, excluindo os poros do sólido. A determinação da densidade real foi realizada por picnometria a Hélio, dada pela Equação (3.4).

$$\rho_{\text{real}} = \frac{m_p}{V_s} = \frac{m_p}{V_{\text{total}} - V_{\text{poros}}} \quad (3.4)$$

Onde:

m_p : Massa das partículas (g);

V_s : Volume da estrutura do sólido (cm^3);

- V_{total} : Volume total da partícula (cm^3);
 V_{poros} : Volume de poros da partícula (cm^3).

3.3.5 Porosidade das partículas

A porosidade é a razão do volume de poros da partícula sobre o volume total da partícula. Utilizando a Equação (3.5) e os valores de ρ_{ap} e ρ_{real} , calcula-se a porosidade das partículas de Okara.

$$\epsilon_p = \left(1 - \frac{\rho_{\text{ap}}}{\rho_{\text{real}}} \right) \times 100 \quad (3.5)$$

Onde:

- ρ_{ap} : Densidade aparente;
 ρ_{real} : Densidade real.

3.3.6 Ângulo de repouso das partículas

Segundo KEEY (1992), o ângulo de repouso é, primariamente, uma propriedade do material particulado, porém é secundariamente um efeito da relação entre o material e a forma com a qual a pilha é construída ou com a maneira com a qual uma camada é perturbada. BROWN e RICHARDS (1970) registraram quatro métodos de medição do ângulo de repouso, sendo que dois dos métodos são baseados no princípio de construção de pilhas através da adição crescente de material particulado; um baseado na inclinação de um tabuleiro preenchido com material e o outro consiste na rotação de uma seção de cilindro preenchida com material até a metade.

Esses métodos são divididos em métodos estacionários (dois primeiros) e dinâmicos (dois últimos), pois enquanto o volume de sólidos no cilindro rotativo move-se também com a rotação, o centro da pilha na base fixa permanece estacionário. O ângulo formado pelo método da rotação é relevante quando se pretende colocar os sólidos em um secador rotativo (KEEY, 1992) e, portanto, foi este o método utilizado para determinação do ângulo de repouso dinâmico do Okara.

A metodologia consiste em girar o tambor lentamente até que seja observado o deslocamento da primeira camada de partículas. Segundo este método, neste momento toma-se a medida do ângulo formado com a horizontal e atribui-se este valor ao ângulo de repouso. Este teste foi feito no mínimo cinco vezes para cada amostra de resíduo Okara.

BROWN e RICHARDS (1970) atestaram que os valores do ângulo de repouso devem ficar entre 30° e 40° com a horizontal para materiais angulares e de livre fluência. Assim como a compactação, a presença de umidade pode também aumentar o ângulo de repouso, o que justifica os valores maiores de ângulo de repouso obtidos para o material úmido em relação ao material seco.

3.3.7 *Escoabilidade das partículas*

A escoabilidade foi medida pelo equipamento específico para esse fim, *Powder Flowability Index Test Instrument (Flodex)*, da marca Hanson Research, USA, através da determinação do índice de fluidez das partículas. O equipamento possui um funil e um cilindro aberto nas extremidades. Na extremidade inferior do cilindro acopla-se um disco com um furo central com diâmetro determinado. As partículas caem livremente a partir do funil no cilindro, após aguardar-se em média trinta segundos para acomodação das partículas, sendo o teste iniciado destampando o furo central do disco. Se as partículas não escoarem, coloca-se um disco de diâmetro maior. O índice de escoabilidade é definido como o menor diâmetro do disco em que as partículas escoam. Este teste foi feito em triplicata, conforme indica o manual do equipamento. Partículas com índice de escoabilidade maior que 34 mm são consideradas partículas muito coesas.

3.3.8 *Circularidade das partículas*

As análises da circularidade foram realizadas por análise de imagens das partículas, utilizando o programa *SigmaScan Pro 4®*. A circularidade varia de 0 [linha] a 1 [círculo perfeito]) através da Equação (3.6).

$$C = \frac{4\pi \times A_p}{P_p^2} \quad (3.6)$$

Onde:

C : Circularidade;

A_p : Área da seção projetada da partícula (mm²);

P_p : Perímetro da seção projetada da partícula (mm).

A área e o perímetro de uma das seções transversais da partícula são determinados através de microfotografias de projeção superior das partículas em sua posição mais estável.

Estas microfotografias foram feitas através de um microscópio tri-óptico marca

Cole Parmer modelo #48920-20 acoplado a um sistema de aquisição de microfotografias Cole Parmer NTSC (Color Vídeo Câmera) modelo 49901-30. Em cada micrografia foram colocadas 8 partículas e as medições da área e do perímetro das partículas foram realizadas em triplicata. Para se determinar a quantidade mínima de partículas para serem analisadas, coletou-se pelo programa *SigmaScan Pro4*[®] o valor da circularidade de um número determinado de partículas; para cada partícula foi medida a circularidade em triplicata e obtido o desvio médio respectivo. Após isso, calculou-se o desvio padronizado entre os valores médios das triplicatas para as circularidades das partículas. O número mínimo de partículas da amostra é determinado quando este desvio padronizado torna-se constante ou diminui.

3.4 Secagem de Okara em secador de leite de jorro e em cilindro rotativo com aplicação de microondas

Com a finalidade de organizar melhor este trabalho, este item será dividido em duas etapas: o item 3.4.1 conterà a descrição da metodologia e procedimentos da secagem para o secador de leite de jorro e o item 3.4.2 apresentará as mesmas informações, desta vez para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas. Dentro deste item será incluída a secagem de Okara em secador adaptado de forno de microondas com a finalidade de determinar as cinéticas de secagem de Okara neste tipo de secador. Este item também conterà informações de consumo energético por unidade de massa com a finalidade de comparar os dois secadores: um contínuo (secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas) e o outro em batelada (forno de microondas). O item 3.4.3 tem a finalidade de avaliar o consumo energético comparativo do secador de leite de jorro e o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

3.4.1 Secador de leite de jorro

O secador de leite de jorro utilizado encontra-se no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem da Faculdade de Engenharia Química (FEQ) da Universidade Estadual de Campinas, (UNICAMP). Esse secador foi construído em acrílico, com geometria cone-cilíndrica. Possui uma base cônica com ângulo incluso de 60°, diâmetro do orifício de entrada de 5,0 cm, diâmetro superior de 20 cm e uma altura na parte cilíndrica de 30 cm. A parte superior do secador é formada por outro cone acrílico com ângulo de inclinação de 45°, como se observa na Figura 3.5.

Fazem parte também do sistema de secagem em leito de jorro os seguintes equipamentos: soprador, aquecedor de ar, ciclone lapple, tubulações e válvulas, manômetros de tubo em U de pressão estática e de pressão diferencial para medida de vazão através de uma placa de orifício, termopares para medida de temperatura e termohigrômetros para a medida da umidade relativa do ar na entrada e saída do equipamento.



Figura 3.5 - Secador de leito de jorro

3.4.1.1 *Material inerte no leito de jorro*

O material inerte usado no leito de jorro foi escolhido baseado em duas análises: curva fluidodinâmica do material inerte e estabilidade de jorro junto com Okara a 60% (b.u.) de umidade. Foram testados três tipos de partículas diferentes: poliestireno (PS), polipropileno (PP) e ABS[®]; para se determinar aquele que apresentava melhor regime fluidodinâmico de jorro estável junto do Okara úmido. Todos os inertes foram caracterizados fisicamente quanto a forma, diâmetro médio, densidades aparente, volumétrica e real e ângulo de repouso. Pelos resultados dos testes preliminares feitos do material inerte junto com o material úmido, o polipropileno (PP) foi o material inerte escolhido. Estudou-se, então, a fluidodinâmica do polipropileno dentro do secador de leito de jorro sem o material umido.

Para determinar a curva fluidodinâmica das partículas de PP no leito de jorro (teste em branco) adotou-se o seguinte procedimento: uma carga definida de partículas foi adicionada ao leito, sendo medida a altura do leito fixo com uma régua milimetrada.

Aumentou-se lentamente a vazão de ar até a capacidade máxima do soprador. Para cada variação da vazão de ar, mediu-se a pressão estática, a queda de pressão no leito e a queda de pressão na placa de orifício. Depois de atingida a máxima capacidade do soprador, reduziu-se lentamente a vazão de ar até o fechamento da válvula. A análise da curva permitiu definir a faixa de vazões para operação do secador.

3.4.1.2 Testes para determinar a relação massa de material úmido (Okara)/massa de material inerte (polipropileno)

A temperatura do ar de secagem foi mantida constante (60°) em todos os experimentos, já que para altos valores de temperatura o Okara poderia sofrer perdas nos teores de vitaminas (solvência) e de proteínas (desnaturação). As variáveis analisadas foram: massa de Okara e massa de polipropileno. As partículas de Okara úmido foram inseridas no leito quando as partículas de material inerte já se encontravam em regime permanente a 60°C. A vazão de ar foi regulada mantendo o jorro mínimo. Em seguida, foram retiradas, com um dispositivo, amostras de aproximadamente 4g a cada 6 minutos (perfazendo um total de aproximadamente 50g) para elaborar as curvas de secagem. As amostras foram coletadas da região do ânulo e seus valores de umidade foram determinados pelo método gravimétrico estático, em estufa a 105°C por 24h. As quantidades de Okara e de polipropileno utilizados nos experimentos são mostradas na Tabela 3.1. na análise da cinética de secagem foram testados os modelos matemáticos Exponencial (Equação (2.10)), de Page (Equação (2.12)) e de Page modificado (Equação (2.13)).

Tabela 3.1- Relações m_o/m_i utilizadas

Experimento	Massa de Okara, m_o (g)	Massa de inerte, m_i (g)	m_o/m_i
1	300	1000	0,30
2	400	1000	0,40
3	500	1000	0,50
4	300	1250	0,24
5	400	1250	0,32
6	500	1250	0,40
7	300	1500	0,20
8	400	1500	0,27
9	500	1500	0,33

3.4.1.3 Secagem em leito de jorro

A massa de material inerte utilizada no planejamento experimental foi mantida constante e igual a 1,5kg, mantendo-se também a quantidade constante de 0,5kg de material úmido, em todos os experimentos, baseado no desenvolvimento e resultados do item 3.4.1.2 apresentados no item 4.3.2.

Inicialmente, preencheu-se o leito com a massa pré-estipulada de material inerte; então o soprador e os aquecedores foram ligados, sendo regulados na vazão de jorro mínimo do material e temperatura de operação. Após um período de estabilização da temperatura, mediu-se a vazão de jorro mínimo do material inerte. Adicionou-se então o material úmido, com umidade próxima de 60% (b.u.), regulou-se a vazão e a temperatura do ar de entrada para atingir as condições experimentais e acionou-se o cronômetro. Durante a secagem foram coletadas 11 amostras de aproximadamente 4g com um dispositivo de amostragem em intervalos de quatro minutos dando um tempo total de secagem de 44 minutos. Este tempo de secagem foi determinado através de testes preliminares, como o tempo de secagem necessário para obter produtos com umidades próximas às desejadas (8% b.u.). O material seco e o inerte foram descarregados e posteriormente separados através de peneiramento. Os experimentos foram realizados com umidade relativa do ar de entrada entre 5% e 18% no máximo, pois foi utilizado um leito de sílica-gel na linha para absorção de umidade.

3.4.1.4 Planejamento experimental no leito de jorro

Com o propósito de analisar o processo de secagem em leito de jorro, foi realizado um planejamento experimental completo baseado na metodologia multivariável denominado Planejamento Completo com Pontos Axiais e Centrais, descrito por BARROS NETO *et al.* (2002).

No caso do leito de jorro, o planejamento foi de $2^3 = 8$ ensaios, seis pontos axiais ($\alpha = (2^n)^{1/4}$) e três pontos centrais, totalizando, portanto 17 experimentos. As variáveis estudadas foram: temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), relação entre a vazão do ar e a vazão de jorro mínimo e tempo de trituração do Okara (segundos). A temperatura do ar é uma das principais variáveis a ser estudada, pois além de influenciar diretamente a secagem, sabe-se que temperaturas próximas ou superiores a 80°C podem provocar perdas nos valores funcionais do Okara seco. Nos testes realizados, foi possível observar que o valor da

temperatura dentro do leito (*bulk*) é menor que a temperatura de entrada do ar de secagem nos primeiros instantes do processo, aumentando de forma gradativa a medida que o produto dentro do secador perde umidade. A relação entre vazão de jorro e vazão de jorro mínimo foi escolhida e mantida constante durante cada experimento de secagem, uma vez que perdas de água, encolhimento e aglomeração influenciam na secagem. O tempo de trituração da soja foi estudado, pois altera a granulometria da partícula e, conseqüentemente, o seu comportamento dinâmico dentro do secador.

A Tabela 3.2 mostra os níveis e valores codificados do planejamento fatorial completo.

Tabela 3.2 - Planejamento experimental

FATORES	NÍVEIS				
	-1,68	-1	0	1	1,68
Temperatura do ar de secagem (°C)	43	50	60	70	77
Vazão do ar / Vazão de jorro mínimo	1,03	1,10	1,20	1,30	1,37
Tempo de trituração (seg)	40	60	90	120	140

A Tabela 3.3 apresenta os valores das variáveis codificadas e reais para cada um dos experimentos. Esta tabela foi baseada em testes preliminares realizados para obter-se Okara seco com uma umidade final entre 3% e 12% em base úmida. Pode-se observar que os valores de umidade final encontram-se na faixa de umidade exigida pela legislação brasileira para produtos farináceos (8 e 12% b.u.). Os menores e maiores valores das variáveis da secagem foram escolhidos através de teste preliminares, com a finalidade de obter produtos secos de características físicas adequadas para o consumo humano.

Tabela 3.3 - Planejamento experimental completo para o leito de jorro

Experimento	Variáveis Codificadas			Variáveis Reais		
	X ₁	X ₂	X ₃	T (°C)	Q/Q _{jm}	τ (s)
1	-1	-1	-1	50	1,10	60
2	1	-1	-1	70	1,10	60
3	-1	1	-1	50	1,30	60
4	1	1	-1	70	1,30	60
5	-1	-1	1	50	1,10	120

6	1	-1	1	70	1,10	120
7	-1	1	1	50	1,30	120
8	1	1	1	70	1,30	120
9	0	0	0	60	1,20	90
10	0	0	0	60	1,20	90
11	0	0	0	60	1,20	90
12	-1,68	0	0	43	1,20	90
13	1,68	0	0	77	1,20	90
14	0	-1,68	0	60	1,03	90
15	0	1,68	0	60	1,37	90
16	0	0	-1,68	60	1,20	40
17	0	0	1,68	60	1,20	140

Os valores experimentais de umidade média adimensional versus tempo foram ajustados ao modelo de Page modificado, Equação (2.13), dado que este modelo foi o que apresentou melhor coeficiente de correlação. As respostas estudadas neste planejamento experimental foram os valores das constantes do modelo de Page modificado, k e n, obtidos ao ajustar os valores experimentais ao modelo matemático. Este modelo foi o que apresentou melhor ajuste para este tipo de material particulado, onde grande parte da secagem se apresenta de forma difusiva. Onde k representa o constante de difusividade e n diretamente relacionado às condições de secagem e n relacionado às condições externas a secagem e curvatura dos pontos experimentais. Outra resposta analisada foi a umidade base seca X% (g H₂Ox100/g matéria Seca), para um tempo de secagem de 40 minutos.

3.4.2 Secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

O equipamento utilizado foi o secador de cilindro rotativo com circulação de ar quente assistido a microondas já esquematizado na Figura 2.10 e que se mostra na Figura 3.6. Na data em que foram executados os experimentos, esse secador encontrava-se instalado no Laboratório de Microondas Aplicadas (LMA), da Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Na atualidade, o secador encontra-se instalado no Laboratório de Microondas Aplicadas (LMA), dentro da Planta Piloto do Grupo de Engenharia e Pós-colheita (GEPC), do Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL), em Campinas, São Paulo.



Figura 3.6 - Secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

3.4.2.1 Material inerte no cilindro rotativo com aplicação de microondas

O material inerte usado no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas foi escolhido baseado em duas análises: homogeneidade na alimentação da mistura (Okara e inerte) para dentro do secador e transporte e acompanhamento uniforme do inerte junto ao Okara dentro do cilindro do secador. Foram testados três tipos de partículas diferentes: poliestireno, polipropileno e ABS[®]. O poliestireno foi o inerte utilizado na realização dos experimentos de secagem, por ser o material que mais se adaptou à alimentação e transporte dentro do secador. As partículas de poliestireno têm formato arredondado e achatado, e por isso acompanham melhor às partículas do Okara úmido, ao contrário de outros materiais inertes testados, que por apresentarem formato mais arredondado, podem se adiantar na alimentação com relação ao Okara.

3.4.2.2 Secagem em cilindro rotativo com aplicação de microondas

Os parâmetros do sistema que permaneceram constantes foram a umidade inicial, a velocidade da rosca alimentadora, o ângulo de inclinação do cilindro, a velocidade de rotação do cilindro e o tempo aproximado de residência, cujos valores foram fixados após testes preliminares. A Tabela 3.4 apresenta os valores dos parâmetros constantes utilizados nos experimentos.

Tabela 3.4 – Variáveis que se mantiveram constantes no sistema de secagem

CONSTANTES DO SISTEMA (Unidade)	VALOR
Umidade inicial % (b.u.)	60
Massa aproximada da alimentação (kg/h)	3
Velocidade de rotação do cilindro (rpm)	1,25
Ângulo de inclinação do cilindro (°)	1
Tempo de residência aproximado (min)	30

A secagem foi realizada de forma contínua, através de um alimentador do tipo rosca sem fim, montada no fundo de uma moega de paredes móveis. O acionamento de ajuste variável da rosca e movimento das paredes da moega foi realizado através de um painel com indicação digital. A configuração geométrica das paredes da moega, assim como as dimensões da rosca, empurram o material lateralmente pelo interior de um tubo guia em direção à entrada do secador.

O ajuste da temperatura do ar foi feito através de um painel de controle do secador, que comandava três bancos de resistências, mediante um sistema termostaticado automático com bulbo sensor aplicado a um dos bancos. O controle de vazão do ar foi feito através de uma válvula borboleta, sendo medida por uma célula de fluxo laminar da marca MERIAM modelo 50MC2-20. As microondas, de frequência 2450 MHz, foram produzidas por um gerador de marca ALTER modelo SM275, dotado de ajuste de potência infinitamente variável entre zero e 100% de 1,9kW.

A mistura de Okara úmido e poliestireno foi composta na relação 2:1, esta relação foi estabelecida considerando a quantidade de material inerte mínimo necessário para estabelecer um escoamento uniforme na entrada e dentro do cilindro rotativo, foi misturando 6 kg de Okara úmido para 3 kg de poliestireno. O secador rotativo foi ligado até atingir o estado de regime permanente, o que aconteceu após um tempo aproximado de 30 minutos. Em seguida, realizou-se a alimentação do Okara úmido junto com o poliestireno. Após 35 minutos de iniciada a alimentação, amostras de aproximadamente 10g de material seco foram coletadas a cada 10 minutos para análise de umidade durante um tempo total de 130 minutos.

Foram registradas as temperaturas do ar de bulbo seco e bulbo úmido na entrada e na saída do secador. Com essas medidas, foi possível calcular a umidade absoluta, a temperatura de orvalho, o volume específico, a umidade relativa e as entalpias do ar de entrada e de saída do secador. Com esses valores foram obtidos a água evaporada do material úmido por hora, a água removida do material pelo ar, a água total removida e a energia retirada pelo ar. As Equações (3.7) a (3.10) fazem parte da análise psicrométrica e energética para avaliar os secadores de leite de jorro e de cilindro rotativo com aplicação de microondas.

Após a secagem, o material seco foi separado do material inerte através do peneiramento.

$$A_1 = M_a \times \left(\frac{U_0 - U_f}{100 - U_f} \right) \quad (3.7)$$

Onde:

- A_1 : Água evaporada (kg/h)
 M_a : Vazão mássica da alimentação (kg/h)
 U_0 : Umidade inicial do Okara (%)
 U_f : Umidade final do Okara (%)

$$A_2 = W_s - W_e \quad (3.8)$$

Onde:

- A_2 : Água removida pelo ar (kg de água/kg de ar seco)
 W_s : Umidade absoluta do ar de saída (kg de água/kg de ar seco)
 W_e : Umidade absoluta do ar de entrada (kg de água/kg de ar seco)

$$A_3 = \left[\left(\frac{v}{60} \right) \times \left(\frac{1}{V_{esp}} \right) \right] \times A_2 \times 3600 \quad (3.9)$$

Onde:

- A_3 : Água total removida (kg de água/h)

- v : Vazão do ar (m³/min)
- V_{esp} : Volume específico do ar de entrada (m³/kg de ar seco)

$$E = \left[\left(\frac{v}{60} \right) \times \left(\frac{1}{V_{esp}} \right) \right] \times (H_s - H_e) \quad (3.10)$$

Onde:

- E : Energia retirada pelo ar por unidade de tempo (kJ/s=kW)
- H_s : Entalpia do ar de saída (kJ/kg de ar seco)
- H_e : Entalpia do ar de entrada (kJ/kg de ar seco)

3.4.2.3 Planejamento experimental no cilindro rotativo com aplicação de microondas

Com o propósito de estudar o processo de secagem no secador de cilindro rotativo com circulação de ar quente assistido a microondas, foi realizado um planejamento experimental completo baseado na metodologia multivariável denominada Planejamento Completo com Pontos Axiais e Centrais, descrito por BARROS NETO *et al.* (2002).

Nesta secagem realizou-se um planejamento completo 2³ com seis pontos axiais ($\alpha = (2^n)^{1/4}$) e três pontos centrais, perfazendo, portanto 17 experimentos. As variáveis estudadas foram: vazão e temperatura do ar de secagem e potência das microondas. As respostas estudadas neste planejamento experimental foram os valores das umidades médias finais para um tempo de secagem de 130 minutos. A Tabela 3.5 mostra os níveis e valores codificados do planejamento fatorial completo.

Tabela 3.5 - Planejamento experimental

FATORES	NÍVEIS				
	-1,68	-1	0	1	1,68
Vazão do ar de secagem (m ³ /min)	0,67	0,7	0,75	0,8	0,83
Temperatura do ar de secagem (°C)	53	60	70	80	87
Potência das microondas (W)	860	1000	1200	1400	1540

A Tabela 3.6 apresenta os valores das variáveis codificadas e reais para cada um dos experimentos. Esta tabela foi baseada em testes preliminares realizados para obter-se Okara seco com uma umidade final entre 3% e 12% em base úmida.

Tabela 3.6 - Planejamento experimental: Variáveis codificadas e reais

VARIÁVEIS						
EXPERIMENTO	CODIFICADAS			REAIS		
	X ₁	X ₂	X ₃	V (m ³ /min)	T (°C)	P (W)
1	-1	-1	-1	0,7	60	1000
2	1	-1	-1	0,7	60	1000
3	-1	1	-1	0,7	80	1000
4	1	1	-1	0,7	80	1000
5	-1	-1	1	0,8	60	1400
6	1	-1	1	0,8	60	1400
7	-1	1	1	0,8	80	1400
8	1	1	1	0,8	80	1400
9	0	0	0	0,75	70	1200
10	0	0	0	0,75	70	1200
11	0	0	0	0,75	70	1200
12	-1,68	0	0	0,67	70	1200
13	1,68	0	0	0,83	70	1200
14	0	-1,68	0	0,75	53	1200
15	0	1,68	0	0,75	87	1200
16	0	0	-1,68	0,75	70	860
17	0	0	1,68	0,75	70	1540

3.4.3 *Secagem em forno de microondas adaptado*

Para complementar o estudo realizado no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas foi realizado um estudo complementar com um secador de forno de microondas com circulação de ar quente. Esta secagem foi realizada em batelada e foram estudadas as mesmas variáveis estudadas no secador de cilindro rotativo.

Os experimentos de secagem foram realizados em um forno de microondas doméstico (Brastemp – modelo BMV38-A), que se mostra na Figura 3.7, cavidade com volume de 38 litros, potência nominal máxima de 900 W e frequência de 2450 MHz, adaptado para permitir a circulação de correntes de ar e remoção da umidade. O equipamento também possui um sistema de controle de potência de emissão de microondas em função da temperatura da superfície da amostra, medida por um sensor infravermelho.



Figura 3.7 - Secador de forno de microondas adaptado com circulação de ar quente

Termopares foram instalados no sistema e interligados a um computador, que registrava os dados de temperatura do processo a cada minuto. As temperaturas adquiridas durante todo o processo de secagem foram: temperatura do ar ambiente (bulbo seco e úmido), temperatura do ar quente na entrada do forno (bulbo seco), temperatura do ar de saída (bulbo seco e úmido), além da temperatura do produto dentro do forno, medida pelo sensor infravermelho.

Foram colocados 300g de Okara com 60% (b.u.) de umidade dentro de um cesto circular de teflon, no interior do forno de microondas. O cesto encontrava-se apoiado sobre o prato giratório do forno, permitindo uma melhor homogeneidade da aplicação das microondas.

Para evitar a necessidade de retirada da amostra durante a secagem para a pesagem do material e conseqüentemente prevenindo quedas de temperatura do produto durante o processo, adaptou-se ao equipamento um sistema de pesagem interna: uma haste confeccionada de teflon foi conectada no centro do cesto, de forma que a extremidade livre pudesse passar por um orifício presente na parede superior do forno e ficar na parte externa do equipamento. Esta extremidade livre da haste foi conectada a uma balança que estava montada acima do forno. Desta forma, foi possível determinar a massa do material em

intervalos de tempo de 5 minutos durante 80 minutos e assim poder elaborar as curvas de secagem.

Os valores experimentais foram ajustados ao modelo de Page modificado (Equação 2.13) dado que este modelo foi o que apresentou melhor coeficiente de correlação.

3.4.3.1 *Planejamento experimental no forno de microondas adaptado*

Com o propósito de estudar as curvas de secagem no forno de microondas com circulação de ar quente, foi realizado um planejamento experimental completo com pontos centrais, descrito por BARROS NETO *et al.* (2002).

Nesta secagem realizou-se um planejamento completo 2^3 com três pontos centrais dando um total de 11 experimentos. As variáveis foram as mesmas que no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas: vazão e temperatura do ar de secagem e potência das microondas. A Tabela 3.7 mostra os níveis e valores codificados do planejamento experimental com pontos centrais.

Tabela 3.7 - Planejamento experimental

FATORES	NÍVEIS		
	-1	0	1
Temperatura do ar de secagem (°C)	60	70	80
Vazão do ar de secagem (m ³ /min)	1,3	1,4	1,5
Potência das microondas (W)	100	200	300

Tabela 3.8 - Planejamento experimental: Variáveis codificadas e reais

EXPERIMENTO	VARIÁVEIS					
	CODIFICADAS			REAIS		
	X ₁	X ₂	X ₃	T (°C)	V (m ³ /min)	P (W)
1	-1	-1	-1	60	1,3	100
2	1	-1	-1	80	1,3	100
3	-1	1	-1	60	1,4	100
4	1	1	-1	80	1,4	100
5	-1	-1	1	60	1,3	300

6	1	-1	1	80	1,3	300
7	-1	1	1	60	1,4	300
8	1	1	1	80	1,4	300
9	0	0	0	70	1,5	200
10	0	0	0	70	1,5	200
11	0	0	0	70	1,5	200

A Tabela 3.8 apresenta os valores das variáveis codificadas e reais para cada um dos experimentos. Esta tabela foi baseada no planejamento experimental realizado no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas. Os valores experimentais de umidade média adimensional versus tempo foram ajustados ao modelo de Page modificado, Equação (2.13), dado que este modelo foi o que apresentou melhor coeficiente de correlação. As respostas estudadas neste planejamento experimental foram as mesmas que no leito de jorro, os valores das constantes do modelo de Page modificado, k e n, obtidos ao ajustar os valores experimentais ao modelo matemático. Analogamente como no secador de leito de jorro outra resposta analisada foi a umidade final base umida para um tempo de 50 minutos.

3.4.4 Avaliação energética dos processos de secagem

Para realizar uma avaliação energética do processo de secagem foram estudados diferentes parâmetros nos secadores, dado que um processo foi realizado em batelada e outro de forma contínua.

3.4.4.1 Avaliação energética para o secador de leito de jorro

Para avaliar o secador de leito de jorro foram analisados basicamente os seguintes

parâmetros:

$$a = \frac{\text{massa de ar utilizada}}{\text{massa de água evaporada}} \text{ (kg/kg)} \quad (3.11)$$

$$T_{ev} = \frac{\text{massa de água evaporada}}{\text{volume do equipamento} \cdot \text{tempo}} \text{ (kg/m}^3\text{s)} \quad (3.12)$$

$$E_e = \frac{\text{energia trasferida ao sistema}}{\text{massa de água evaporada}} \text{ (J/kg)} \quad (3.13)$$

Em que T_{ev} é chamada de taxa de evaporação volumétrica e E_e é a energia específica.

Esses três parâmetros foram usados por SOUZA (2003) na comparação de resultados da secagem de extrato seco vegetal em leito de jorro e em *spray-drier*. Os dois primeiros critérios foram usados por MARKOWSKI (1993) na comparação de resultados da secagem de materiais biológicos em leito de jorro e em *spray-drier*, enquanto que ZÜLKE (1988) adotou os critérios de eficiência energética e de produtividade em um estudo comparativo de algumas configurações de leito de jorro.

Foram determinados também os valores por unidade de tempo de Massa de Okara úmido, pela Equação (3.14); e água evaporada do Okara, pela Equação (3.15). Também foram determinadas as energias de água evaporada, dada pela Equação (3.16) e Energias consumidas para aquecer o Okara e o inerte, dadas pelas Equações (3.17) e (3.18).

$$M_{ou} = M_{Okara\ inicial} \cdot 60/44 \quad (3.14)$$

$$W = M_{ou} \left(\frac{U_o - U_f}{100 - U_f} \right) \quad (3.15)$$

$$H_w = W \cdot \lambda_{ev} \quad (3.16)$$

$$E_{Okara} = \frac{M_{total} \cdot C_{p_o} \cdot (T_{aq} - T_{aa})}{4} \quad (3.17)$$

$$E_{inerte} = \frac{3 M_{total} \cdot C_{p_i} \cdot (T_{aq} - T_{aa})}{4} \quad (3.18)$$

Estes valores foram comparados com os encontrados por WACHIRAPHANSKUL e DEVAHASTIN (2005, 2007), que analisaram a secagem de Okara em secador de leito de jorro.

3.4.4.2 Avaliação energética para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

Para avaliar o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas foram analisados os seguintes parâmetros:

$$\text{Eficiência Térmica (ET)} = \frac{E_{ho} + H_{wo}}{E_{aq} + E_{MW}} \times 100 (\%) \quad (3.19)$$

$$\text{Energia específica (E}_{MW}) = \frac{E_{aq} + H_{MW}}{\text{Água total removida pelo ar}} \quad (\text{MJ/kg}_{H_2O}) \quad (3.20)$$

$$\text{Energia Dissipada (ED)} = \frac{\sum \text{Energia na entrada} - \sum \text{Energias na saída}}{\sum \text{Energia na entrada}} \times 100(\%) \quad (3.21)$$

Onde :

E_{hO} : Energia calorífica do Okara por unidade de tempo

H_{wO} : Energia da água evaporada do Okara por unidade de tempo

E_{aq} : Energia do ar quente por unidade de tempo

E_{MW} : Energia das microondas por unidade de tempo

Após avaliação energética do secador de leite de jorro e secador rotativo foi estabelecido qual de ambos secadores mostrou maior eficiência e maior gasto de energia específica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das partículas inertes

As partículas inertes (polipropileno, poliestireno e ABS[®]) testadas foram caracterizadas segundo a metodologia descrita anteriormente, e os resultados são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Caracterização física do material inerte

Material	Polipropileno	Poliestireno	ABS [®]
Forma	Irregular- <i>pellet</i>	achatada	arredondada
\bar{D}_p (mm)	3,13±0,02	4,51±0,03	2,98±0,01
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,904±0,002	1,053±0,002	1,019±0,001
ρ_{vol} (g/cm ³)	0,571±0,007	0,658±0,005	0,652±0,006
ρ_{real} (g/cm ³)	0,906±0,001	1,061±0,001	1,023±0,001
Φ (°)	38,4±1,2	34,8±1,5	42,9±2,1
ϵ_p (%)	0	0,75	0,39

Segundo GRANTGES (1981), partículas com diâmetro médio entre 149 μ m e 3,18mm são consideradas granulares e partículas com diâmetros na faixa de 3,18 até 12,7mm são consideradas partículas grosseiras ou encaroçadas. Pelo índice de escoabilidade, partículas com ângulos de repouso entre 30° e 45° são consideradas de escoamento livre. Portanto, as partículas de polipropileno e ABS são granulares e a de poliestireno, grosseira. Com relação ao ângulo de repouso, são todas de escoamento livre (*free-flowing*).

A separação do polipropileno e do material seco se faz por operação mecânica de peneiramento, mas dependendo das condições do processo de secagem, podem se formar aglomerados de Okara ou pequenas partículas de Okara podem ficar aderidas ao material, impedindo a separação através deste tipo de operação. Neste caso, o conhecimento da densidade destas partículas é importante, pois se pode separar o material inerte do material seco deixando ambos os produtos embebidos em água para a posterior lavagem do material inerte e separação por decantação, tornando possível a reutilização do inerte. Salienta-se que os três materiais inertes têm porosidade praticamente nula.

Comparando os resultados das análises físicas destes materiais com os resultados de DONIDA (2004), verifica-se que os valores são bem próximos, o que permite avaliar a metodologia aplicada como adequada.

4.2 Caracterização do Okara úmido

As partículas do Okara úmido também foram caracterizadas para diferentes tempos de trituração do grão de soja saturado em água. O resultado da caracterização física é mostrado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características físicas das partículas do Okara úmido

Tempo de trituração (seg)	60	90	120
Diâmetro médio (mm)	2,23±0,09	1,87±0,02	1,84±0,01
Umidade inicial % (b.u.)	60±1	60±1	60±1
Índice de escoabilidade (mm)	>34mm	>34mm	>34mm
Densidade volumétrica ou <i>bulk</i> (g.ml ⁻¹)	0,391±0,005	0,347±0,01	0,347±0,004
Densidade aparente (g.ml ⁻¹)	1,01±0,03	0,96±0,03	0,99±0,03
Circularidade (-)	0,501±0,017	0,490±0,021	0,520±0,023

Analisando os diâmetros médios e desvios padrões, verifica-se que o diâmetro médio das partículas diminui com o aumento do tempo de trituração. Após um tempo de trituração de 90 segundos, ocorre pouca trituração do material, uma vez que o diâmetro médio praticamente não muda. . Entretanto, o desvio padrão, diminui para tempos de trituração superiores a 60 segundos, o que indica, que o diâmetro das partículas se encontra mais próximo da média com o aumento do tempo de trituração.

O índice de escoabilidade das partículas úmidas foi maior que 34 mm. Não foi obtido o resultado exato do índice de escoabilidade, o equipamento só dispõe de placas padronizadas com orifícios até 34mm. Evidencia-se assim a alta coesão entre as partículas úmidas, o que dificulta seu escoamento e justifica o uso de partículas inertes na secagem para obtenção do regime fluidodinâmico no leito de jorro e do transporte no cilindro.

A densidade volumétrica (*bulk*) está próxima do valor encontrado na literatura (igual a 0,4g.ml⁻¹, segundo WACHIRAPHANSKUL & DEVAHASTIN, 2005).

Analisando os valores de circularidade e seus respectivos desvios padrões, verifica-se que praticamente não há mudanças na esfericidade do material com o tempo de trituração.

4.3 Secagem no leito de Jorro

4.3.1 Curvas Fluidodinâmicas

O material inerte escolhido para a secagem de Okara em leito de jorro foi o polipropileno, porque foi o que apresentou movimento de jorro estável com boa taxa de circulação junto com o Okara úmido, comparado aos outros inertes testados. Foi determinada a curva fluidodinâmica das partículas de polipropileno variando a carga no leito (1,5, 2,0 e 2,5kg).

Na Figura 4.1 mostra-se uma das curvas fluidodinâmicas para a carga de 2kg de polipropileno. Pode-se observar a queda de pressão máxima, a queda de pressão em jorro estável, a queda de pressão e a vazão de ar na condição de jorro mínimo.

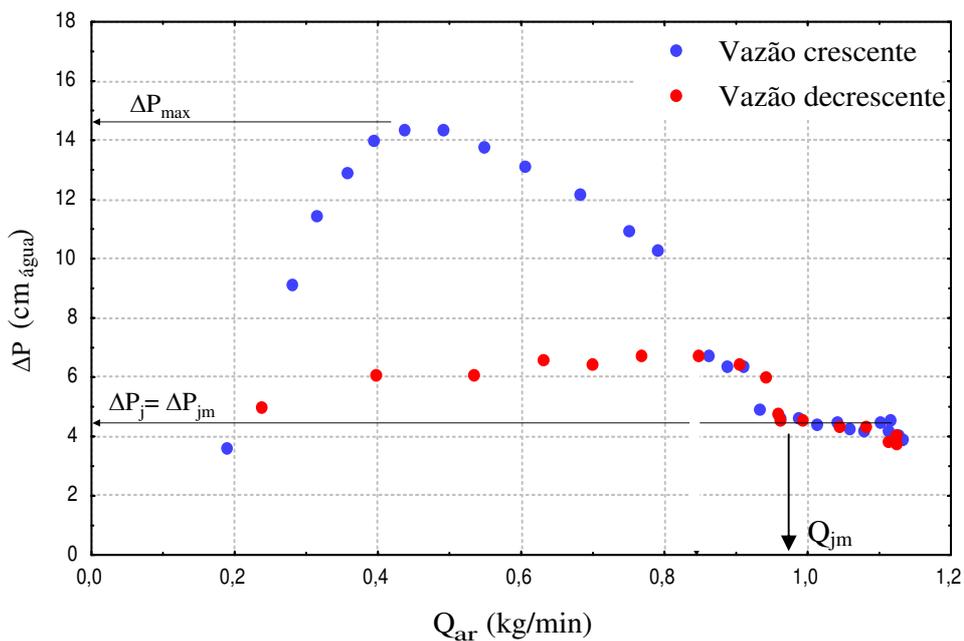


Figura 4.1 - Curva característica de queda de pressão do leito versus vazão de ar de jorro; esferas de polipropileno ($d_p = 3,13 \text{ mm}$, $m_i = 2,0 \text{ kg}$, $h_o = 19\text{cm}$)

Analisando-se a curva, pode-se observar que as partículas apresentaram comportamento fluidodinâmico típico de leito de jorro. O mesmo ocorreu com as outras cargas de inerte. Observou-se também que, aumentando a carga de partículas, a vazão de

jorro mínimo e a queda de pressão do jorro estável aumentam. Conseqüentemente, a queda de pressão máxima a queda de pressão no jorro mínimo também aumentam.

4.3.2 Quantidade de material úmido (Okara) e material úmido inerte (polipropileno)

Segundo o planejamento experimental apresentado na Tabela 3.1 e a metodologia descrita no item 3.1.4.2, foram feitos testes preliminares de secagem variando a quantidade de Okara e a quantidade de polipropileno dentro do leito.

Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados da secagem para a resposta adimensional, $Y=X/X_o$, do Okara em função do tempo. Pode-se observar que, para um tempo de secagem de 30 minutos, o experimento 3 ($m_o/m_i=0,5$) apresentou um valor $Y=X/X_o=0,1253$, valor este muito maior que o obtido no experimento 7 ($m_o/m_i=0,2$), que foi igual a $Y=X/X_o=0,0364$. Com estes dados, pode-se concluir que para maiores valores da relação m_o/m_i temos maiores tempos de secagem para atingir o mesmo conteúdo de umidade. Isto era previsto, pois, nestes casos têm-se maiores quantidade de material úmido.

Foram elaboradas as curvas das cinéticas de secagem para diferentes valores de relação entre Okara úmido e material inerte.

Tabela 4.3 – Cinética de secagem – Valores do adimensional X/X_o em função do tempo para diferentes relações entre m_o/m_i

Tempo (min)	Resposta - $Y=X/X_o$									
	m_o/m_i (Exp)	0,30 (1)	0,40 (2)	0,50 (3)	0,24 (4)	0,32 (5)	0,40 (6)	0,20 (7)	0,27 (8)	0,33 (9)
0		1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
6		0,4911	0,6533	0,6680	0,5775	0,6788	0,7643	0,4536	0,6057	0,7161
12		0,2779	0,3575	0,4492	0,3150	0,3959	0,4710	0,2314	0,2821	0,4272
18		0,1350	0,2174	0,3762	0,1431	0,2244	0,3192	0,0838	0,1791	0,2558
24		0,0392	0,1122	0,2637	0,0586	0,0999	0,1786	0,0416	0,0625	0,1818
30		0,0263	0,0702	0,1253	0,0357	0,0473	0,1194	0,0364	0,0374	0,1236
36		0,0219	0,0237	0,0409	0,0267	0,0327	0,0441	0,0290	0,0270	0,0565
42		0,0199	0,0195	0,0276	0,0225	0,0286	0,0403	0,0256	0,0252	0,0388
48		0,0204	0,0165	0,0251	0,0235	0,0211	0,0301	0,0286	0,0235	0,0267
54		0,0194	0,0175	0,0243	0,0209	0,0209	0,0260	0,0249	0,0229	0,0285
60		0,0174	0,0154	0,0225	0,0145	0,0198	0,0135	0,0220	0,0203	0,0233

A Figura 4.2 mostra os resultados das cinéticas de secagem. Os experimentos 3 (Okara 500g – PP 1000g) e 9 (Okara 500g – PP 1500g) representam as condições de secagem menos favoráveis, dado que apresentam maior quantidade de material úmido e conseqüentemente maior umidade para um tempo de secagem menor de 40 minutos. O experimento 7 (Okara 300g – PP 1500g) comportou-se de maneira contrária, representando condição de secagem mais favorável, dado que apresenta menor relação entre a quantidade de material úmido por quantidade de material inerte ($m_o/m_i=0,2$) e, conseqüentemente, uma menor umidade para um tempo de secagem menor de 40 minutos.

Na Figura 4.2 também são mostrados os experimentos 1, 2, 8 e 9. Para valores intermediários da relação m_o/m_i , pode-se observar que os resultados experimentais encontram entre os resultados dos experimentos 3 e 7.

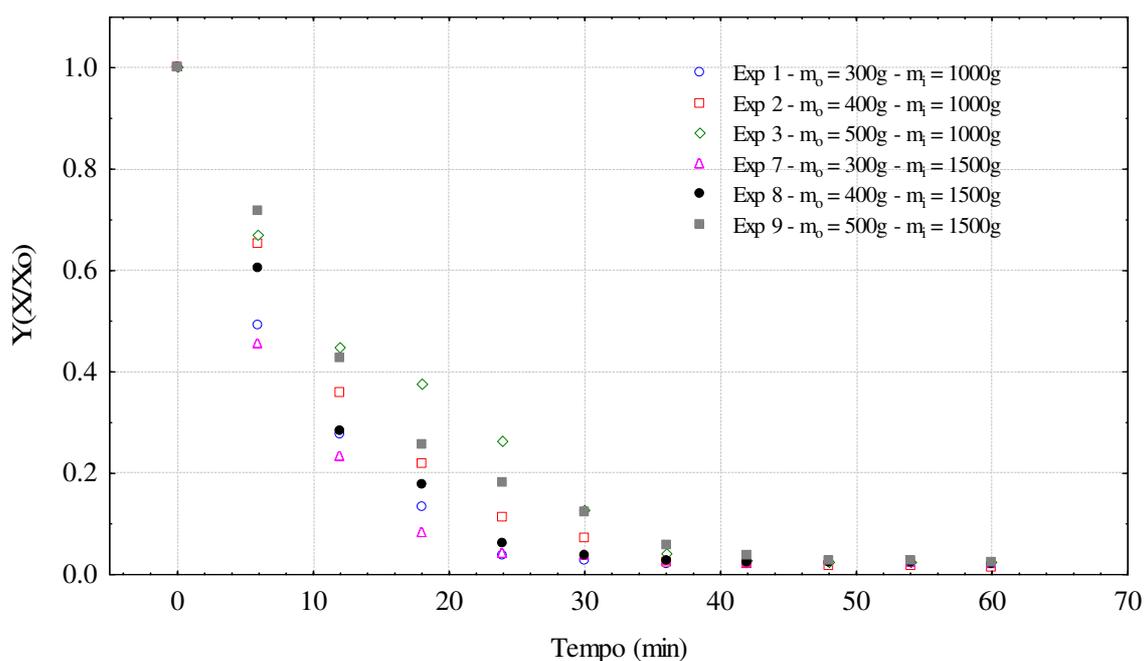


Figura 4.2 – Cinéticas de secagem para os experimentos 1, 2, 3, 7, 8 e 9 para o secador de leito de jorro

O modelo matemático utilizado no ajuste da curva aos dados obtidos da cinética de secagem foi o modelo de Page, Equação (2.12), o qual foi o que forneceu o melhor ajuste da curva aos pontos.

Na Tabela 4.4, mostram-se os valores de A, k e n, assim como o valor do coeficiente de correlação R^2 de todos os experimentos apresentados na Tabela 4.3 ajustados ao modelo de Page. Pode-se afirmar que o comportamento das curvas de secagem foi bastante similar para todas as razões m_o/m_i e, portanto, para fins de estudar, analisar e conduzir os experimentos de secagem em leito de jorro optou-se por utilizar a maior capacidade deste planejamento, representado pelo experimento 9 (Okara 500g – PP 1500g) e $m_o/m_i=0,33$, dado que este apresenta melhor fluidodinâmica entre os experimentos com maiores quantidades de material úmido. Salienta-se que este experimento também apresentou um bom ajuste ao modelo cinético, com um valor de R muito próximo da unidade (0,9988). A umidade de equilíbrio de aproximadamente 2-3% (b.u) foi atingida entre aproximadamente 42 e 48 minutos, como para as outras razões de m_o/m_i analisadas.

Tabela 4.4 – Parâmetros do modelo de Page

Experimental	A	k.1000 (s ⁻¹)	n	R ²
1	0,9990	0,1195	0,9789	0,9987
2	1,0024	0,0578	1,1404	0,9995
3	0,9887	0,0519	1,0667	0,9944
4	1,0000	0,0719	1,1300	0,9991
5	1,0009	0,0425	1,2396	0,9993
6	1,0052	0,0319	1,2491	0,9991
7	1,0006	0,1475	0,9389	0,9983
8	1,0029	0,0690	1,1388	0,9983
9	1,0066	0,0511	1,1145	0,9988

4.3.3 Cinética de secagem para o secador de leito de jorro

Após a definição da relação entre a quantidade de material úmido e quantidade de material inerte ($m_o/m_i=0,33$) colocado no leito e da metodologia de secagem apresentada no item 3.4.1.3, cujas variáveis estudadas foram temperatura do ar de entrada, relação entre a vazão de ar de entrada e vazão de jorro mínimo e tempo de trituração do material úmido, foram realizados todos os experimentos segundo o planejamento experimental da Tabela 3.3.

A Tabela 4.5 mostra os resultados da cinética de secagem para um experimento no ponto central (experimento 9 da Tabela 3.3). Pode-se observar que o secador de leito de

jorro mostrou-se adequado à secagem do Okara, pois em um intervalo de 44 minutos, o conteúdo de umidade variou de 63% (b.u.) para 7% (b.u.).

Tabela 4.5 - Cinética de secagem para o experimento 9

Tempo (min)	Xbu (%)	Xbs (kg/kg)	Y (X/Xo)
0	63,21	171,82	1,000
4	54,84	121,43	0,707
8	48,47	94,06	0,547
12	39,14	64,31	0,374
16	32,84	48,91	0,285
20	25,60	34,41	0,200
24	17,82	21,69	0,126
28	11,66	13,20	0,077
32	9,77	10,83	0,063
36	8,92	9,79	0,057
40	7,00	7,52	0,044
44	7,01	7,53	0,044

Na Figura 4.3 são apresentadas as curvas de secagem dos experimentos 9, 10 e 11, correspondentes ao ponto central do planejamento (mesmas condições). Pode-se observar pelos resultados que houve uma boa reprodutibilidade do processo.

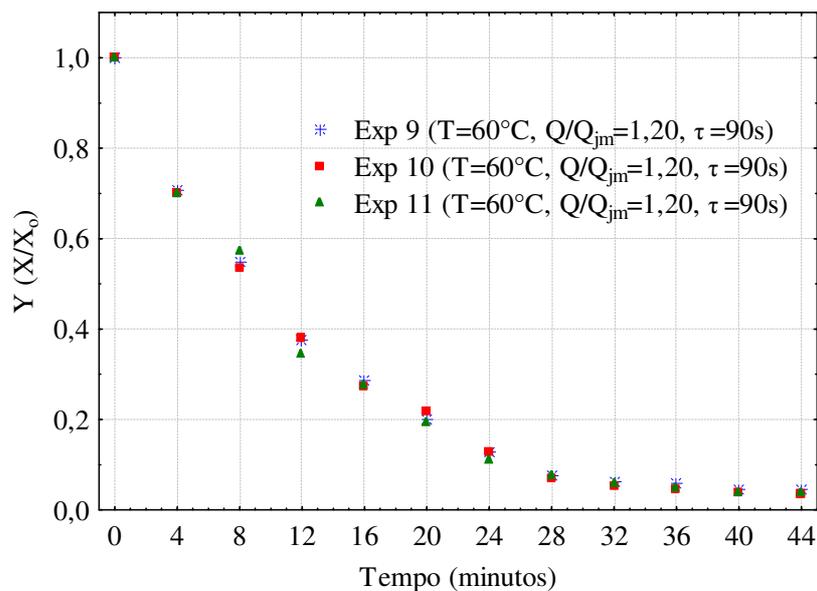


Figura 4.3 - Curvas de secagem no ponto central para o secador de leito de jorro

Na Figura 4.4 estão representadas as curvas de secagem dos experimentos 12 e 13, onde as variáveis Q/Q_{jm} e o tempo de trituração se mantiveram constantes, mas as temperaturas utilizadas foram respectivamente, 43°C e 77°C. Pode-se observar que a variável temperatura apresenta influência na cinética de secagem do Okara.

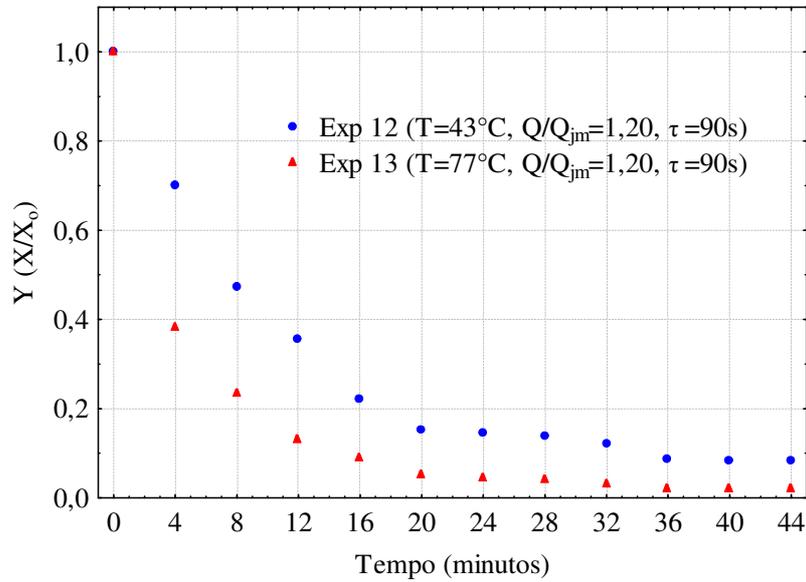


Figura 4.4 - Influência da temperatura nas curvas de secagem (experimentos 12 e 13) para o secador do leito de jorro

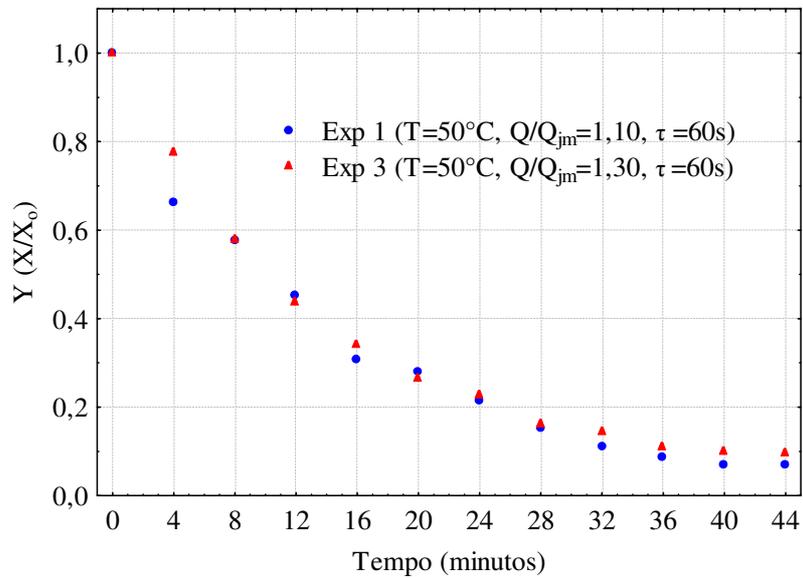


Figura 4.5 - Influência da vazão de ar nas curvas de secagem (experimentos 1 e 3) para o secador do leito de jorro

Na Figura 4.5 estão representadas as curvas de secagem dos experimentos 1 e 3, onde as variáveis temperatura e tempo de trituração se mantiveram constantes. Escolheram-se experimentos a baixa temperatura de secagem (50°C), para evidenciar o comportamento da variável Q/Q_{jm} , a qual variou de 1,1 para 1,3. Pode-se observar que as curvas apresentaram pequena diferença apenas nos primeiros minutos da secagem, onde esta ocorreu à taxa constante. Observou-se que para um maior valor de Q/Q_{jm} tem-se uma menor eficiência da secagem. No próximo período, aconteceu o contrário e o que era de se esperar, onde para maiores valores de Q/Q_{jm} têm-se maiores eficiências da secagem. Entretanto, a variação da umidade final foi muito pequena, o que leva a concluir, ainda sem a aplicação de métodos estatísticos, que a influência da Q/Q_{jm} não é significativa.

Na Figura 4.6 estão representadas as curvas de secagem dos experimentos 16 e 17, onde as variáveis temperatura e Q/Q_{jm} foram mantidas constantes e o tempo de trituração variou de 40 segundos para 140 segundos. Pode-se observar que nos primeiros minutos, quando a taxa de secagem é constante, a secagem se realiza de forma mais eficiente para as partículas maiores (menor tempo de trituração). Com alto teor de umidade de superfície, as partículas menores se aglomeram com maior facilidade que as partículas maiores.

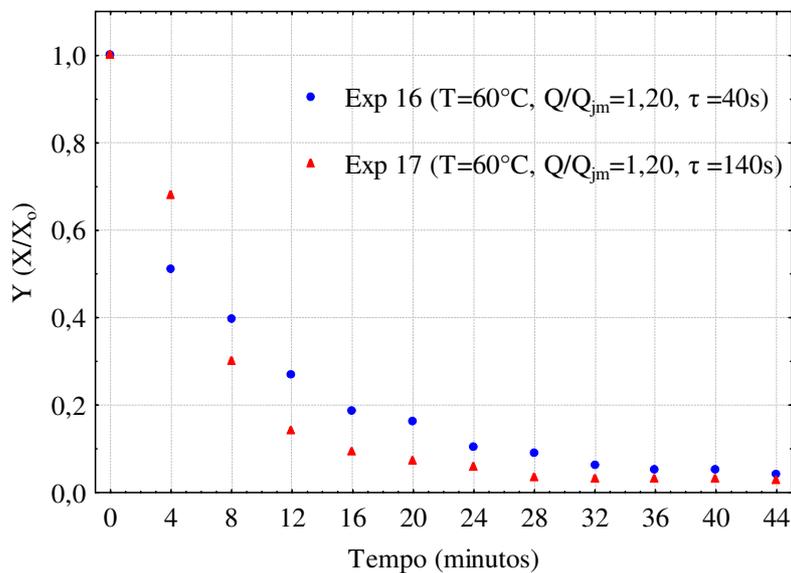


Figura 4.6 - Influência do tempo de trituração nas curvas de secagem (experimento 16 e experimento 17) para o secador de leito de jorro

Quando a secagem passa a ser difusiva, com ausência de umidade na superfície, não há mais a formação de pontes líquidas e as partículas menores deixam de se aglomerar;

ainda, devido ao atrito e aos choques com as paredes do secador e com o material inerte, os aglomerados se desintegram e a secagem torna-se mais efetiva para partículas menores (maior tempo de trituração). Esse comportamento explica a inversão de comportamento para os diferentes tempos de trituração nas regiões de secagem à taxa constante e decrescente (com o cruzamento das curvas na Figura 4.6).

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados dos valores de k (constante de difusividade – s^{-1}) e n (parâmetro adimensional) do ajuste ao modelo de Page Modificado apresentado na Equação (2.13). Os valores de R^2 , obtidos por regressão não linear dos dados das curvas de secagem ajustados ao modelo, utilizando-se o programa *Statistica*[®], teve uma variação de 0,989 até 0,999, o que significa que os valores experimentais se ajustaram bem ao modelo. Nesta mesma tabela são apresentados também os valores de umidade obtida como resposta para o tempo de 40 minutos após o início da secagem.

Tabela 4.6 – Variáveis e respostas do planejamento para o secador de leito de jorro.

Experimento	Variáveis			Respostas		
	T (°C)	Q/Q _{im}	τ (s)	$k \times 10^3$ (s^{-1})	n	X% (b.s)
1	50	1,10	60	1,182	0,876	14,77
2	70	1,10	60	2,335	0,776	6,36
3	50	1,30	60	1,087	0,925	14,99
4	70	1,30	60	1,825	0,844	7,13
5	50	1,10	120	0,746	1,227	23,80
6	70	1,10	120	1,442	1,041	5,88
7	50	1,30	120	1,272	0,818	15,69
8	70	1,30	120	2,017	0,885	5,83
9	60	1,20	90	1,351	1,018	7,52
10	60	1,20	90	1,370	1,013	7,23
11	60	1,20	90	1,372	1,045	8,06
12	43	1,20	90	1,460	0,845	20,60
13	77	1,20	90	3,884	0,653	6,28
14	60	1,03	90	2,792	0,714	7,93
15	60	1,37	90	2,716	0,671	7,33
16	60	1,20	40	2,114	0,686	11,92
17	60	1,20	140	2,205	1,262	8,27

Analisando-se os experimentos do planejamento completo, pode-se concluir que o experimento 5, com menor valor de k ($0,0007462s^{-1}$) foi portanto o que apresentou menor eficiência, ou seja, a maior umidade para um tempo de secagem de 40 minutos (23,8% b.s.). Isto se deve aos baixos valores de temperatura do ar de secagem ($50^{\circ}C$) e da razão Q/Q_{jm} (1,1); nessas condições, possivelmente não ocorreu a separação de partículas aglomeradas nos primeiros minutos do processo, já que, pelo tempo de trituração maior (120 segundos), as partículas são pequenas, favorecendo a aglomeração. As partículas tendem a ficar aglomeradas quando as outras duas variáveis encontram-se nas condições inferiores, o que dificulta a secagem das mesmas. O experimento que apresentou menor teor de umidade para o tempo de secagem de 40 minutos (5,83% b.s.) foi o experimento 8, com valor de k igual a $0,002017s^{-1}$. Nesse ensaio, a temperatura maior ($70^{\circ}C$) e o valor de Q/Q_{jm} maior (1,3) permitiram que ocorresse a separação de partículas aglomeradas de forma mais eficiente, mesmo utilizando-se o tempo de trituração maior, resultando em uma secagem difusiva mais rápida, após o período de taxa constante que ocorre no início do processo. O valor do parâmetro k não foi o maior nesse ensaio, já que houve também interferência do parâmetro n no valor do teor de umidade do material.

O experimento 13 apresentou o maior valor da constante de difusividade ($0,003884s^{-1}$), o que era esperado, já que, analisando-se as Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, a variável que se apresentou como a mais significativa foi a temperatura do ar. Neste ponto axial o valor da temperatura ($77^{\circ}C$) foi o maior de todo o planejamento. Pode-se observar também que o experimento 5 apresentou o menor valor de k ($0,0007462s^{-1}$), o que confirma a importante influência da variável temperatura do ar na secagem.

Todos os experimentos apresentaram um bom ajuste ao modelo de Page modificado, sendo o valor médio de R^2 igual a 0,998.

Para a resposta n , que representa a influência dos fatores externos no modelo de Page (portanto, relacionado ao período de taxa constante), pode-se observar que os maiores valores foram obtidos nos ensaios com maior tempo de trituração do grão e, em consequência, menores diâmetros das partículas. Maiores valores de n indicam uma maior concavidade na curva de secagem, característica devida ao fato de que, inicialmente para partículas com diâmetros maiores, ocorre maior redução de umidade que para partículas com diâmetros menores.

4.3.4 Resultado do planejamento experimental para o secador de leito de jorro

Na análise estatística do planejamento experimental no secador de leito jorro, foram determinados os coeficientes significativos e realizadas as análises de variância para as variáveis reais e codificadas. Isto foi feito tanto para o planejamento completo 2^3 (11 experimentos), como para o planejamento 2^3 com os pontos axiais (17 experimentos). Para um melhor entendimento dos resultados as análises estatísticas são apresentadas separadamente para cada resposta e apenas os modelos reais são mostrados para as variáveis.

4.3.4.1 Análise estatística para a constante de difusividade k

O modelo matemático para prever o valor da constante de difusividade k no planejamento completo real e codificado com pontos axiais não foi validado pela análise de variância, apresentando um F tabelado maior que o F calculado. Portanto, foi elaborada a análise estatística para as variáveis reais do planejamento completo 2^3 , sem pontos axiais, com coeficiente de correlação igual a 0,9697, dado que este apresentou um modelo preditivo, sendo que o F calculado foi maior que o F tabelado. Isto pode ter acontecido por ter alguma faixa de variáveis muito grandes o que leva ao modelo a se ajustar de forma não significativa.

Na Tabela 4.7 são apresentados os valores dos coeficientes significativos, para análise de regressão baseada no erro puro e para um intervalo de confiança de 95%. De acordo com os resultados da Tabela 4.7, todas as variáveis e as interações foram significativas, dado que apresentaram um valor de $p < 0,05$.

Tabela 4.7 – Coeficientes de regressão significativos para k

Termo / Interação	Coefficiente de regressão	Desvio Padrão	$t(2)$	p
Media	1,454	0,0036	407,62	0,00001
(1) Temperatura do ar (°C)	0,833	0,0084	99,51	0,00010
(2) Q/Q_{jm}	0,124	0,0084	14,78	0,00454
(3) Tempo de trituração (s)	-0,238	0,0084	-28,43	0,00123
1 x 2	-0,091	0,0084	-10,93	0,00827
1 x 3	-0,112	0,0084	-13,44	0,00549
2 x 3	0,426	0,0084	50,95	0,00038

A Equação 4.1 apresenta o modelo estatístico ajustado para o coeficiente de difusividade k.

$$k \cdot 10^3 [s^{-1}] = 1,454 + 0,833(T) + 0,124(Q/Q_{jm}) - 0,238(\tau) - 0,091(T \cdot Q/Q_{jm}) - 0,112(T \cdot \tau) + 0,426(Q/Q_{jm} \cdot \tau) \quad (4.1)$$

Nessa correlação, a temperatura deve ser utilizada em °C e o tempo de trituração em s, para obter o valor de k em s⁻¹.

A variável temperatura do ar foi a que se mostrou mais significativa, como era de se esperar pelo valor de t(2) mostrado na Tabela 4.7. Essa observação pode ser confirmada ainda observando-se o diagrama de Pareto da Figura 4.7.

No diagrama de Pareto da Figura 4.7 mostra-se que a temperatura do ar apresentou o maior efeito, o tempo de trituração gerou o maior efeito negativo e a razão Q/Q_{jm} foi a variável menos significativa para a resposta constante de difusividade (k). A interação de Q/Q_{jm} e tempo de trituração foi mais significativa que as variáveis Q/Q_{jm} e tempo de trituração isoladas, o que está de acordo com a discussão já realizada, onde as partículas com granulometria menor tendem a se aglomerar no início o que dificulta a secagem, de outro modo partículas com granulometria maior pela movimentação e atrito das partícula inerte a força de aglomeração é menor e portanto a secagem mais eficiente.

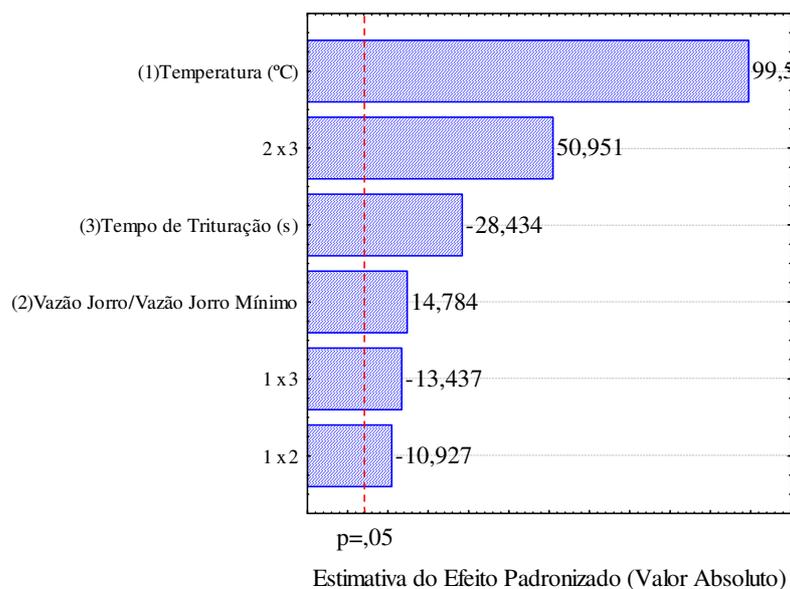


Figura 4.7 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para k

Na Tabela 4.8, mostra-se a análise de variância para o planejamento completo 2^3 do modelo real, baseada no erro puro, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.8 - Análise de variância para a resposta k

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F Calculado	F Tabelaado
Regressão	1,9360	6	0,3227	21,31	6,16
Resíduos	0,0606	4	0,0151		
Falta de ajuste	0,0603	2	0,0301		
Erro Puro	0,0003	2	0,0001		
Total	1,9966	10	0,1997		

Os resultados da Tabela 4.8 mostram que o modelo é completamente preditivo, pois o F calculado pela análise de variância é maior que o F tabelado. Nas Figuras 4.8 e 4.9 mostram-se as diferentes superfícies de resposta geradas com o modelo comparando a variável temperatura do ar com as outras duas variáveis isoladas menos significativas.

De acordo com Figura 4.8, a constante de difusividade k aumenta com o aumento da temperatura do ar e é praticamente indiferente à variação de Q/Q_{jm} .

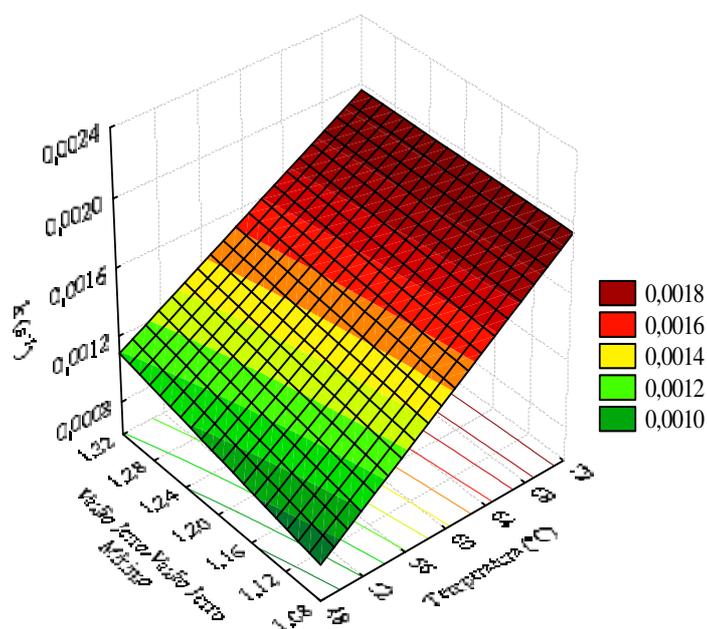


Figura 4.8 - Superfície de resposta para k em função da temperatura do ar e Q/Q_{jm}

De acordo com Figura 4.9, a constante de difusividade k aumenta com o aumento da temperatura do ar e a diminuição do tempo de trituração.

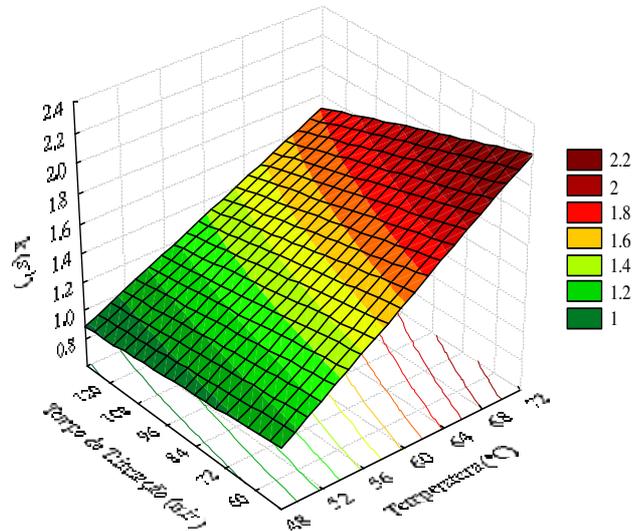


Figura 4.9 - Superfície de resposta para k em função da temperatura do ar e tempo de trituração

As Figuras 4.8 e 4.9 confirmam os resultados obtidos na Figura 4.7, onde a variável temperatura do ar se mostrou mais significativa que as outras.

A Figura 4.10 confirma os valores encontrados na análise de variância, onde os valores preditos pelo modelo se aproximam bem dos valores experimentais.

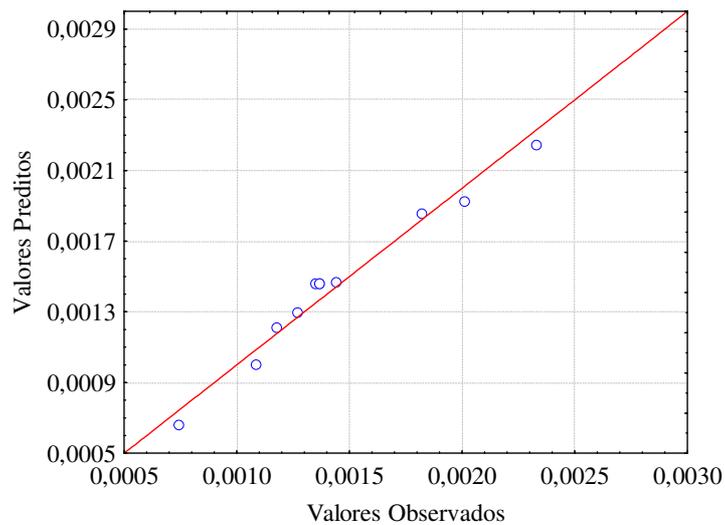


Figura 4.10 - Valores preditos e experimentais para o valor de k

4.3.4.2 Análise estatística para o parâmetro do modelo de Page modificado n

As análises estatísticas para o valor de n foram realizadas de forma análoga às realizadas para a resposta k, embora estas tenham sido feitas para o planejamento completo com pontos axiais.

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores dos coeficientes significativos, para análise de regressão baseada no erro puro e para um intervalo de confiança de 95% para as variáveis que foram significativas e apresentaram um valor de $P < 0,05$. Tanto a variável tempo de trituração, quadrática, como a interação desta com a variável temperatura, não foram significativas, pois apresentaram um valor de $p > 0,05$.

Tabela 4.9 – Coeficientes de regressão significativos para n

Termo / Interação	Coefficiente de regressão	Desvio Padrão	t(2)	p
Media	1,032	0,0075	137,20	0,00005
(1) Temperatura do ar (°C)	-0,091	0,0094	-9,66	0,01055
Temperatura do ar (°C) (Q)	-0,142	0,0097	-14,62	0,00464
(2) Q/Q _{jm}	-0,076	0,0094	-8,07	0,01499
Q/Q _{jm} (Q)	-0,185	0,0099	-18,57	0,00289
(3) Tempo de Trituração (min)	0,223	0,0095	23,56	0,00180
1 x 2	0,068	0,0123	5,53	0,03114
2 x 3	-0,170	0,0123	-13,84	0,00518

Para a resposta da constante do modelo de Page (n), o diagrama de Pareto da Figura 4.11 mostra que a variável tempo de trituração apresentou maior efeito entre todas as variáveis isoladas. A variável razão Q/Q_{jm} quadrática gerou o maior efeito negativo e a variável razão Q/Q_{jm} foi a variável isolada menos significativa. A interação de temperatura do ar e Q/Q_{jm} foi a menos significativa.

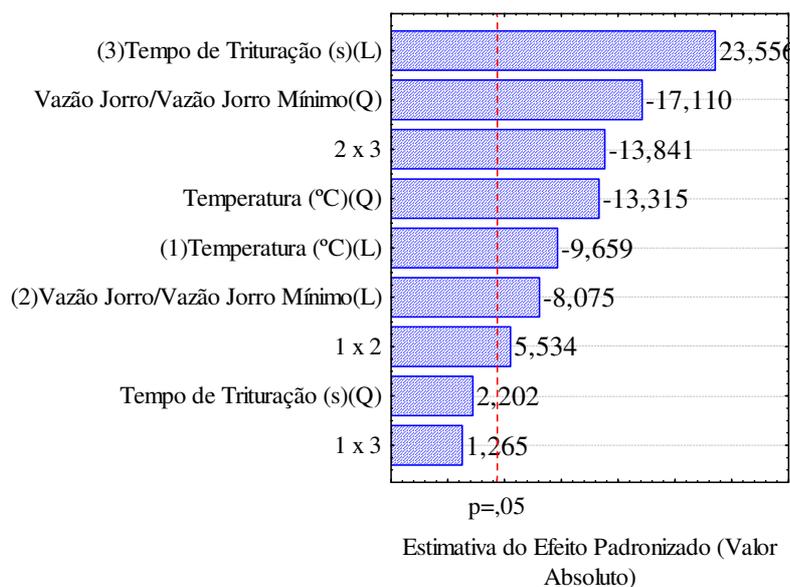


Figura 4.11 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para n

A Equação 4.2 apresenta o modelo estatístico ajustado para a resposta analisada, constante do modelo de Page, n.

$$n = 1,032 - 0,091(T) - 0,142(T)^2 - 0,076(Q/Q_{jm}) - 0,185(Q/Q_{jm})^2 + 0,223(\tau) + 0,068(T \cdot (Q/Q_{jm})) - 0,170((Q/Q_{jm}) \cdot \tau) \quad (4.2)$$

Nessa correlação, a temperatura deve ser utilizada em °C e o tempo de trituração em segundos.

Na Tabela 4.10, mostra-se a análise de variância para o planejamento completo 2^3 com pontos axiais do modelo real, baseada no erro puro, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.10 - Análise de variância para a resposta n

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado
Regressão	0,4224	7	0,0603	5,10	3,29
Resíduos	0,1065	9	0,0118		
Falta de ajuste	0,1059	7	0,0151		
Erro Puro	0,0006	2	0,0003		
Total	0,5289	16	0,0331		

Os resultados da Tabela 4.10 mostram que o modelo é preditivo, pois o F calculado pela análise de variância é maior que o F tabelado. Nas Figuras 4.12 e 4.13 mostram-se as diferentes superfícies de resposta geradas com o modelo comparando a variável tempo de trituração com as outras duas variáveis isoladas menos significativas.

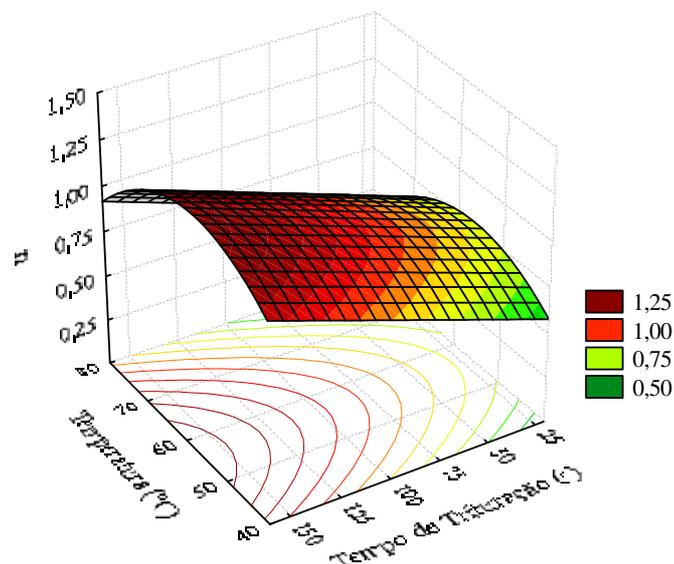


Figura 4.12 - Superfície de resposta para n em função do tempo de trituração e temperatura do ar

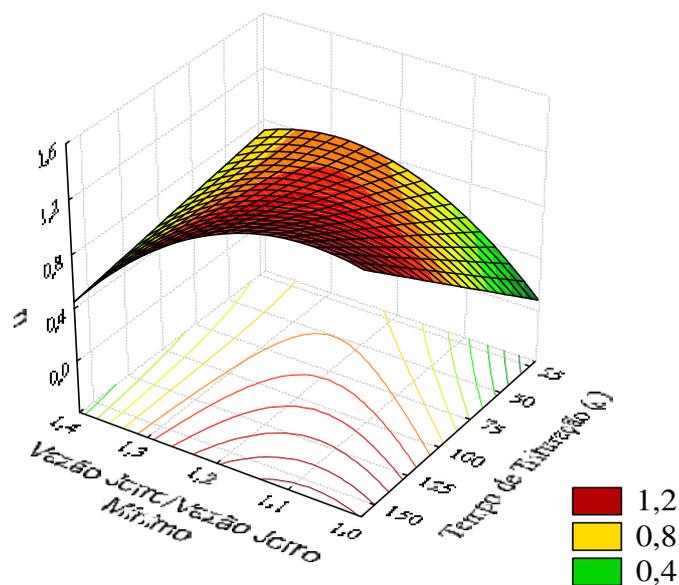


Figura 4.13 - Superfície de resposta para n em função do tempo de trituração e Q/Q_{jm}

De acordo com as Figuras 4.12 e 4.13, a constante do modelo de Page (n) aumenta com o aumento do tempo de trituração e é praticamente indiferente à temperatura do ar e à razão Q/Q_{jm} .

As Figuras 4.12 e 4.13 confirmam os resultados obtidos na Figura 4.11, onde a variável tempo de trituração se mostrou mais significativa que as outras duas. Isto corrobora o que foi previsto antes da análise estatística, com relação à influência do tempo de trituração no parâmetro n , que, de acordo com o modelo de Page é relacionado às condições externas ao processo de secagem. Um tempo de trituração menor faz com que a partículas de Okara apresentem uma secagem mais rápida no período inicial.

A Figura 4.14 confirma os valores encontrados na análise de variância, onde os valores preditos pelo modelo se aproximam bem dos valores experimentais, entretanto, havendo neste caso mais dispersão que no caso anterior para a resposta de k .

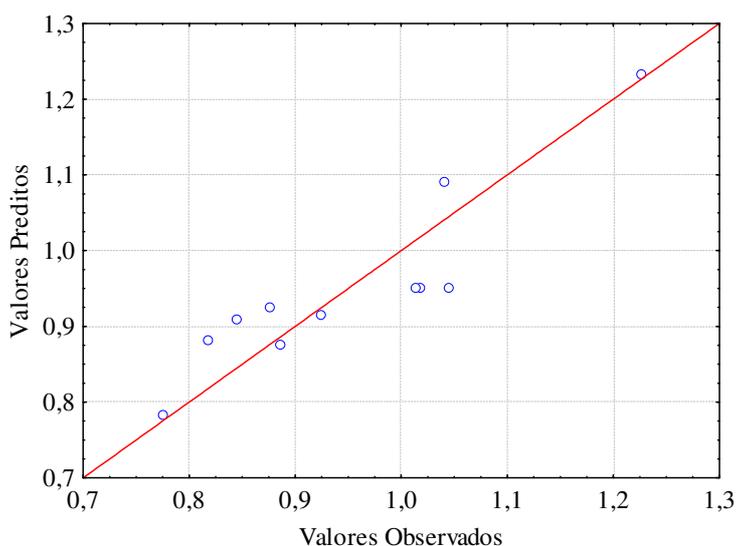


Figura 4.14 - Valores preditos e experimentais para o valor de n

4.3.4.3 Análise estatística para a umidade base seca, $X\%$ medida aos 40 minutos do processo de secagem

Para a resposta umidade final percentual, em base seca, o modelo validado foi o planejamento fatorial completo com pontos axiais. Apresenta-se a seguir a análise estatística contendo o modelo para as variáveis reais do planejamento supracitado, com coeficiente de correlação igual a $R^2=0,92648$.

Na Tabela 4.11 são apresentados os valores dos coeficientes significativos, para análise de regressão baseada no erro puro e para um intervalo de confiança de 95%. Através desta tabela, nota-se que, excetuando-se a influência linear do tempo de trituração e a influência quadrática de Q/Q_{jm} , todas as variáveis foram significativas, apresentando valor de $p < 0,05$.

Tabela 4.11 - Coeficientes de regressão significativos para X%

Termo / Interação	Coeficiente de regressão	Desvio Padrão	t(2)	p
Media	7,897	0,1822	43,35	0,00053
(1) Temperatura do ar (°C)	-9,927	0,2269	-43,74	0,00052
Temperatura do ar (°C) (Q)	4,412	0,2352	18,76	0,00283
(2) Q/Q_{jm}	-1,189	0,2269	-5,24	0,03457
(3) Tempo de Trituração (min) (Q)	2,206	0,2436	9,06	0,01197
1 x 2	2,153	0,2979	7,23	0,01861
1 x 3	-2,878	0,2979	-9,66	0,01055
2 x 3	-2,288	0,2979	-7,68	0,01654

O modelo estatístico ajustado para essa resposta está transcrito na Equação 4.3:

$$\begin{aligned}
 X\% = & 7,897 - 9,927 (T) + 4,412 (T)^2 - 1,189(Q/Q_{jm}) \\
 & + 2,206(\tau) + 2,153(T \cdot (Q/Q_{jm})) - 2,878(T \cdot \tau) - 2,288((Q/Q_{jm}) \cdot \tau)
 \end{aligned}
 \quad (4.3)$$

Nessa correlação, a temperatura deve ser utilizada em °C e o tempo de trituração em segundos.

Na Figura 4.15 mostra-se que a variável que apresenta maior efeito negativo foi a temperatura do ar (linear), seguida pelo efeito quadrático da própria variável, que apresentou maior efeito positivo. A interação entre a temperatura do ar e o tempo de trituração foi o segundo maior efeito negativo, assim como o tempo de trituração, que apresentou o segundo maior efeito positivo.

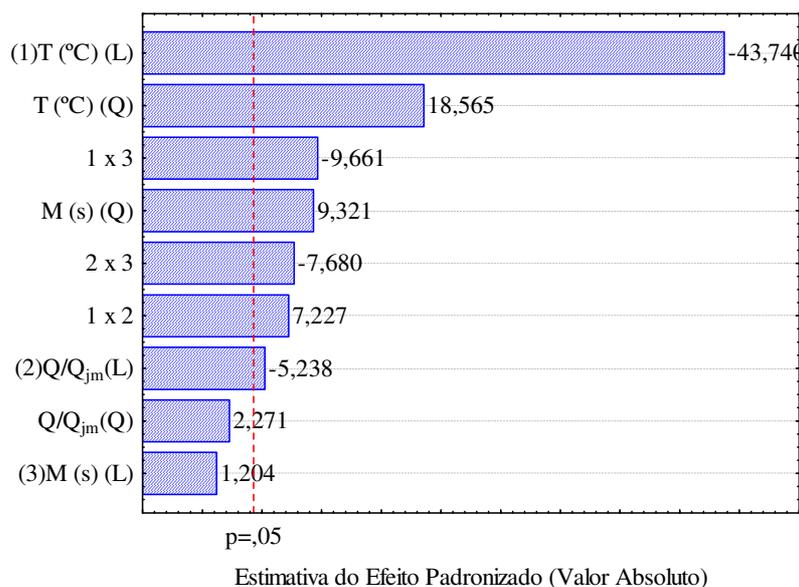


Figura 4.15 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para X%

Na mesma figura, ainda, observa-se que, como mostrado na tabela de coeficientes significativos (Tabela 4.11), as outras duas interações e o efeito linear de Q/Q_{jm} apresentarem menores efeitos dentre as variáveis significativas, e que as únicas variáveis não significativas foram a influência quadrática da variável Q/Q_{jm} e o tempo de trituração.

Na Tabela 4.12, mostra-se a análise de variância para X% (b.s.), para um intervalo de confiança de 95%. O F calculado para este planejamento foi cerca de cinco vezes maior do que o F tabelado, o que valida o modelo obtido para X% (b.s.).

Tabela 4.12 - Análise de variância para a resposta X%

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado
Regressão	447,2908	7	63,8987	16,20	3,29
Resíduos	35,4966	9	3,9441		
Falta de ajuste	35,1418	7	5,0203		
Erro Puro	0,3549	2	0,1774		
Total	482,7874	16	30,1742		

Na Figura 4.16, mostra-se a superfície de resposta gerada com o modelo descrito, comparando a variável temperatura do ar com a variável vazão de jorro sobre vazão de jorro mínimo, uma vez que a variável temperatura mostrou maior significância que a

variável vazão de jorro/vazão de jorro mínimo. A interação destas duas variáveis mostra-se pouco significativa como pode ser visto que as linhas de curvas de contorno da superfície são praticamente lineares para temperatura do ar baixas e medias. Já na Figura 4.17, a superfície gerada compara as duas variáveis que, sozinhas, apresentaram maior efeito, ou seja, temperatura do ar de secagem e tempo de trituração.

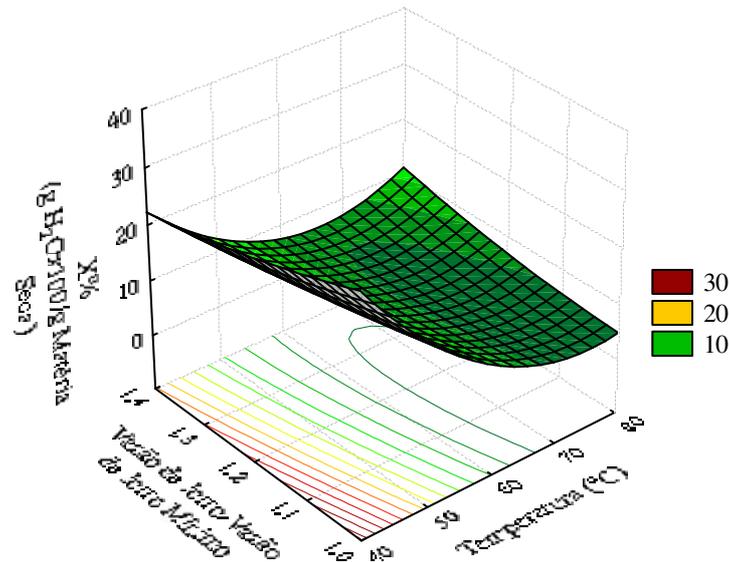


Figura 4.16 - Superfície de resposta para X% em função da temperatura do ar e Q/Q_{jm}

A Figura 4.16 mostra que, como esperado, o valor de X% varia mais à medida que a temperatura se modifica (variável de maior efeito), enquanto apresenta menor variação à medida que a razão entre a vazão e a vazão de jorro mínimo se altera. É possível também concluir que a umidade final percentual em base seca (X%) diminui com o aumento da temperatura, o que é lógico considerando que temperaturas maiores eliminam mais facilmente a água livre do Okara. Percebe-se também que quanto mais próxima da vazão de jorro mínimo a vazão utilizada encontra-se, maior é a umidade final.

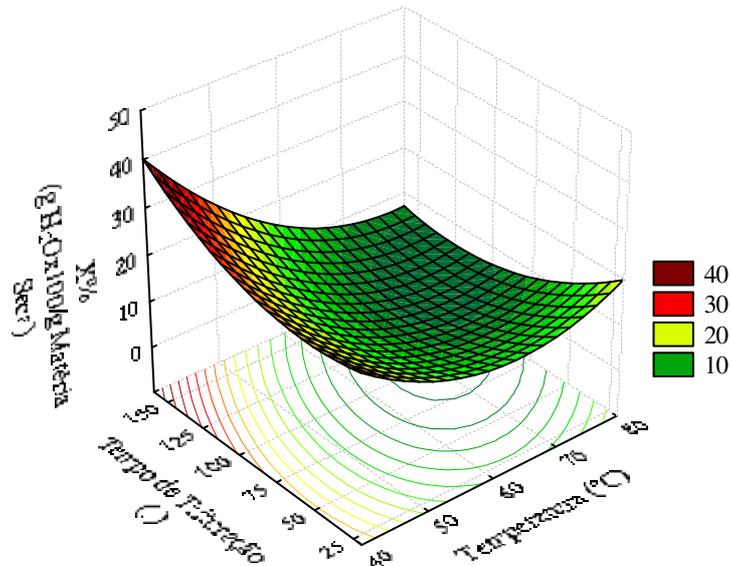


Figura 4.17 - Superfície de resposta para X% em função da temperatura do ar e tempo de trituração

A Figura 4.17 mostra, por sua vez, que a variável mais influente ainda é a temperatura do ar de secagem e que, como avaliado na Figura anterior, maiores temperaturas apresentam menores umidades finais em base seca.

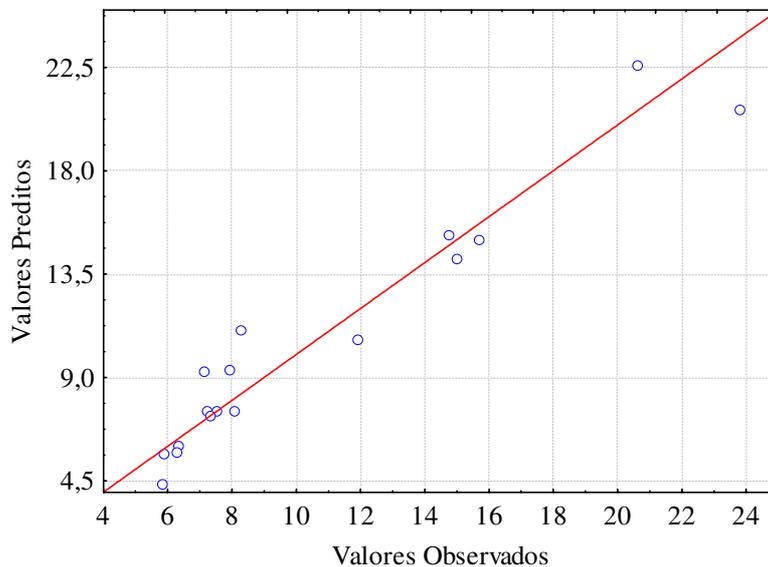


Figura 4.18 - Valores preditos e experimentais para o valor de X%

A Figura 4.18 confirma os valores encontrados na análise de variância, onde os valores preditos pelo modelo se aproximam bem dos valores experimentais. Alguns pontos

apresentam uma pequena dispersão em relação ao eixo diagonal, porém, de maneira geral, o diagrama apresentado valida a consideração de que o modelo matemático obtido é preditivo.

Finalmente, comparando as variáveis significativas do planejamento experimental para a constante de difusividade k , e para a umidade final base seca para um tempo de secagem de 40 minutos, pode-se afirmar que a variável temperatura do ar mostra-se muito significativa comparada com as variáveis Q/Q_{jm} e tempo de trituração. Que o tempo de trituração mostra-se como segunda variável significativa e que a variável Q/Q_{jm} (linear), não é significativa para nenhuma das duas respostas.

Pensando em trabalhos futuros em leito de jorro e na possibilidade de aplicar microondas em determinado momento do processo da secagem neste equipamento, quando a secagem passa de taxa constante para taxa decrescente, foi determinado o gráfico de $dX\%/dt$ vs $X\%$. Pode-se observar na Figura 4.19 que, para o experimento 9 (ponto central) para uma umidade $X\%=41(\text{kg/kg})$ umidade equivalente para um tempo de aproximadamente 17 minutos, a taxa de secagem passa de constante para decrescente. A partir deste momento justifica-se a aplicação das microondas.

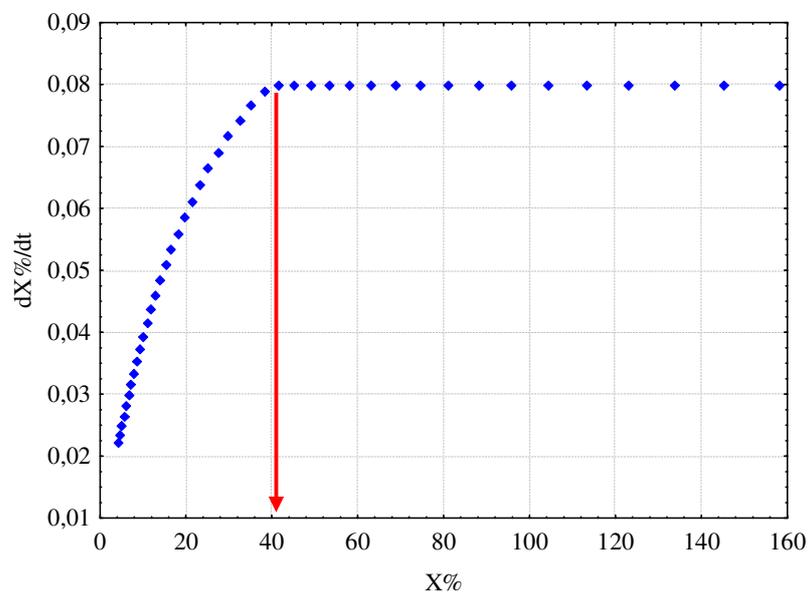


Figura 4.19 – Gráfico de taxa constante e taxa decrescente para o experimento 9

4.3.5 Caracterização do Okara seco em leito de jorro

O Okara seco excluindo os finos arrastados para o ciclone apresentou aspecto visível de farinha seca, com partículas amorfas e de coloração castanho claro como mostra a Figura 4.20.



Figura 4.20 - Okara seco em leito de jorro

Os resultados obtidos na caracterização do Okara após o processo de secagem encontram-se na Tabela 4.13. As partículas analisadas foram as obtidas dos experimentos 1 ($T=50^{\circ}\text{C}$; $Q/Q_{jm}=1,1$; $\tau=60\text{s}$), 8 ($T=70^{\circ}\text{C}$; $Q/Q_{jm}=1,3$; $\tau=120\text{s}$) e 9 ($T=60^{\circ}\text{C}$; $Q/Q_{jm}=1,2$; $\tau=90\text{s}$) do planejamento experimental, os quais representam os pontos extremos e central do planejamento experimental.

Também foram analisadas as partículas referentes ao experimento 5 que, de acordo com os resultados estatísticos, foi a condição operacional de secagem que apresentou o resultado de maior umidade final do material.

O diâmetro médio do material após a secagem se mostra relacionado tanto ao tempo de trituração quanto à razão Q/Q_{jm} . Um tempo de trituração maior proporciona menor diâmetro da partícula, enquanto que uma vazão de ar alta proporciona a elutriação das partículas mais finas, resultando em maior diâmetro médio. Segundo GRANTGES (1981) estas partículas de Okara secas em leito de jorro com diâmetro médio entre $149\mu\text{m}$ e $3,18\text{mm}$ são classificadas como granulares. Pode-se observar que os experimentos 1 e 8 resultaram em um diâmetro de partícula de Okara seco praticamente igual. Isto se deve, possivelmente ao fato de que, para o experimento 8, os valores de temperatura, Q/Q_{jm} e

tempos de trituração são maiores, o que leva a tempo de secagem menor, mas com maiores quantidades de material elutriado (finos para o ciclone). Esta massa não é considerada na análise granulométrica, o que pode ter contribuído para aumentar o diâmetro médio do material seco dentro do leite.

Tabela 4.13 - Caracterização física do Okara seco em leite de jorro

Experimento	1	5	9	8
Temperatura (°C)	50	50	60	70
Q/Qjm	1,1	1,1	1,2	1,3
Tempo de trituração (s)	60	120	90	120
Diâmetro médio (mm)	0,93	0,74	0,86	0,93
Umidade final (% b.u)	9,7±2,4	12,2±1,8	8,4±1,4	4,0±1,1
Desvio padrão(±%)				
Índice de escoabilidade (mm)	10	12	12	9
Ângulo de repouso (°)	46,74	45,12	45,16	43,58
Densidade volumétrica (g.mL ⁻¹)	0,472±0,008	0,456±0,005	0,452±0,005	0,446±0,003
Desvio padrão (±g.mL ⁻¹)				
Densidade absoluta (g.mL ⁻¹)	1,220±0,001	1,250±0,001	1,224±0,002	1,218±0,002
Desvio padrão (± g.mL ⁻¹)				
Densidade aparente (g.mL ⁻¹)	1,071	1,049	1,037	0,999
Porosidade (%)	12,22	16,02	15,30	18,00
Circularidade (%)	64±3	64±9	67±2	68±2
Desvio padrão (±%)				

O índice de escoabilidade mostrou ser menor para partículas maiores e com menor teor de umidade, confirmando as análises prévias das cinéticas de secagem, as quais indicaram melhor performance para a secagem conduzida com partículas maiores, ou seja, que geraram melhor regime fluidodinâmico.

O ângulo de repouso e a densidade volumétrica (*bulk*) apresentaram pequena variação com as condições experimentais, mostrando uma pequena tendência de diminuir com o aumento da intensidade das variáveis operacionais. O ângulo de repouso foi menor para maior temperatura e vazão do ar de entrada (experimento 8), logo, menor para menor umidade do material. O mesmo comportamento foi observado para a densidade aparente. De acordo com a classificação de GRANTGES (1981), os valores de ângulo de repouso obtidos está no limite entre materiais de escoamento Lento, ou seja, partículas com

ângulos de repouso entre 30° e 45° podem ser consideradas partículas de escoamento livre e partículas com ângulos de repouso maiores de 45° são consideradas partículas de escoamento lento.

Analisando-se os valores médios e os desvios padrão da densidade absoluta, verifica-se que os valores são praticamente os mesmos, como esperado, já que a estrutura do material é a mesma nas diferentes condições operacionais. A porosidade do produto seco encontra-se na faixa de 12 até 18% e não apresentou uma correlação com as condições de secagem.

Observa-se que a tendência da circularidade foi de aumentar com o aumento da razão Q/Q_{jm} , uma vez que uma vazão maior do ar de entrada promove a circulação das partículas no leito e atrito interpartículas, eliminando pontas e promovendo arredondamentos na forma destas.

4.3.6 Avaliação energética do secador de leito de jorro

Na Tabela 4.14, mostram-se os resultados da análise energética por unidade de tempo para os experimentos 1, 8 e 9. Estes experimentos foram escolhidos pois representam as condições extremas de secagem e o ponto central do planejamento completo 2^3 .

Para determinar a quantidade de massa de Okara úmido por unidade de tempo, determinou-se o valor referente à alimentação de 0,5 kg para ser seco em 44 min (batelada). Na Tabela 4.14 são apresentados os valores de massa de Okara úmido e das umidades finais, além dos parâmetros de energia.

Tabela 4.14 – Avaliação energética por unidade de tempo da secagem em leito de jorro

Experimento		1	8	9
$M_{ou} = M_{Okara\ inicial} \cdot 60/44$	Massa de okara Úmido (kg/h)	0,682	0,682	0,682
X%	Umidade final % (b.u.)	9,7	4,0	8,4
$W = M_{ou} \left(\frac{X_0 - X_f}{100 - X_f} \right)$	Água evaporada do Okara (kg/h)	0,418	0,433	0,421
Tev	Evaporação Volumétrica (g/m ³ .s)	9,572	9,932	9,658

a	Massa de ar usado /massa de água evaporada (-)	158,07	152,34	156,66
$H_w = W \cdot \lambda_{ev}$	Energia de evaporação da água do material (kW)	0,278	0,289	0,281
$E_{Okara} = \frac{V \cdot (H_{ex} - H_{aq})}{60 \cdot V_{esp}} E_{ar}$	Energia de água evaporada por unidade de tempo (kW)	0,278	0,289	0,281
$(*) E_{Okara} = \frac{M_{total} C_{p_o} (T_{aq} - T_{aa})}{4}$	Energia consumida p/ aquecer o Okara (kW)	0,0119	0,0222	0,0142
$(**) E_{Inerte} = \frac{3 M_{total} C_{p_i} (T_{aq} - T_{aa})}{4}$	Energia consumida p/ aquecer o inerte (kW)	0,0158	0,0328	0,0202
$(***) ET = \left(\frac{E_{Okara} + H_w}{E_{aq}} \right) \times 100$	Eficiência Térmica (kW)	68,845	39,290	72,992
$E_e = \left(\frac{E_{aq}}{1000} \right) \times \left(\frac{3600}{A_2} \right)$	Consumo energético Específico (MJ/kg de água) p/ (E + E _{Okara})	1,787	1,936	1,475

(*) O valor médio do calor específico foi calculado pelos valores teóricos de umidade final e inicial do Okara, usando a Equação (4.4) (EARLE, 1983):

(**) $C_{p_i} = 1.78 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, obtido de <http://www.matweb.com> (MatWeb – material property data: “Overview of materials for Polypropilene”).

(***) ET = Eficiência térmica definida Segundo EARLE, 1983.

$$C_p = 4,19 \cdot X/100 + 0,84 \cdot (100 - X)/100 \quad (4.4)$$

A quantidade de água evaporada por unidade de tempo foi maior para o experimento 8 e menor para o experimento 1, dado que a umidade final do experimento 8 foi menor que a do experimento 1.

Foi determinada também a taxa de evaporação volumétrica do processo, utilizando o volume total da câmara de secagem. Mostra-se que o valor da taxas de evaporação não diferem significativamente, mas observa-se que esta taxa é maior para condições de secagem onde a resposta de umidade final foi menor, assim como menor para condições de secagem onde a resposta de umidade final foi maior. Comparando estes resultados com os apresentados por MARKOWSKI (1992), com taxas entre 12g/m³.s até 140g/m³.s, a secagem realizada neste trabalho apresentou menores taxas de evaporação. O parâmetro a

(Massa de ar usado /massa de água evaporada) aparentemente não tem diferença significativa, sabendo que para condições de secagem com respostas de umidade final menor precisa-se de menores quantidades de ar seco.

Foram calculados os valores dos parâmetros energéticos para determinar os valores de eficiência térmica (ET) e consumo energético específico (E_{esp}). Pode-se concluir que as variáveis estudadas no processo de secagem têm uma influência significativa, dado que o valor de eficiência térmica tem faixa de variação de aproximadamente 40%. O gasto energético no trabalho apresentado por MARKOWSKI (1992) foi na faixa de $8,4 \pm 4,5$ MJ/kg de água, e portanto, maior que a encontrada neste trabalho, que teve uma média aproximada de 1,7 MJ/kg de água.

Confirma-se assim, a viabilidade da utilização do leito de jorro para a obtenção de Okara seco em forma de farinha, para temperaturas de ar de secagem entre 50 e 70°C, vazão de jorro/ vazão de jorro mínimo entre 1,1 e 1,3 e tempo de trituração da soja entre 60 e 120 segundos. Deve-se salientar que o leito acrílico não se encontra isolado termicamente, o que diminui a eficiência térmica do processo.

4.4 Secagem com aplicação de microondas

Nesta próxima etapa a secagem foi realizada em dois tipos de secadores. A primeira no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas (contínua) e a segunda em um secador de forno de microondas (batelada).

4.4.1 Secagem em cilindro rotativo com aplicação de microondas

Testes preliminares definiram o material inerte escolhido que foi o poliestireno. O poliestireno apresenta características físicas que permitem o acompanhamento do Okara na alimentação e dentro do secador. Após a definição da metodologia da secagem no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, foram realizados todos os experimentos segundo o planejamento experimental apresentado na Tabela 3.6. A resposta estudada para este planejamento experimental neste secador foi a umidade média final. O tempo de residência médio do material no secador foi de 40 minutos aproximadamente, este está diretamente relacionado com a vazão do ar o ângulo de inclinação e rotação do cilindro. As amostras foram coletadas e analisadas na saída do secador, após um tempo de secagem de 60 minutos até 130 minutos. Após os 130 minutos não foram mais coletadas amostras devido à capacidade do secador ser muito grande e à dificuldade de se ter material úmido

suficiente para o funcionamento do mesmo. Sabe-se, por testes preliminares, que após este tempo de secagem a tendência da umidade final coletada nos períodos seguintes é de estabilizar.

Tabela 4.15 - Umidade media final % (b.u.) no secador de cilindro rotativo

Experimento	Umidade final % (b.u.)								Média
	Tempo (minutos)								
	60	70	80	90	100	110	120	130	
1	12,2	11,6	11,4	11,2	10,8	9,7	9,6	9,3	10,73
2	10,99	9,83	8,73	8,18	7,66	7,32	6,92	6,59	8,27
3	12,12	9,30	6,88	6,03	5,68	5,23	4,93	4,46	6,83
4	8,34	6,41	5,72	5,42	5,25	5,14	5,03	4,26	5,69
5	11,72	10,95	10,24	9,95	9,21	8,24	8,12	8,05	9,56
6	9,52	9,00	8,43	7,59	7,01	6,73	5,95	4,31	7,32
7	7,23	6,57	6,27	5,97	5,85	5,57	5,03	4,86	5,92
8	6,66	6,15	5,17	4,61	4,26	4,06	4,01	3,00	4,74
9	10,45	9,36	8,22	7,75	6,98	6,75	6,45	6,25	7,78
10	11,77	9,55	7,68	7,27	6,65	6,34	5,68	5,52	7,56
11	11,52	9,64	8,24	7,21	6,45	5,84	5,71	5,46	7,51
12	9,49	9,3	8,45	8,35	8,15	7,88	7,78	7,75	8,39
13	7,21	5,44	5,14	4,92	4,81	4,78	4,57	4,39	5,16
14	9,58	9,08	8,82	8,65	8,54	8,53	8,36	8,26	8,73
15	6,5	5,5	4,86	4,60	4,41	4,34	4,29	4,28	4,85
16	9,52	8,94	8,59	8,48	8,34	8,22	8,18	8,22	8,56
17	11,81	7,58	6,33	5,91	5,41	5,11	4,95	4,92	6,50

A Tabela 4.15 mostra os resultados da umidade média final no secador de cilindro rotativo após 60 minutos. Pode-se observar que o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas mostrou-se adequado à secagem do Okara, pois em um intervalo de 60 minutos, o conteúdo de umidade variou de 60% (b.u.) para 6% (b.u.) no experimento que apresentou condições de secagem mais drásticas (experimento 15).

Para a análise da umidade de saída das amostras no secador foram analisadas as curvas segundo o planejamento experimental. Na Figura 4.21 são apresentados os resultados das umidade finais médias para os experimentos 9, 10 e 11, correspondentes ao

ponto central do planejamento (mesmas condições). Pode-se observar pelos resultados que houve uma boa reprodutibilidade do processo.

Conforme mostra a Figura 4.22, os experimentos 1 a 4 foram realizados utilizando uma mesma potência de microondas (1000W). Os experimentos 3 e 4 obtiveram melhores resultados que os experimentos 1 e 2, e foram muito semelhantes entre si, devido ao fato de que ambos foram secos com uma temperatura de ar maior (80°C), sendo os ensaios 1 e 2 secos com temperatura de ar de 60°C. Porém, o experimento 4, por ter sido realizado com vazão de ar maior que o experimento 3, resultou em secagem mais rápida. Observa-se que a partir de 60 minutos, o experimento 4 já apresentava umidade menor que 8 %. No experimento 3, a umidade nesse mesmo ponto era de 11 %, aproximadamente.

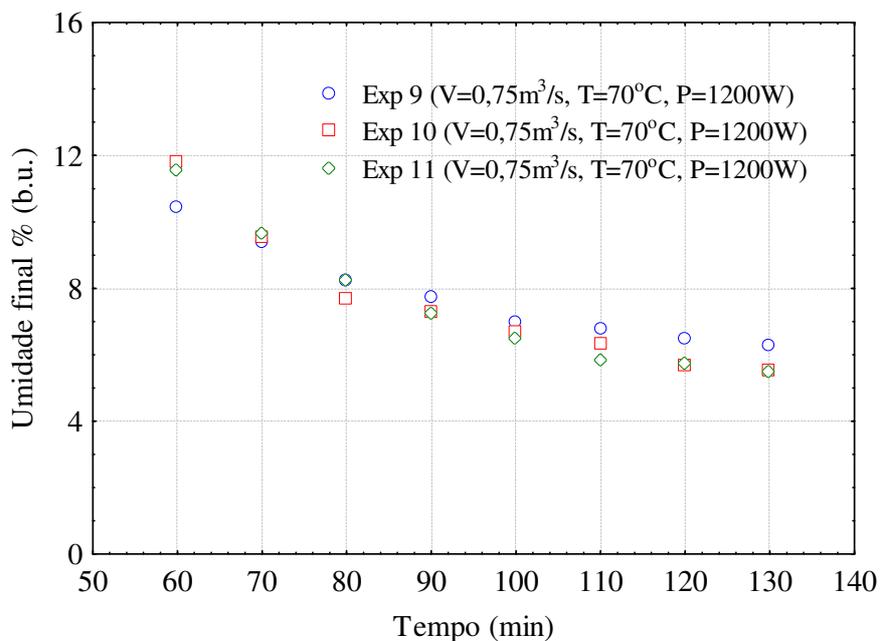


Figura 4.21 – Umidade médias finais para os experimentos 9, 10 e 11 (ponto central) no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

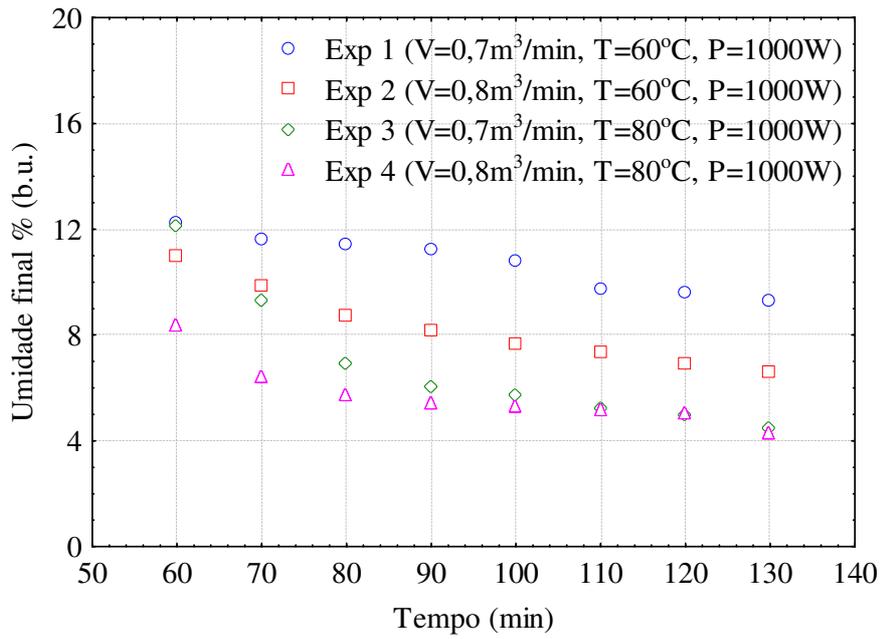


Figura 4.22 - Comparação entre os experimentos 1, 2, 3 e 4 no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

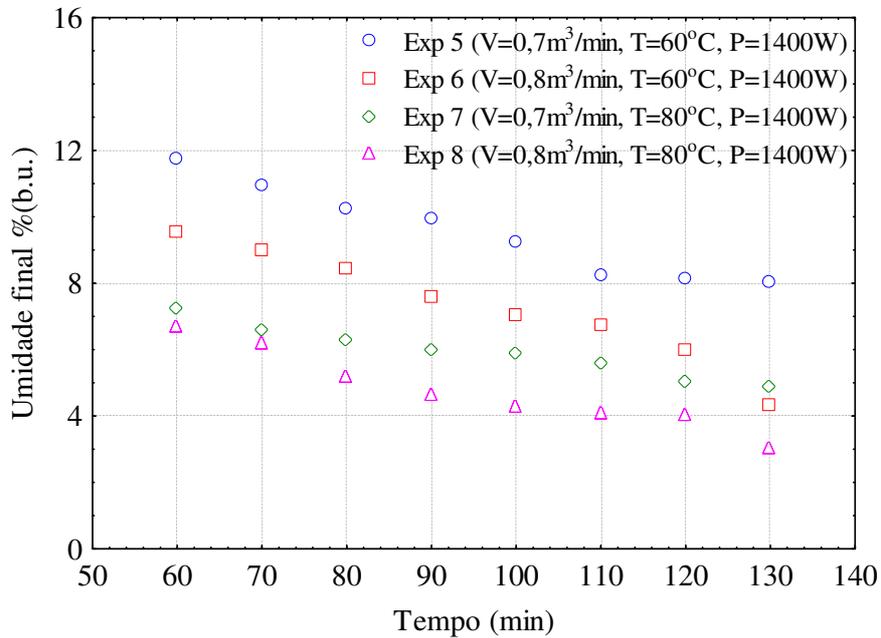


Figura 4.23 - Comparação entre os experimentos 5, 6, 7 e 8 no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

A Figura 4.23 apresenta os resultados dos experimentos 5, 6, 7 e 8 de potência de microondas maior (1400W). Verifica-se na Figura 4.23 que os experimentos 7 e 8 obtiveram melhores resultados que os demais ensaios e próximos entre si pelo mesmo motivo explicitado acima, já que ambos foram secos com temperatura de ar maior (80°C).

Porém o experimento 6, por ter sido realizado com vazão de ar maior que o experimento 5, resultou em secagem mais rápida. A partir de 60 minutos, o ensaio 6 já apresentava umidade em torno de 10%. Já no ensaio 5 a umidade nesse mesmo ponto estava maior que 12%. Nota-se que no experimento 7 e 8 ocorreu a mesma coisa.

Conforme mostra a Figura 4.24, os ensaios 4 e 8 tiveram as mesmas condições de temperatura (80°C) e vazão de ar (0,8 m³/min). No entanto, tais ensaios diferem quanto à potência das microondas, sendo de 1000W no experimento 4 e 1400W no experimento 8. Observa-se que o aumento na potência resultou numa pequena diminuição da umidade final do Okara. pode-se concluir sem análise estatísticas que a potencia influencia a umidade media final de forma pouco significativa.

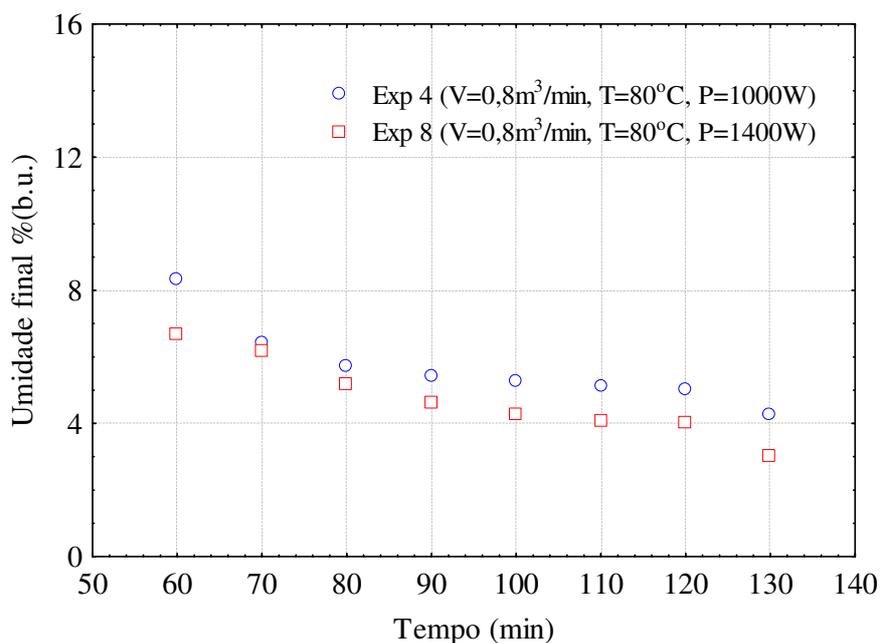


Figura 4.24 - Comparação entre os ensaios 4 e 8 no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

Analisando-se as variáveis separadamente, a influência das variáveis foi pouco significativa na secagem. No entanto, ao analisar o efeito das variáveis, conforme mostra a Figura 4.25, que compara o experimento 1 (0,7 m³/min de vazão de ar, temperatura do ar de secagem de 60°C e 1000W de potência de microondas) e o experimento 8 (0,8 m³/min de vazão de ar, temperatura do ar de secagem de 80°C e 1400W de potência de microondas) - ou seja, respectivamente, as condições do planejamento experimental onde as respostas de umidade final foram menores e maiores- percebe-se uma diferença significativa na secagem.

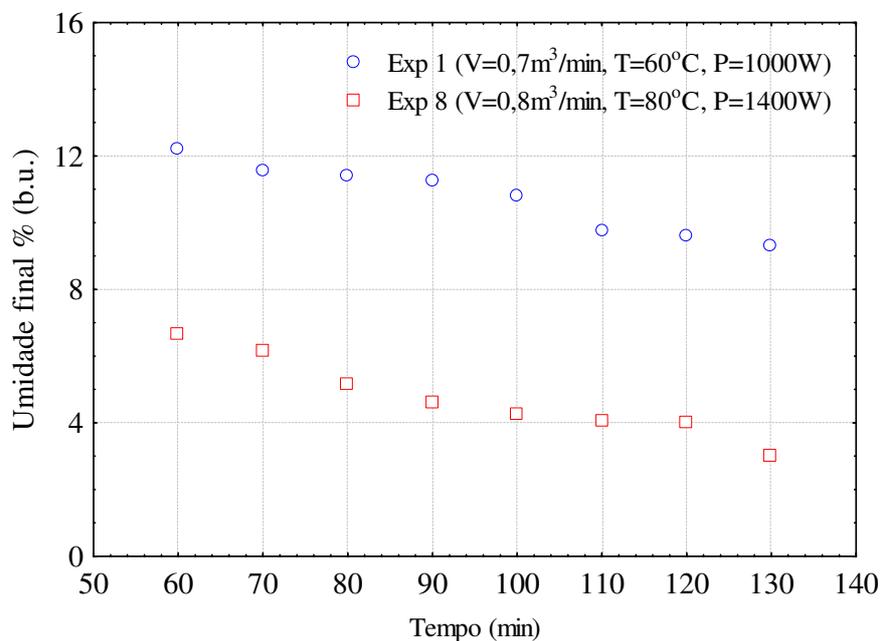


Figura 4.25 - Comparação entre os experimentos 1 e 8 (pontos extremos) no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

Na Figura 4.26 foram analisados os pontos axiais do planejamento experimental. Podemos observar que para todos os pontos axiais com valores de α positivo, têm-se umidades finais menores que para os pontos axiais com valores α negativos, como era de se esperar.

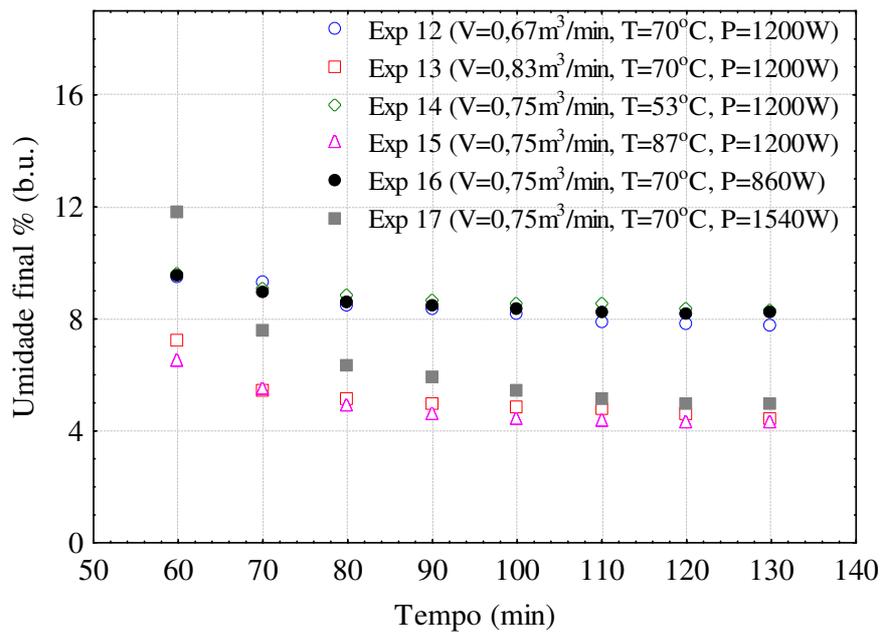


Figura 4.26 – Umidade final média para os pontos axiais do planeamento no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

4.4.2 Resultado do planeamento experimental para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

Na análise estatística do planeamento experimental no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, foram determinados os coeficientes significativos e análises de variância para as variáveis reais e codificadas, isto foi feito tanto para o planeamento completo 2^3 (11 experimentos) e mais 6 pontos axiais. Este planeamento foi realizado tendo como resposta a umidade média final do Okara na saída do secador de cilindro rotativo.

4.4.2.1 Para umidade média final do produto seco

Na Tabela 4.16 são apresentados os valores dos coeficientes de regressão significativos, para análise de regressão baseada no erro puro e um intervalo de confiança de 95%. De acordo com os resultados da Tabela 4. 15, as variáveis vazão do ar, temperatura do ar e potência das microondas (todas lineares), foram significativas, dado que apresentaram um valor de $p < 0,05$.

Tabela 4.16 – Coeficientes de regressão significativos para X (b.u)

Termo / Interação	Coeficientes de regressão	Desvio Padrão	t(2)	p
Média	32,209	2,2949	14,04	0,0050
(1) Vazão (m ³ /min)	-13,987	2,6208	-5,34	0,0334
(2) Temperatura (°C)	-0,140	0,0128	-10,96	0,0082
(3) Potência (W)	-0,004	0,0006	-5,97	0,0269

A Equação 4.5 apresenta o modelo estatístico real ajustado para a resposta analisada (umidade média final do Okara, X (b.u.)).

$$X \text{ (b.u.)} = 32,209 - 13,987(V) - 0,140(T) - 0,004(P) \quad (4.5)$$

Nessa correlação, a resposta umidade media final % (b.u) e o valor da vazão deve ser usada em m³/s e a potencia em watts

A variável temperatura do ar foi a que se mostrou mais significativa como era de se esperar pelo valor de t(2) mostrado na Tabela 4.16. Essa observação pode ser confirmada ainda observando-se o diagrama de Pareto da Figura 4.27.

No diagrama de Pareto da Figura 4.27 mostra-se que a temperatura do ar apresentou o maior efeito, a potência de microondas gerou um efeito médio e a vazão do ar o menor efeito, para a resposta umidade final média do Okara X (b.u.). Não houve efeito significativo entre a interação das variáveis. As variáveis são significativas nos termos lineares, o que mostra que colocando todas elas nos valores máximos ou mínimos do planejamento experimental a resposta X (b.u) é afetada de forma mais significativa, validando a discussão a respeito da Figura 4.25.

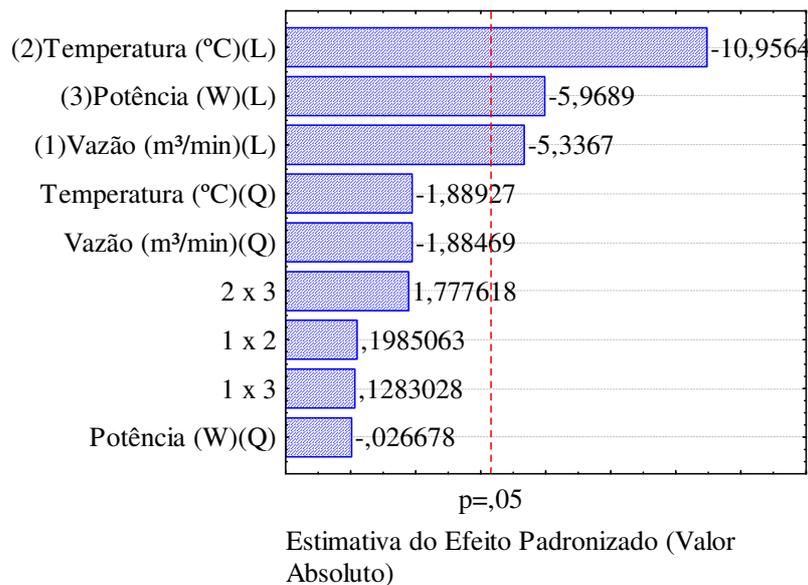


Figura 4.27 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para X (b.u)

Na Tabela 4.17, mostra-se a análise de variância para o planejamento completo 2^3 do modelo real, baseada no erro puro, para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 4.17 - Análise de variância para a resposta X (b.u)

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado
Regressão	41,49	3	13,83	36,63	3,41
Resíduos	4,91	13	0,38		
Falta de ajuste	4,46	11	0,41		
Erro Puro	0,45	2	0,23		
Total	46,40	16	2,90		

Os resultados da Tabela 4.17 mostram que o modelo é completamente preditivo, pois o F calculado pela análise de variância é maior que o F tabelado. Nas Figuras 4.28 e 4.29 mostram-se as superfícies de resposta gerada com o modelo matemático, comparando a variável mais significativa (temperatura do ar) com as outras duas (vazão do ar e potência de microondas).

De acordo com Figura 4.28, a umidade média final X (b.u) diminui mais com o aumento da temperatura do ar do que com o aumento da vazão do ar.

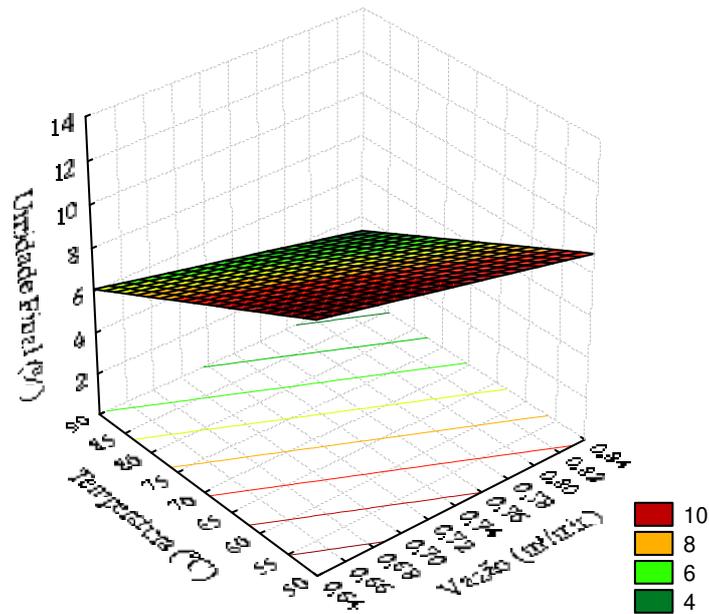


Figura 4.28 - Superfície de resposta para X (b.u) em função da temperatura e vazão do ar

De acordo com a Figura 4.29, a umidade média final X (b.u) diminui mais com o aumento da temperatura do ar do que com o aumento da potência de microondas.

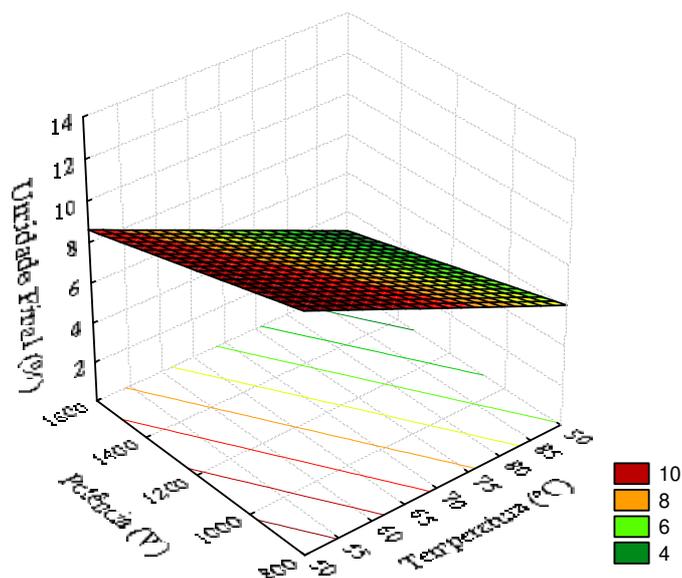


Figura 4.29 - Superfície de resposta para X (b.u.) em função da temperatura e potência das microondas

As Figuras 4.28 e 4.29 confirmam os resultados obtidos na Figura 4.27, onde a variável temperatura do ar se mostrou mais significativa que a potência das microondas.

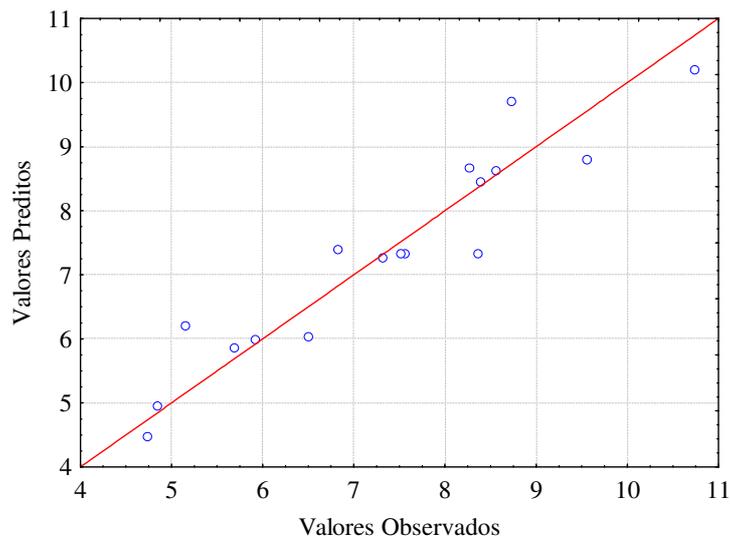


Figura 4.30 - Valores preditos e experimentais para o valor de X (b.u.)

A Figura 4.30 confirma os valores encontrados na análise de variância, onde os valores preditos pelo modelo se aproximam bem dos valores experimentais.

4.4.3 Caracterização do Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas

O Okara seco em secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas apresentou aspecto visível de farinha seca, com partículas amorfas e de coloração castanho claro como mostra a Figura 4.31.



Figura 4.31 - Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas

Os resultados obtidos na caracterização do Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas encontram-se na Tabela 4.18. As partículas analisadas foram as

obtidas dos experimentos 1, 8 e 9 do planejamento experimental, os quais representam os pontos extremos e central do planejamento experimental.

Não existe diferença significativa no diâmetro médio do Okara seco para os diferentes experimentos. Pode-se concluir que o diâmetro não varia de forma significativa com o aumento dos valores das variáveis estudadas.

Tabela 4.18 - Caracterização física do Okara seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas

Experimento	1	9	8
Temperatura do ar de secagem (°C)	60	70	80
Vazão do ar de secagem (m ³ /min)	0,7	0,75	0,8
Potência das microondas (W)	1000	1200	1400
Diâmetro médio (mm)	0,78±0,01	0,77±0,01	0,77±0,01
Umidade final (% b.u) Desvio padrão(±%)	10,73±1,07	8,35±1,34	4,74±1,2
Índice de escoabilidade (mm)	10	8	8
Ângulo de repouso (°)	49,3	46,7	45,9
Densidade volumétrica (g.mL ⁻¹) Desvio padrão (±g.mL ⁻¹)	0,482±0,009	0,470±0,006	0,456±0,005
Densidade absoluta (g.mL ⁻¹) Desvio padrão (± g.mL ⁻¹)	1,272±0,001	1,270±0,002	1,268±0,001
Densidade aparente (g.mL ⁻¹)	1,1107	1,1098	1,1037
Porosidade (%)	12,42	12,06	12,35
Circularidade (%) Desvio padrão (±%)	48,74±13,1	51,38±12,2	53±10,8

O índice de escoabilidade mostrou ser menor para partículas com menor teor de umidade, o que indica que partículas mais secas escoam de forma mais eficiente. Salienta-se que as partículas de Okara com teores de umidade altos apresentam-se como partículas coesas e de difícil escoamento. O ângulo de repouso e a densidade volumétrica (*bulk*) apresentaram pequena variação com as condições experimentais, mostrando uma pequena tendência de diminuir com o aumento da intensidade das variáveis operacionais. O

ângulo de repouso foi menor para maiores valores de temperatura, vazão do ar de entrada e potência de microondas (experimento 8), logo, menor para menor umidade do material. A densidade aparente do material e a porosidade não foram afetadas pelas condições de secagem, já que elas ficaram muito próximas.

Analisando-se os valores médios e os desvios padrão da densidade absoluta, verifica-se que os valores são praticamente os mesmos, como esperado, já que o esqueleto do material é o mesmo nas diferentes condições operacionais.

Observa-se a tendência da circularidade aumentar com o aumento dos valores das variáveis estudadas, uma vez que uma vazão e temperatura maior do ar de entrada promovem uma movimentação maior das partículas, eliminando pontas e promovendo arredondamentos na forma das partículas.

Segundo GRANTGES (1981) as partículas de Okara seco em cilindro rotativo que apresentam diâmetro médio entre 149 μ m e 3,18mm são consideradas granulares. Pelo índice de escoabilidade, partículas com ângulos de repouso maiores de 45° são consideradas partículas de escoamento lento.

4.4.4 Secagem em forno microondas adaptado com circulação de ar quente

Após terem sido mostrados os resultados e as discussões da secagem em secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, são apresentados os resultados do planejamento completo 2³ para um forno de microondas adaptado com circulação de ar quente. Esta secagem foi desenvolvida com a finalidade de elaborar as curvas de secagem do Okara no secador de forno microondas, como já foi descrito na metodologia anteriormente. As variáveis estudadas foram as mesmas que no secador de cilindro rotativo.

Na Tabela 4.19 mostram-se os resultados da cinética de secagem do experimento 9 (ponto central). Pode-se observar que o secador de forno com aplicação de microondas foi adequado, pois em um intervalo de 80 minutos, o conteúdo de umidade do Okara reduziu-se de 63% (b.u.) até 1,7% (b.u.).

Tabela 4.19 – Cinética de secagem do experimento 9 (Ponto central)

Tempo (min)	m (kg)	Xbu (%)	Xbs (kg/kg)	X/X ₀
0	0,300	63,293	172,430	1,000
5	0,294	62,518	166,796	0,967
10	0,283	61,142	157,346	0,913
15	0,269	59,014	143,988	0,835
20	0,250	55,999	127,267	0,738
25	0,234	53,012	112,819	0,654
30	0,217	49,311	97,280	0,564
35	0,201	45,196	82,468	0,478
40	0,186	40,930	69,292	0,402
45	0,172	35,870	55,934	0,324
50	0,159	30,788	44,484	0,258
55	0,147	25,138	33,580	0,195
60	0,136	19,202	23,766	0,138
65	0,126	12,938	14,860	0,086
70	0,119	7,602	8,227	0,048
75	0,114	3,805	3,956	0,023
80	0,112	1,656	1,684	0,010

A Figura 4.32 representa as curvas de secagem ajustadas ao modelo de Page modificado apresentado na Equação (2.13). O ponto central está representado pelos experimentos 9, 10 e 11 e pode-se observar que eles apresentam uma boa reprodutibilidade. Observa-se também que a variável potência apresenta-se como a variável mais significativa da secagem, isto devido a maior diferença das curvas 9, 10 e 11 (P=200W) comparadas com as curvas 1, 2, 3 e 4 (P=200W) e as curvas 5, 6, 7 e 8 (P=300W). Também pode ser observado que não existe diferença significativa entre as curvas com diferentes vazões de ar. Pode-se confirmar isto observando as curvas para mesmos valores de temperatura do ar e potência de microondas. Observa-se que as curvas dos experimentos 1 e 3 são muito parecidas, e que o mesmo ocorre com as curvas dos experimentos 2 e 4, 5 e 7 e as curvas 6 e 8, respectivamente.

Na Tabela 4.20 mostram-se os resultados do coeficiente da difusividade, k (seg^{-1}), e constante do modelo de Page modificado n , obtidos pelo método de regressão não linear ajustados ao modelo de Page modificado (Equação 2.13) pelo programa *Statistica*[®]. O coeficiente de correlação R^2 para os 11 experimentos apresenta valores muito próximos da unidade, entre os valores de 0,995 e 0,999, o que representa que o modelo de Page modificado se ajustou de forma adequada aos resultados experimentais.

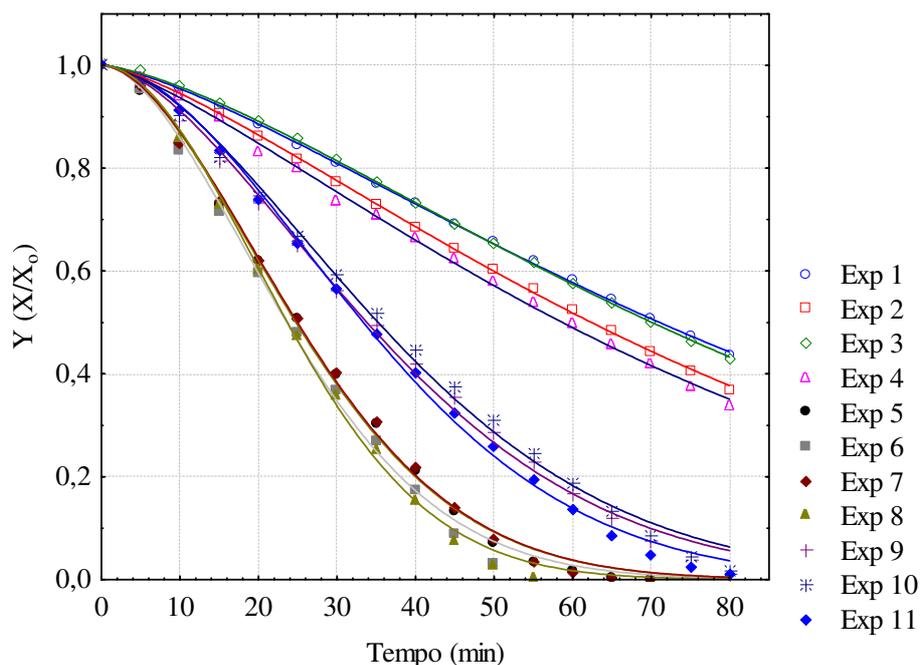


Figura 4.32 – Curvas de secagem ajustadas ao modelo de Page modificado

Na Tabela 4.20 observa-se também que os experimentos 1, 2, 3 e 4 ($P=100W$) são os que apresentam menores valores de coeficientes de difusividade (k). Os experimentos 5, 6, 7 e 8 apresentam maiores valores de coeficientes de difusividade, confirmando a importante influência da potência das microondas no processo de secagem. Todos os experimentos apresentaram um bom ajuste ao modelo de Page modificado, mostrado pelo valor do coeficiente de correlação próximo da unidade. Ainda na Tabela 4.20 encontram-se os valores da resposta umidade aos 50 minutos de secagem (b.u), o tempo de 50 minutos foi determinado devido que pode-se observar uma variação significativa na umidade final para um tempo de 50 minutos. Esta umidade final aos 50 minutos foi uma das respostas do planejamento experimental, e foi analisada comparativamente com os valores de k determinado pelo ajuste dos resultados experimentais ao modelo de Page modificado. As

características físicas do Okara seco têm que ser semelhantes a de produtos farináceos, com umidade entre 6% (b.u.) e 8% (b.u.).

Pode-se observar que os valores de n variam proporcionalmente aos valores dos coeficientes de difusividade k (s^{-1}). Este valor de n está diretamente relacionado à curvatura dos pontos experimentais umidade final vs tempo, para cada experimento, pode-se calcular também através do modelo matemático o tempo necessário de secagem em cada experimento para atingir a umidade desejada.

Tabela 4.20 – Variáveis e respostas do planejamento para o secador de forno de microondas

Experimento	Variáveis				Respostas	
	T (°C)	V (m ³ /min)	P (W)	k x 1000 (s ⁻¹)	n	U _{t=50min} % (b.u.)
1	60	1,3	100	0,180	1,38	39,15
2	80	1,3	100	0,204	1,37	35,98
3	60	1,5	100	0,185	1,44	39,16
4	80	1,5	100	0,216	1,33	34,29
5	60	1,3	300	0,546	1,76	5,52
6	80	1,3	300	0,574	1,76	4,43
7	60	1,5	300	0,543	1,77	5,61
8	80	1,5	300	0,581	1,91	3,34
9	70	1,4	200	0,395	1,66	15,93
10	70	1,4	200	0,380	1,69	17,18
11	70	1,4	200	0,407	1,79	14,40

Na Figura 4.32, verifica-se que o menor teor de umidade final foi obtido no experimento 8. Portanto, o tempo médio para atingir uma umidade de 3,34% (b.u.), aplicando os valores de $k=0,581\text{seg}^{-1}$ e $n=1,91$ ao modelo de Page modificado, foi de aproximadamente 50 minutos.

Na Figura 4.33 mostra-se as curvas de taxas de secagem do leite de jorro comparadas com a do forno de microondas para os pontos centrais de cada experimento. Pode-se observar que a taxa de secagem constante do forno microondas de aproximadamente (0,03) é muito menor que a do leite de jorro (0,08). Também no período à taxa decrescente as taxas são maiores no leite de jorro e, como consequência, os valores da constante de difusividade obtida para o forno de microondas ($0,000395\text{s}^{-1}$) é menor que a

obtida no leito de jorro ($0,001351s^{-1}$), como mostram as Tabelas 4.20 e 4.6 (é 4.6 mesmo?), respectivamente.

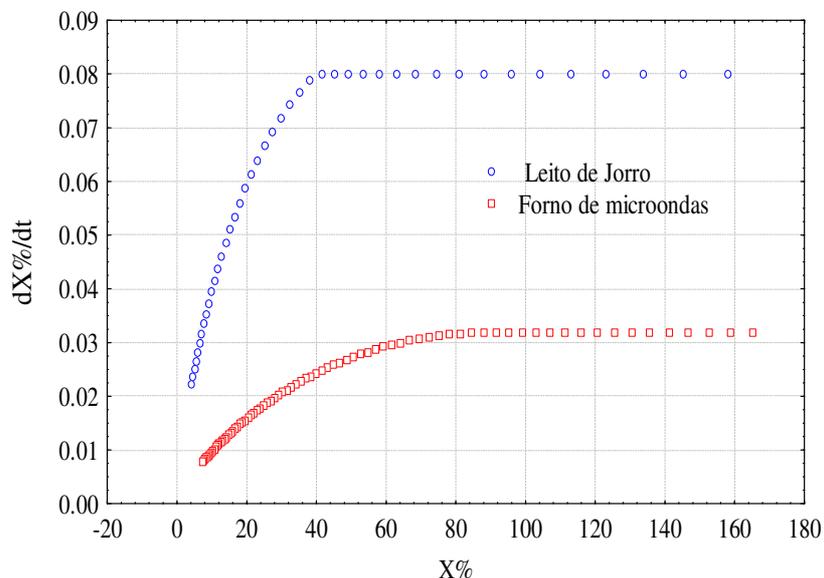


Figura 4.33 – Gráfico de taxa constante e taxa decrescente para o experimento 9 para o secador de leito de jorro e secador de forno de microondas

4.4.4.1 Resultado do planejamento experimental para o forno de microondas

Na análise estatística do planejamento experimental no secador adaptado de forno de microondas, foram determinados os coeficientes significativos e análises de variância para as variáveis reais e codificadas, sendo isto feito para o planejamento completo 2^3 (11 experimentos). Para um melhor entendimento dos planejamentos experimentais, dividiu-se as análises estatísticas segundo as respostas constantes de difusividade k e umidade da amostra aos 50 minutos, como foram apresentados na Tabela 4.20. As respostas apresentadas correspondem apenas aos modelos reais.

4.4.4.1.1 Análise estatística para a constante de difusividade k

Na Tabela 4.21 são apresentados os valores dos efeitos significativos, para análise de regressão baseada no erro puro e um intervalo de confiança de 90%. De acordo com os resultados desta tabela, só as variáveis temperatura do ar e potência das microondas foram significativas dado que apresentaram um valor de $p < 0,10$.

Tabela 4.21 – Coeficientes de regressão significativos para k

Termo / Interação	Coeficientes de regressão	Desvio Padrão	t(2)	p
Média	-0,088	0,0040	95,93	0,0001
(1)Temperatura (°C)	0,002	0,0094	3,23	0,0841
(3)Potência (W)	0,002	0,0094	38,97	0,0007

A Equação 4.6 apresenta o modelo estatístico ajustado para a resposta analisada (coeficiente de difusividade, k).

$$k.1000 = -0,088 + 0,002(T) + 0,002(P) \quad (4.6)$$

Nessa correlação, a resposta k (s^{-1}) e o valor da variável temperatura T em °C e o valor da variável potência P em watts.

A variável potência das microondas foi a que se mostrou mais significativa como era de se esperar pelo valor de t(2) mostrado na Tabela 4.21. Essa observação pode ser confirmada ainda observando-se o diagrama de Pareto da Figura 4.33.

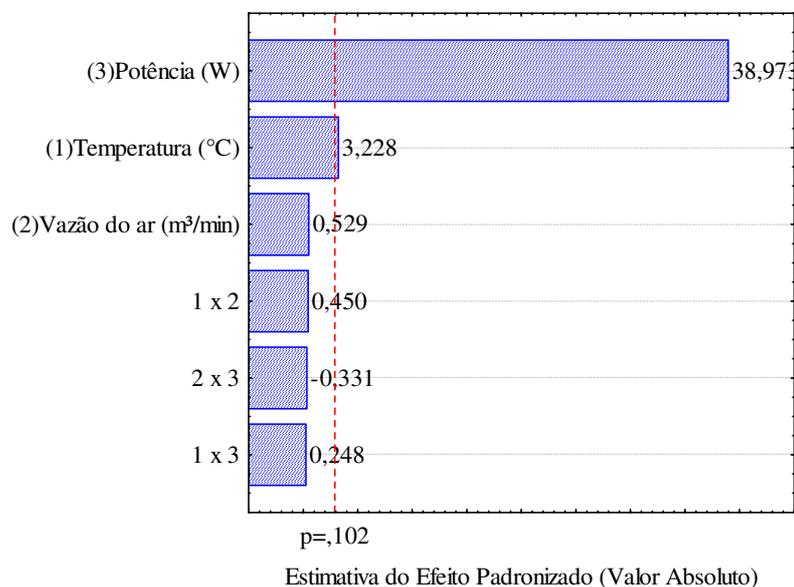


Figura 4.34 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para k

No diagrama de Pareto da Figura 4.34 mostra-se que a temperatura do ar apresentou o menor efeito, enquanto a potência das microondas gerou o maior efeito para a resposta constante de difusividade (k). A variável vazão do ar não foi significativa e não

teve efeito significativo entre a interação das variáveis. Deve salientar-se que a secagem neste equipamento foi realizada em camada delgada e com pouco contato gás-sólido, por tal motivo a alta influência da microonda comparada com a influencia da temperatura e vazão do ar de secagem.

Na Tabela 4.22, mostra-se a análise de variância para o planejamento completo 2^3 do modelo real, baseada no erro puro, para um intervalo de confiança de 90%.

Tabela 4.22 - Análise de variância para a resposta k

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado
Regressão	0,2678	2	0,1339	1073,29	6,16
Resíduos	0,0010	8	0,0001		
Falta de ajuste	0,0006	6	0,0001		
Erro Puro	0,0004	2	0,0002		
Total	0,2687	10	0,0269		

Os resultados da Tabela 4.22 mostram que o modelo é completamente preditivo, pois o F calculado pela análise de variância é muito maior que o F tabelado. Na Figura 4.35, mostra-se a superfície de resposta gerada com o modelo comparando as duas variáveis significativas: temperatura do ar e potência de microondas.

De acordo com a Figura 4.35, a constante de difusividade k aumenta com o aumento da potência de microondas e é praticamente indiferente à variação da temperatura do ar. Esta mesma figura confirma os resultados obtidos na Figura 4.34, onde a variável potência das microondas se mostrou mais significativa que a temperatura do ar.

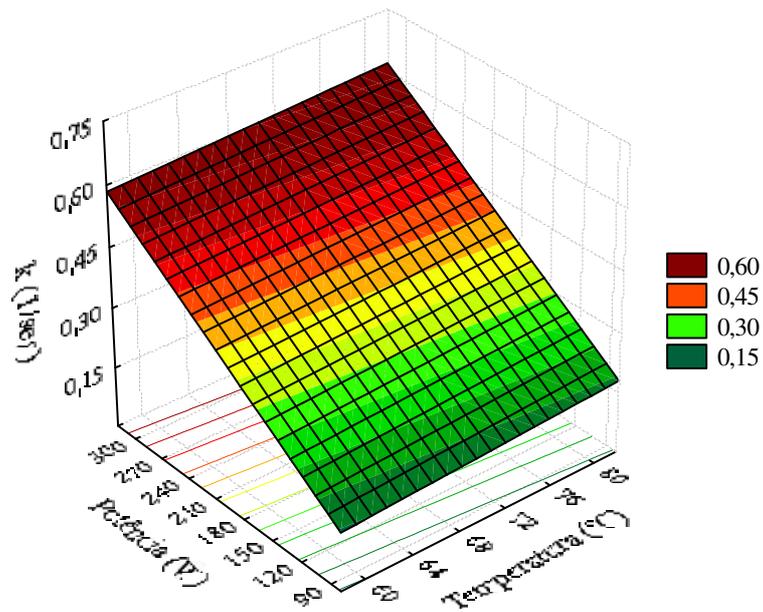


Figura 4.35 - Superfície de resposta para k em função da temperatura do ar e potência das microondas

A Figura 4.36 confirma os valores encontrados na análise de variância, onde os valores preditos pelo modelo se aproximam bem dos valores experimentais.

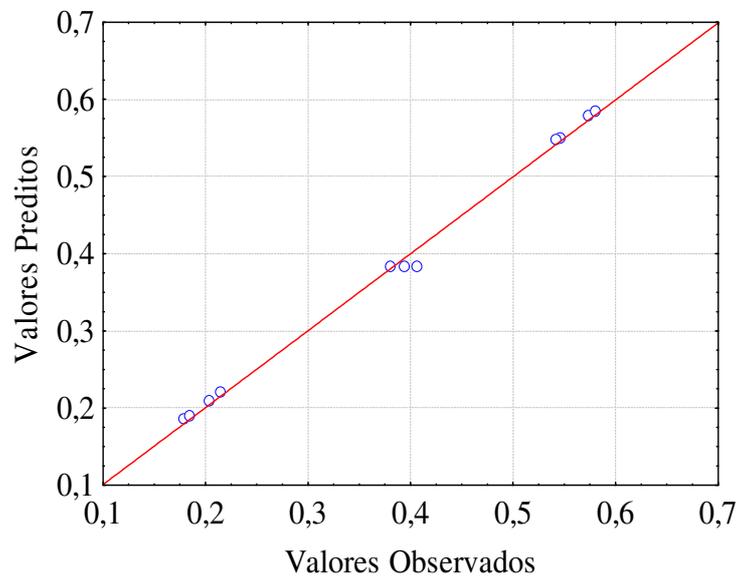


Figura 4.36 - Valores preditos e experimentais para o valor de k

4.4.4.1.2 Análise estatística para a umidade aos 50 minutos de secagem no forno adaptado

A resposta $X_{t=50\text{min}}$ (Umidade após 50 minutos de secagem em base úmida, %) também foi avaliada para o forno de microondas. Para este equipamento, utilizou-se o planejamento experimental completo com pontos centrais, descrito por BARROS NETO *et al.* (2002), realizando um planejamento completo 2^3 com três pontos centrais dando um total de 11 experimentos.

As variáveis foram as mesmas que no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas: vazão e temperatura do ar de secagem e potência das microondas.

Apresenta-se a seguir a análise estatística para as variáveis reais deste planejamento, com coeficiente de correlação igual a 0,97005. O F calculado para este planejamento foi mais de dez vezes maior do que o F tabelado (validando a análise estatística para o modelo obtido).

Na Tabela 4.23 são apresentados os valores dos coeficientes significativos, para análise de regressão baseada no erro puro e um intervalo de confiança de 90%. Através desta tabela, nota-se que, com valor de $p < 0,1$, somente a potência das microondas aplicadas no forno e a temperatura do ar de secagem mostraram-se significativas para a resposta.

Tabela 4.23 - Coeficientes de regressão significativos para umidade após 50 minutos de secagem

Termo / Interação	Coefficiente de regressão	Desvio Padrão	t(2)	p
Media	61,964	0,4198	46,56	0,0005
(3) Potência (W)	-0,162	0,9845	-32,93	0,0009
(1) Temperatura (°C)	-0,143	0,9845	-2,90	0,1012

Para $U_{t=50\text{min}}$ (Umidade após 50 minutos de secagem em base úmida, %), o modelo estatístico ajustado foi o modelo transcrito na Equação 4.7:

$$X_{t=50\text{min}} = 61,964 - 0,162(P) - 0,143(T) \quad (4.7)$$

Nessa correlação, a resposta X %(b.u.) e o valor da variável temperatura T em °C e o valor da variável potência P em watts

Como já sugerido pela Tabela 4.23, a variável potência foi a que apresentou maior efeito, por ser a única variável significativa. Este resultado pode ser observado no diagrama de Pareto da Figura 4.37.

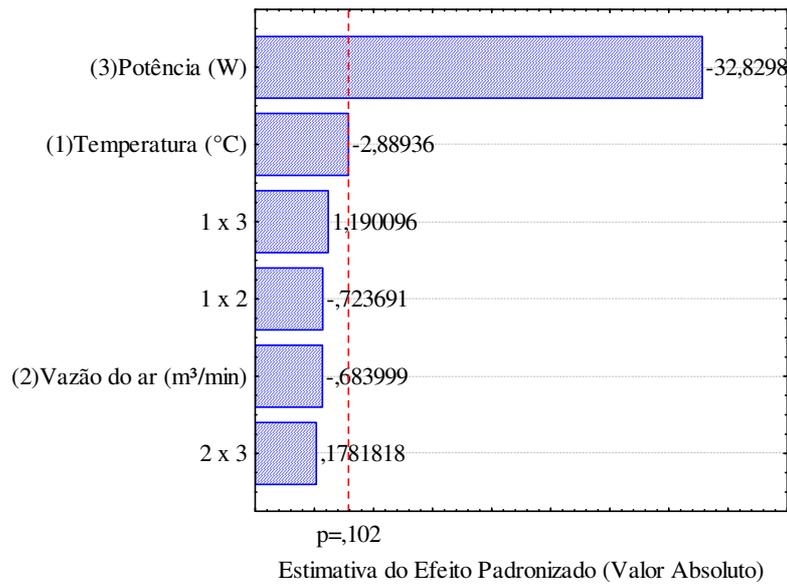


Figura 4.37 - Diagrama de Pareto dos efeitos estimados (valor absoluto) para $X_{t=50min}$

Na Tabela 4.24, mostra-se a análise de variância para o planejamento completo 2^3 , sem pontos axiais, do modelo real, baseada no erro puro, para um intervalo de confiança de 90%.

Tabela 4.24 - Análise de variância para a resposta $X_{t=50min}$

Fonte de variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F Calculado	F Tabelado
Regressão	2119,06	2	1059,53	129,54	3,29
Resíduos	65,43	8	8,18		
Falta de ajuste	61,56	6	10,26		
Erro Puro	3,88	2	1,94		
Total	2184,50	10	218,45		

Os resultados da Tabela 4.24 mostram que, como comentado anteriormente, o modelo é completamente preditivo, pois o F calculado pela análise de variância é muito maior que o F tabelado.

Na Figura 4.38 mostra-se a superfícies de resposta gerada com o modelo descrito comparando as duas variáveis significativas: potência (W) e temperatura (°C).

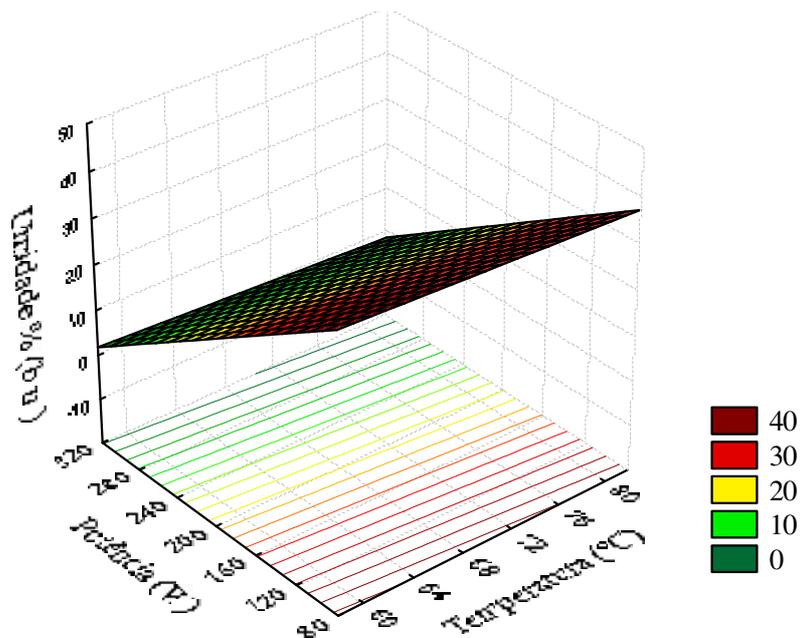


Figura 4.38 - Superfície de resposta para $X_{t=50\text{min}}$ em função da temperatura do ar e potência das microondas

A Figura 4.38 mostra que, como esperado, o valor de $X_{t=50\text{min}}$ varia mais à medida que a potência se modifica (variável de maior efeito). É possível também concluir que a umidade após 50 minutos de secagem em base úmida ($X_{t=50\text{min}}$) diminui com o aumento da potência e da temperatura, como é lógico considerando que potências maiores de microondas e maiores temperaturas do ar de secagem têm a capacidade de eliminar mais facilmente a água livre do interior do Okara.

A Figura 4.39 confirma os valores encontrados na análise de variância, onde os valores preditos pelo modelo se aproximam bem dos valores experimentais. Alguns pontos apresentam uma pequena dispersão em relação ao eixo diagonal, mas pelo coeficiente de correlação e pela comparação do F calculado com o tabelado, pode-se continuar afirmando que o modelo matemático obtido é preditivo.

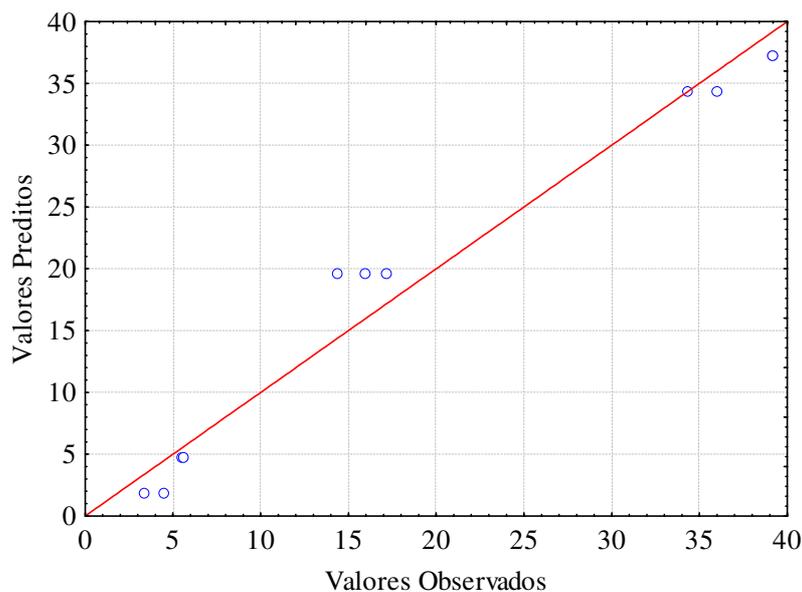


Figura 4.39 - Valores preditos e experimentais para o valor de $U_{t=50\text{min}}$

Pela análise acima, pode-se ainda notar que a resposta k , para o mesmo equipamento, apresentou as mesmas variáveis significativas (Potência e Temperatura), como pode observar-se na Figura 4.33.

Neste secador de forno adaptado com aplicação de microondas a potencia mostra-se como variável mais significativo, diferente do que aconteceu no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas onde a variável temperatura se apresentou como mais significativa. Pode-se concluir que isto aconteceu devido as baixas vazões de vazão de ar dentro do secador de forno de microondas e a distribuição do campo eletromagnético dentro das cavidades de ambos os secadores assim como isolamento das mesmas.

4.4.5 Avaliação energética do secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas

Na Tabela 4.15, mostram-se os valores de umidade final para os experimentos 1, 8, 9, 10 e 11. Os experimentos 1 e 8 representam as condições de secagem extremas do planejamento experimental, onde as umidades finais do produto foram, respectivamente, as maiores e menores. Os experimentos 9, 10 e 11 representam o ponto central do planejamento (3 repetições).

Na Tabela 4.25, são mostrados os valores de fluxo de massa de Okara na entrada e na saída do secador. Também são apresentadas as condições psicrométricas segundo a posição: na entrada do secador, após as resistências e na saída do secador. Estes valores são necessários para determinar as características psicrométricas do ar de secagem.

Tabela 4.25 – Condições do ar de secagem para os experimentos 1, 8, 9, 10 e 11

Exp. n°	Fluxo mássico de Okara (kg/h)		Posição	Condições do Ar						
	Entrada M_{oe} [% (b.u.)]	Saída M_{os} [% (b.u.)]		T_{bs} (°C)	T_{bu} (°C)	W (g/kg)	T_{orv} (°C)	V_{esp} (m ³ /kg)	UR (%)	H (kJ/kg)
1	1,8733	0,8395	Entrada	24,6	17,5	10,51	13,8	0,91	51,34	51,27
	[60]	[10,73]	Ar quente	60,0	27,0	10,50	13,7	1,023	7,87	87,87
			Saída	35,6	32,8	33,13	32,2	0,98	82,13	120,79
8	1,9667	0,8258	Entrada	26,4	23,0	17,51	21,8	0,93	76,23	70,96
	[60]	[4,74]	Ar quente	80,0	34,1	17,50	21,7	1,095	5,50	127,13
			Saída	38,9	38,2	46,63	37,8	1,02	87,89	160,54
9	1,9200	0,8382	Entrada	23,8	16,3	9,25	11,9	0,91	47,25	47,37
	[60]	[7,78]	Ar quente	70,0	28,3	9,00	11,4	1,056	4,30	94,27
			Saída	39,4	33,4	32,63	31,9	0,99	64,34	123,85
10	1,9667	0,8510	Entrada	23,8	16,3	9,30	11,9	0,909	47,30	47,37
	[60]	[7,56]	Ar quente	70,0	28,5	9,30	11,9	1,056	4,44	95,06
			Saída	39,4	33,4	32,60	31,9	0,994	64,30	123,85
11	1,8733	0,8101	Entrada	24,9	18,0	10,95	14,4	0,92	52,57	52,68
	[60]	[7,51]	Ar quente	70,0	29,3	10,89	14,3	1,055	5,21	99,24
			Saída	40,6	34,3	34,68	33,0	1,00	65,56	129,90

Nas duas últimas linhas da Tabela 4.26 mostram-se os valores de eficiência térmica e energia específica por unidade de massa (kg) de água retirada no processo de secagem, respectivamente, para cada experimento. Os valores de eficiência térmica alcançados são melhores que os valores alcançados usualmente em secadores rotativos convencionais segundo STRUMILLO e LOPEZ-CAICEDO (1987).

Tabela 4.26 – Resultados energéticos por unidade de tempo para os experimentos 1, 8, 9,

10 e 11

Experimento		1	8	9	10	11
$A_4 = w_o - w_i$	Água removida pelo ar (g/kg de ar seco)	22,62	29,12	24,68	23,38	23,73
$A_5 = A_4[V/V_{esp}] \times 60$	Água total removida pelo ar (kg _{água} /h)	1,044	1,503	1,207	1,156	1,161
$W = M_{ou} \left(\frac{U_o - U_f}{100 - U_f} \right)$	Água evaporada do Okara (kg/h)	1,034	1,141	1,082	1,116	1,063
$H_{WO} = W \times \lambda_{ev} \div 3600$	Energia da água evaporada do okara por unidade de tempo (kW)	0,692	0,769	0,727	0,748	0,683
$E_{aq} = [V/V_{esp}] / 60 \times (H_h - H_i)$	Energia do ar quente por unidade de tempo (kW)	0,469	0,805	0,637	0,644	0,633
$E_{ar} = [V/V_{esp}] / 60 \times (H_{ex} - H_h)$	Energia do ar por unidade de tempo (kW)	0,422	0,479	0,411	0,406	0,417
$(*) E_{hO} = M_{ot} \times C_{pO} \times (T_h - T_{aa})$	Energia calorífica do Okara por unidade de tempo (kW)	0,0177	0,0249	0,0218	0,0238	0,0223
$(**) E_{hps} = M_{ps} \times C_{pi} \times (T_h - T_{aa})$	Energia calorífica do polipropileno por unidade de tempo (kW)	0,0121	0,0180	0,0152	0,0168	0,0157
$E_{MW} = E_{MWT} - E_{MWR}$	Energia das microondas por unidade de tempo (kW)	1,000	1,400	1,200	1,200	1,200
$(***) TE = [E_{hO} + H_{WO}] \div [E_{aq} + E_{MW}] \times 100$	Eficiência térmica (%)	48,3	36,0	40,8	41,9	40,1
$Ee = [E_{aq} + E_{MW}] / 1000 \times 3600 \div A_5$	Energia específica consumida por unidade de tempo para remover 1 kg de água (MJ/kg _{água})	5,066	5,281	5,479	5,743	5,684

(*) O valor médio do calor específico foi calculado pelos valores teóricos de umidade final e inicial do Okara, usando a Equação (4.8) (EARLE, 1983):

$$\text{Calor específico} = 4.19 \times U/100 + 0.84 \times (100 - U)/100 \quad (4.8)$$

(**) $C_i = 1.99 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, obtido de <http://www.matweb.com> (MatWeb – material property data: “Overview of materials for Polystyrene”.)

(***) TE = Eficiência térmica definida segundo EARLE, 1983.

Os valores calculados para energia específica são da mesma ordem de grandeza comparados aos valores encontrados por WACHIRAPHANSKUL e DEVAHASTIN (2005, 2007) para o processamento de Okara em leito de jorro fluidizado, que alcançaram valores em torno de 3,69 a 5,89 MJ/kg_{água}, apesar de terem obtido um produto seco com umidade final acima da umidade final dos experimentos deste presente trabalho.

A Figura 4.40 é uma representação esquemática do sistema de operação de secagem, com referência à entrada e saída da vazão mássica do produto e á circulação interna de ar de secagem, ao lado da entrada das microondas.

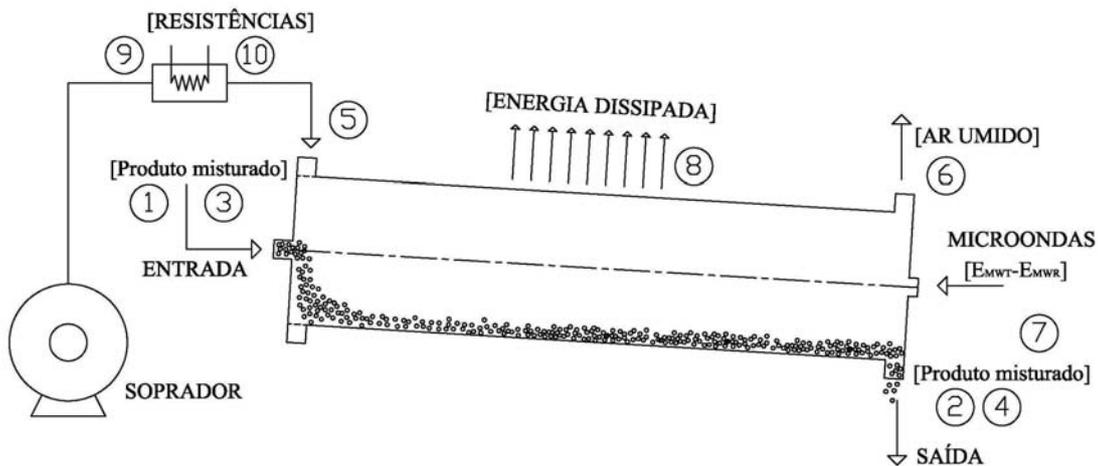


Figura 4.40 – Representação esquemática do sistema de operação de secagem

Por outro lado, na Tabela 4.27 estão os resultados da secagem em termos dos balanços de energia por unidade de tempo para os experimentos 1, 8 e 9, com referência específica às entradas citadas na Figura 4.40. Esta tabela evidencia a grande quantidade de energia perdida, trazendo a sugestão de que é necessário um melhor isolamento térmico do sistema de secagem, junto ao cuidado de manter o equipamento livre de qualquer vazamento do ar de secagem.

Tabela 4.27 - Resultados da secagem em termos do balanço de energia por unidade de tempo para os experimentos 1, 8 e 9

Experimento		1		8		9	
Item	Especificação	Energia de entrada (kJ/s)	Energia de saída (kJ/s)	Energia de entrada (kJ/s)	Energia de saída (kJ/s)	Energia de entrada (kJ/s)	Energia de saída (kJ/s)
1	Okara	0,0360		0,0410		0,0380	
2			0,0135		0,0139		0,0139
3	Poliestireno	0,0127		0,0140		0,0323	
4			0,0247		0,0323		0,0284
5	Vazão de ar quente	1,0020		1,3540		1,3629	
6	Ar úmido		1,4340		1,8419		1,7740
7	Microondas	1,0000		1,4000		1,2000	
8	Perdas de energia		0,5789		0,9213		0,7975
Soma dos valores de entrada e de saída		2,051	2,051	2,809	2,809	2,614	2,614
Energia dissipada (%)		28,22		32,79		30,51	

4.4.6 Avaliação comparativa da densidade energética dos processos nos secadores de cilindro rotativo com aplicação de microondas e no forno de microondas adaptado

Para fins de avaliação dos processos de secagem com microondas, de modo intermitente em nível de laboratório (bancada), e em regime contínuo (piloto), foram realizados os cálculos das potências reais utilizadas, eficiências das energias transferidas para o material e densidades de potência destes dois processos.

Na Tabela 4.29 são apresentados os resultados para os diferentes secadores e para os experimentos 1 e 8 (que representam as condições extremas de secagem), e para o experimento 9, representando o ponto central do planejamento. Nos anexos A e B encontra-se como foram determinados os valores apresentados na Tabela 4.29

Tabela 4.28 – Resultados da densidade energética dos processos nos diferentes secadores

Equipamento	Experimento	Potência nominal (W)	Potência real (W)	Eficiência da energia transferida para o material(%)	Densidade de potência (Wh/kg)
Secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas	1	1000	763,54	76,35	407,59
	8	1400	907,85	64,85	461,61
	9	1200	830,18	69,18	432,39
Secador de forno de microondas adaptado	1	100	63,56	63,56	231,11
	8	300	183,47	61,16	464,14
	9	200	125,89	62,94	434,88

Podemos observar que os valores das eficiências das energias transferidas para o material foram maiores do que as encontradas por KINGLER e DECKER (1989), que foram em torno do valor médio de 54%. Pode-se observar também que ambos secadores apresentaram o mesmo comportamento: com o aumento das potências nominais, as eficiências diminuíram e as densidades de potência aumentaram, coisa que era de se esperar. A densidade de potência do experimento 1 do forno adaptado foi bem menor pois as umidades finais, tal como mostradas na Figura 4.32 (obtidas com potencias de 100W), foram muito altas, o que leva a uma diminuição da energia necessária por unidade de massa para um mesmo tempo.

Observa-se, com exceção do experimento 1 já comentado, que as densidades de potência para ambos os processos são da mesma ordem de grandeza, o que significa que este índice poderia ser utilizado como auxiliar nos procedimentos de ampliação de escala dos processos e equipamentos deste tipo de secagem.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para um melhor entendimento das conclusões e sugestões para futuros trabalhos, estas foram divididas em quatro etapas. A primeira etapa refere-se à caracterização das partículas de material inerte e das partículas úmidas de Okara; a segunda etapa refere-se à secagem no leito de jorro e caracterização do produto final seco; a terceira etapa refere-se à secagem no secador de cilindro rotativo e no forno microondas e produto seco final, e uma quarta e última etapa abarca a avaliação energética das secagens e as conclusões gerais sobre os dois processos analisados.

Da primeira etapa:

Foram caracterizados três tipos diferentes de inertes: polipropileno, poliestireno e ABS[®]. Pelo tamanho das partículas, os três foram considerados granulares e de escoamento livre. O material inerte cumpriu um papel fundamental na fluidodinâmica (leito de jorro) e transporte (secador de cilindro rotativo), além de evitar aglomerações e aderências nas paredes dos secadores. Outra propriedade fundamental da utilização destes materiais inertes dentro de um secador é que permite que a separação das partículas secas do material inerte possa ser feita por uma operação mecânica (peneiramento) ou por separação física (sedimentação), para a lavagem e reaproveitamento deste material inerte.

A operação unitária prévia de prensagem evita gastos não necessários de energia, além de permitir uma melhor operação de secagem evitando aglomerações do material e aderências às paredes do secador. O material úmido, após o processo de prensagem, apresenta-se como um material particulado considerado granuloso, altamente coesivo e com alto índice de escoabilidade.

Da segunda etapa:

Para o secador de leito de jorro:

No secador de leito de jorro, foram testadas partículas de polipropileno, poliestireno e ABS[®]. As partículas de polipropileno mostraram uma melhor fluidodinâmica e eficiência na secagem, junto com o Okara úmido.

No secador de leito de jorro, foram realizadas operações de secagem em batelada. O leito de jorro mostrou-se como um equipamento factível e reprodutivo para a secagem deste tipo de produto úmido particulado. Foram estudados diferentes valores de massa de

material inerte e massa de Okara, sendo que pelos resultados obtidos, pela fluidodinâmica da mistura de material inerte e Okara e pela limitação do tamanho da cavidade do secador foi escolhida uma massa de material inerte de 1,5 kg e massa de Okara de 0,5 kg.

Todas as variáveis analisadas: temperatura do ar, razão Q/Q_{jm} e tempo de trituração do resíduo, apresentaram influência significativa em todas as respostas, sendo que a temperatura do ar destaca-se em comparação com as outras duas variáveis.

Foram obtidos modelos matemáticos quadráticos estatísticos em função das variáveis analisadas, para prever os valores dos parâmetros do modelo de Page modificado (k e n). Estes modelos ajustados concordaram com os valores experimentais.

Para o material seco em leito de jorro, pode-se concluir:

O Okara seco apresentou aspecto visível de farinha seca com características físicas similares às exigidas para material orgânico farináceo apto para o consumo humano pela legislação brasileira, ou seja, umidade final menor que 8%. Este material particulado seco tem como vantagens a facilidade de transporte e controle de estocagem, assim como tempo de vida de prateleira maior que a do material úmido. O índice de escoabilidade é mais alto para o material com diâmetro médio menor e umidade maior; assim como é menor para as partículas que apresentam maior circularidade e menor umidade. O ângulo de repouso é relacionado principalmente ao tempo de trituração do material e à umidade final, sendo menor para maiores tempos de trituração e menor teor de umidade. A densidade volumétrica é menor para condições maiores de: temperatura, Q/Q_{jm} e tempos de trituração. Nenhuma variação da densidade absoluta foi verificada com as diferentes condições de secagem. Assim, o material não sofreu alterações significativas em sua estrutura química durante a secagem. A circularidade foi de aproximadamente 66%, o que leva a concluir que o material seco no leito de jorro teve uma boa movimentação e atrito com as partículas inertes e paredes do secador, que levou à quebra e arredondamento das partículas.

Da terceira etapa:

Para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas e forno microondas:

No secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas, foram testadas partículas de polipropileno, poliestireno e ABS[®]. As partículas de poliestireno mostraram um melhor acompanhamento ao transporte do material dentro do secador assim como evitou as aglomerações e aderências nas paredes do cilindro do secador.

No secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas foram realizadas operações de secagem de forma contínua. Este secador mostrou-se como um equipamento factível e reprodutivo para a secagem deste tipo de produto úmido particulado. Foram estudados diferentes valores de massa de material inerte e massa de Okara, sendo que pelas dimensões do secador, condições de operação e tempo de residência da mistura de material (Okara úmido e material inerte) escolheu-se uma proporção entre massa de material úmido e material inerte igual a 2. O processo de secagem do Okara sofreu influência de todas as variáveis estudadas: vazão do ar, temperatura de ar de secagem e potência das microondas, para seus coeficientes lineares. A variável temperatura do ar mostrou-se mais significativa que as outras duas, com um efeito significativo muito maior.

Para o secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas foi obtido um modelo matemático linear em função das variáveis lineares de vazão do ar, potência das microondas e temperatura do ar, para predizer a constante de difusividade do modelo de Page modificado (k) para a secagem no secador de forno microondas. Este modelo ajustou-se de forma satisfatória aos valores experimentais.

No forno de microondas, foram elaboradas as curvas de secagem estudando as mesmas variáveis que foram estudadas no secador de cilindro rotativo. Neste secador, só duas das variáveis se mostraram significativas. Destaca-se que a secagem foi elaborada em batelada e vazão de ar de secagem foi pequena, pois a função dela era carregar a umidade para fora da cavidade do secador. Foram obtidos os modelos matemáticos lineares em função das variáveis lineares de potência das microondas e temperatura do ar, para predizer a constante de difusividade do modelo de Page modificado (k) e umidade do produto aos 50 minutos ($b.u$) para a secagem no secador de forno microondas. Estes modelos ajustaram-se de forma satisfatória aos valores experimentais.

Para o material seco em cilindro rotativo com aplicação de microondas, pode-se concluir:

O Okara seco apresentou aspecto visível de farinha seca com características físicas similares às exigidas para material orgânico farináceo apto para o consumo humano pela legislação brasileira. Este material particulado seco tem como vantagens a facilidade de transporte e controle de estocagem, assim como alto tempo de vida de prateleira. O índice de escoabilidade e ângulo de repouso são maiores para condições de secagem com valores

menores das variáveis estudadas (o que resultou em maior teor de umidade final), como era de se esperar. O ângulo de repouso é relacionado também à umidade final, sendo que para menor teor de umidade tem-se menor ângulo de repouso. A densidade volumétrica é menor para valores maiores das variáveis de secagem estudadas. Nenhuma variação da densidade absoluta foi verificada com as diferentes condições de secagem. Além disso, o material não sofreu alterações significativas em sua estrutura física durante a secagem. A circularidade foi de aproximadamente 50% e, devido aos diferentes formatos e aglomerações das partículas, apresentou um alto desvio padrão.

Da quarta etapa:

Avaliando energeticamente ambos os experimentos, tem-se que a secagem realizada em leito de jorro (batelada) comparada com a do cilindro rotativo com aplicação de microondas apresentou menor consumo energético por unidade de tempo.

O secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas tem um alto teor de energia dissipada, o que poderia ser evitado usando o isolamento térmico adequado das paredes do secador.

Os valores de eficiência da energia transferida para o material se mostraram maiores aos encontrados na literatura. A comparação da densidade de potência de ambos secadores permite ter um parâmetro referencial para a ampliação da escala do processo e do equipamento.

Sugestões para trabalhos futuros.

Para trabalhos futuros, recomenda-se estudar a secagem de Okara em secador de leito de jorro com aplicação de microondas, determinando o tempo de início da secagem a taxa decrescente, com a finalidade de aplicar microondas nesta etapa, diminuir o tempo de secagem e melhorar a características físicas do produto final.

Também, recomenda-se o estudo da secagem do Okara em secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas com matérias isolantes térmicos nas paredes do secador, assim como a utilização de alimentação contínua do material inicial no secador de leito de jorro, com aplicação de microondas.

Outra sugestão é estudar os tipos de material inerte, com diferentes propriedades físicas e elétricas, podendo citar como exemplo densidade, calor específico e diâmetro

médio. Pode-se destacar entre as opções de material o *teflon*, que é transparente à radiação das microondas.

As microondas combinadas com processos convencionais de secagem mostram-se como alternativas viáveis para materiais orgânicos e inorgânicos, portanto são recomendadas para materiais de difícil secagem ou para alcançar baixos teores de umidade.

Realização de análises químicas e bioquímicas dos produtos finais secos pelos processos convectivos e com aplicação de microondas para melhor avaliar a qualidade do produto final em cada tipo de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ALAM, A; SHOVE, G. C. Hygroscopicity and thermal properties of soybean. *Trans ASAE*, v.16, p. 707–709, 1973.
- [2] ALIBAS, I. Characteristics of Chard Leaves during Microwave, Convective, and Combined Microwave-Convective Drying, *Drying Technology*, v.24, n.11, p.1425-1435, 2006.
- [3] ALMEIDA, C.; ROCHA, S. C. S. Fluidodinâmica de sementes de brócolos em leite fluidizado e leite de jorro. *Scientia Agricola*, v.59, n.4, p.645–652, 2002.
- [4] ANDERSON, R. C.; JACOB, V. K. *Entrainment from and industrial rotary dryer*. In International Drying Symposium - IDS, VIII, 1992, Quebec. *Proceedings...* Quebec: Elsevier Science Publishers B. V., 1992. v.B, p.1249-1257.
- [5] ANDRADE Jr., W. M.; XAVIER, C. H.; ARAÚJO, A. A. L.; JÁCOME, B. C.; MEDEIROS, U. K. L.; PEDRINI, M. R. S.; MEDEIROS, M. F. D. *Secagem de leite em leite de jorro*. In Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, VI, 2005. *Proceedings...*, 2005.
- [6] ANDRÉS, A.; BILBAO, C.; FITO, P. Drying kinetics of apple cylinders under combined hot-air microwave dehydration. *Journal of Food Engineering*. v. 63, n.1, p. 71-78, 2004.
- [7] ARJONA, R.; OLLERO, P.; VIDAL, F. Automation of an olive waste industrial rotary dryer. *Journal of Food Engineering*. v.68, p.239-247, 2005.
- [8] BARRET, N.; FANE, A., *Drying Liquid Materials in a Spouted Bed*. In International Drying Symposium - IDS, XI, 1998, Porto Carras. *Proceedings...* New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990. v.IX, p.415-420.
- [9] BARROS NETO, B; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria*. Campinas: Editora da Unicamp, 3ª Ed, 2002, 401p.
- [10] BEAUDRY, C.; RAGHAVAN, G. S. V.; RENNIE, T. J. Microwave Finish Drying of Osmotically Dehydrated Cranberries, *Drying Technology*, v.21, n.9, p.1797-1810, 2003.
- [11] BECKER, H. A. Na investigation of laws governing the spouting of coarse particles. *Chem. Eng. Sci.* v.13, n.245, 1961.
- [12] BERTELI, M. N.; MARSAIOLI Jr., A. Evaluation of short cut pasta air dehydration assisted by microwaves as compared to the conventional drying process. *Journal of Food Engineering*. v.68, n.2, p.175-183, 2005.

- [13] BOURNE, M. C.; CLEMENTE, M. G.; BANZON, J. Survey of the suitability of thirty cultivars of soybeans to soymilk manufacture. *Journal of Food Science*, v.41, n.5, p.1204–1208, 1976.
- [14] BOWLES, S.; DEMIATE, I. M. Caracterização físico-química de Okara e aplicação em pães do tipo francês. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 26, n. 3, p. 652-659, 2006.
- [15] BROWN, R. L.; RICHARDS, J. C. *Principles of powder mechanics*, Oxford: Pergamon Press, 1970.
- [16] BUFFLER, C. R. Microwave cooking and processing: Engineering fundamentals for the food scientist. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. *Introduction to microwaves*, p. 1-13.
- [17] BURJAILI, M. M. *Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 1996. 218p. Tese (Doutorado).
- [18] CABRAL, L. C.; CASTRO, F. A. de. *Leite e Farinha de Soja*. Fortaleza: IBICT, 22^a Ed, 1994, 23p.
- [19] CARRÃO-PANIZZI, M. C.; BELÉIA, A. P.; KITAMURA, K.; OLIVEIRA, M. C. N. Effects of genetics and environment on isoflavone content of soybean from different regions of Brazil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 10, p. 1787-1795, 1999.
- [20] CORONEL, E. L.; TOBINAGA, S. Drying the Okara in a Spouted Bed. In International Drying Symposium - IDS, XI, 2004, São Paulo. *Proceeding...* v.C, p. 1-5.ur
- [21] COSTA, J.A. *Cultura da soja*. Porto Alegre: Evangraf, 1996. 233 p.
- [22] CRANK, J. *The mathematics of diffusion*, Oxford: Clarendon Press, 1975, 2^a Ed. 414p.
- [23] DATTA, A. K. Heat and mass transfer in the microwave processing of food. *Chemical Engineering Progress*, v.86, n.6, p. 47-53, 1990.
- [24] DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. Microwave Processing and Engineering, 1986. *Dehydration*, p.109-112.
- [25] DEL VALLE, V. H. Apostila: *Metodología de cálculo en el dimensionamiento y análisis de secadores rotatorios*, 1998.
- [26] DONIDA, M. W., *Análise das Influências das Características do Sólido e da Suspensão no Processo de Recobrimento em Leito de Jorro*, Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 2004. 156p. Tese (Doutorado).
- [27] DOUGLAS, P. L.; KWADE, A.; LEE, P. L.; MELLIK, S. K.; WHALEY, M. G.

- Modeling, simulation & control of rotary sugar dryers* In International Drying Symposium - IDS, VIII, 1992, Quebec. *Proceedings...* Quebec: Elsevier Science Publishers B. V., 1992. p.1928-1939.
- [28] EARLE, R. L. *Unit operations in food processing*. Oxford: Pergamon Press, 1983, 207p.
- [29] EMBRAPA (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA). *Programa nacional de pesquisa de soja*. Brasília, 1981. 115 p.
- [30] FELLOWS, P. *Food Processing Technology: Principles and Practice*. Lincoln: CRC Press, 2000. *Processing using hot air – dehydration*.
- [31] FENG, H.; TANG, J. Microwave Finish Drying of Diced Apples in a Spouted Bed. *Journal of Food Science*, v.63, n.4, p.679 – 683, 1998.
- [32] FENG, H.; TANG, J.; CAVALIERI, R. P.; PLUMB, O. A. Heat and mass transport in microwave drying of porous materials in a spouted bed. *American Institute Chemical Engineers Journal*, v.47, n.7, p. 1499-1512, 2001.
- [33] FICK, A., *Pogg. Ann.*, n.94, 1855.
- [34] FRIEDMAN, S. J.; MARSHAL Jr, T. R. Studies in rotary drying, *Chemical Engineering Progress*, v, 45, n.8 e 9, p.482-583, 1949.
- [35] FUKUDA, A. M; SILVEIRA, A. M. . Secagem De Brócolis Via Microondas: Caracterização De Amostras. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA (COBEQ-IC), 2008, SAO CARLOS. ANAIS Do Vii Cobeq-Ic. Sao Carlos, 2007.
- [36] FUMAGALLI, F. ; SILVEIRA, A. M. . Quality Evaluation Of Microwave Dried Packhman's Triumph Pear. *Drying Technology*, v. 23, n. 9-11, p. 2215-2226, 2005.
- [37] FUNEBO, T.; OLHSSON, T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom. *Journal of Food Engineering*, v.38, n.3, p. 353-367, 1998.
- [38] GENTA, H. D.; GENTA, M. L.; ALVAREZ, N. V.; SANTANA, M. S. Production and Acceptance of a Soy Candy. *Journal of Food Engineering*. v.53, n.2. 199-202p, 2002.
- [39] GHOSH, B. A study on a spouted bed – A theoretical analysis. *Indian Chemistry Engeneering*, v.7, n.16, 1965.
- [40] GISHLER, R. E.; MATHUR, K. B. Technique for contacting gases with coarse solid . particles. *American Institute of Chemical Engineerings Journal*, v.1, p.157-171, 1954.
- [41] GOKSU, E. I.; SUMMU, G.; G. ESIN, A. Effect of microwave on fluidized bed drying of macaroni beads. *Journal of Food Engineering*. v.66, n.4, p. 463-468, 2004.

- [42] GRANTGES, R. Handling of bulk solids and packaging of solids and liquids. In PERRY, S. *Chemical Engineers' Handbook*. New York: Ed. McGraw-Hill, 1981.
- [43] GUERMANI, L.; VILLAUME, C.; BAU, H. W.; CHANDRASIRI, V.; NICOLAS, J. P.; MEJEAN, L. Composition and nutritional value of okara fermented by *Rhizopus oligosporus*. *Science des Aliments*, n.12, n.3, p.441-451, 1992.
- [44] HENRY, C. J. K.; CHAPMAN, C. *The Nutrition Handbook for Food Processors*. Lincoln: CRC Press, 2002. p.117-127.
- [45] JACKSON, C. J.; DINI, J. P.; LAVANDIER, C.; RUPASINGHE, H. P. V.; FAULKNER, H.; POYSA, V.; BUZZELL, D.; GRANDIS, S. de. Effects of processing on the content and composition of isoflavones during manufacturing of soy beverage and tofu. *Process Biochemistry*, v.37, n.10, p.1117-1123, 2001.
- [46] JASON, A. C. *A estudy of evaporation and diffusion process in the drying of fish muscle: Fundamentals aspects of the dehydration of foodstuffs*. New York: The Society of Chemistry Industry, 1958.
- [47] KAREL, M.; LUND, D. B. *Physical Principles Preservation of Food*. New York: Marcel Dekker, 2003.
- [48] KELLY, J. J. *Rotary Dryer*. In MUJUMDAR, A. S., *Handbook of Industrial Drying*. New York: Marcel Dekker, p.133-153, 1987.
- [49] KEY, R. B. *Drying of loose and particulate materials*. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1ª Ed, 1992, 481p.
- [50] KINGLER, R. W.; DECKER, D. *Microwave heating of soybeans on laboratory and pilot scale*. Proceedings of the Fifth International Congress on Engineering and Food (ICEF). Colonia. Alemanha. V.2. Pag. 259-269. 1989
- [51] KITAHARA, E. M. *Transferência de calor e massa em secador de tambor rotativo*. São Carlos: Faculdade de Engenharia Química, UFSCar, 1987. 32p. Projeto de Pesquisa.
- [52] KNEULE, F. *El Secado*. Bilbao, Urmo. 414p., 1966.
- [53] LAROSA, G.; ROSSI, E. A.; BARBOSA, J. C.; CARVALHO, M. R.B. *Utilização da Farinha de Okara na Elaboração de Biscoito Doce Contendo Isoflavonas*. In Simpósio Latino Americano De Ciência Dos Alimentos - SLACA, V, 2003.
- [54] LEMA, A. A.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, S. *Drying Kinetics of Soybean Druffy (Okara)*. In International Drying Symposium - IDS, XI, 1998, Porto Carras. *Proceedings...* New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1998. v.C, p.2149-2155.

- [55] LESCANO C. A. *Estudo da Secagem e Caracterização das Partículas de Okara Produzidas em um Secador de Cilindro Rotativo*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 2004. 128p. Tese (Mestrado).
- [56] LESCANO, C. A.; MARSAIOLI Jr., A. *Determinação da difusividade efetiva do resíduo do leite de soja seco em microondas combinado com ar quente*. In Simpósio Latino Americano De Ciência Dos Alimentos - SLACA, VII, 2007.
- [57] LESCANO C. A.; TOBINAGA S. *Difusividade Efetiva da Secagem em Secador de Bandeja e de Cilindro Rotativo do Resíduo de Extrato Hidrossolúvel de Soja*. In Simpósio Latino Americano De Ciência Dos Alimentos - SLACA, V, 2003.
- [58] LESCANO C. A.; TOBINAGA S. *Drying of Okara in Rotary Dryer*. In World Soybean Research Conference, VII, 2004. *Proceeding...*, 2004
- [59] LESCANO C. A.; TOBINAGA S. Modelo Codificado e Real para a Difusividade Efetiva da Secagem do Resíduo do Extrato hidrossolúvel de Soja. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*. v.6, n.1, p.17-25, 2004.
- [60] LIMA, M.F.M. *Desidratação de polpa de umbu em leito de jorro - Estudos fluidodinâmicos e térmicos*. Campina Grande: UFPB, 1992. 132p. Tese (Mestrado).
- [61] LIU, K. *Soybean as Functional Foods and Ingredients*. Lincoln: CRC Press, 2004.
- [62] MA, C. Y.; LIU, W. S.; KWOK, K. C.; KWOK, F. Isolation and characterization of proteins from soymilk residue (okara). *Food Research International*, v.29, n.8, p.799-805, 1996.
- [63] MACCARI Jr, A. *Análise do pré-processamento da erva-mate para chimarrão*. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 2005. 199p. Tese (Doutorado).
- [64] MADHIYANON, T.; SOPONRONNARIT, S.; TIA, W. A Mathematical model for continuous drying of grains in a spouted bed dryer. *Drying Technology*, v.3, n.29, p.587-614, 2002.
- [65] MALEK, M.A.; LU, B.C.Y. Pressure drop and spoutable bed height in spouted bed. *Industrial and Engineer Chemical Process Design and Develop*, v.4, p.123-128, 1965.
- [67] MANURUNG, F. *Studies in the spouted bed technique with particular reference to low temperature coal carbonization*. Kesington: University of New South Wales, 1964. Tese (Ph.D.)
- [68] MARKOWSKI, A. S. Drying Characteristics in a Jet-Spouted Bed Dryer, *Can. J.*

- Chem. Eng., 70, n.5, pag. 938-944, 1992
- [69] MARKOWSKI, A. S. Quality Interaction in a Jet Spouted Bed Dryer for Bio-Products. *Drying Technology*, v.11, n.2, p.369-387, 1993.
- [70] MARRETO, R. N. *Estudo da secagem de leite de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina*. Ribeirão Preto: Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, USP, 2006. 193p. Tese (Doutorado).
- [71] MARSAIOLI Jr. A. *Desenvolvimento de um Protótipo de Secador Cilíndrico Rotativo a Microondas e Ar Quente para a Secagem Contínua de Produtos Sólidos Granulados*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1991. 197p. Tese (Doutorado).
- [72] MASKAN, M. Microwave/Air and Microwave Finish Drying of Banana. *Journal of Food Engineering*, v. 44, n. 2, p. 71-78, 2000.
- [73] MATHUR, K. B., EPSTEIN, N. *Spouted Beds*. New York: Academic Press, 304p., 1974.
- [74] MATWEB, *Overview of materials for Polystyrene Available*, Disponível em <<http://www.matweb.com>>, acesso em 09 de setembro de 2008.
- [75] MEDEIROS, M. F. D.; ALSINA de, O. L. S.; ROCHA, S. C.; JERÔNIMO, C. E. de M. MATA, de; A. L. de M. L.; MEDEIROS de, U. K. L; FURTUNATO, A. A. Escoabilidade de leitos de partículas inertes com polpa de frutas tropicais. Efeitos na secagem em leite de jorro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.3, p.475-480, 2001.
- [76] MEISEL, N. Essicamento delle paste alimentari com microonde. *Tecnica Molitoria*, p.101-105, 1976.
- [77] MUDGETT, R. E. Engineering properties of foods. New York: RAO, M. A., 1996. *Electrical properties of foods*, p.389-456.
- [78] NEJAD, M. K.; TABIL, L. G.; MORTAZAVI, A.; KORDI, A. S. Effect of Drying Methods on Quality of Pistachio Nuts. *Drying Technology*, v.21, n.5, p.821-838, 2003.
- [79] NEMETH, J.; PALLAI, I. Spouted bed technique and its application, *Maggy. Kem. Lapja*. V.25, n.74, 1970.
- [80] NG, P. P.; LAW, C. L.; TASIRIN, S. M. Drying Kinetics of Malasyan Paddy (Group D Particles) in Spouted Bed Dryer, *International Journal of Food Engineering*, v.2, n.3, 2006.
- [81] NINDO, C. I.; SUN, T.; WANG, S. W.; TANG, J.; POWERS, J. R. Evaluation of drying

technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). *Lebensm Wiss u Technol*, n. 36, p.507-516, 2003.

- [82] NITZ, M. *Secagem de Macarrão Assistida por Microondas*. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, 1999. 68p. Tese (Mestrado).
- [83] NONHEBEL, G.; MOSS, A. A. H. *Drying of solids in the chemical industry*. Londres: The Butherworth Group, p.180-204, 1971.
- [84] O'TOOLE, D. K. The characteristics and use of Okara, the soy bean residue from soy milk production - a review. *Agricultural and Food Chemistry*, v. 47, n.2, p.363-371. 1999.
- [85] OLIVEIRA, E. G.; *Secagem de Spirulina Platensi: análise das técnicas de leito de jorro e camada delgada*. Rio Grande: Departamento de Química, Fundação Universidade Federal do Rio Grande, 2006. 73p. Tese (Mestrado).
- [86] PAGE, C. *Factors Influencing the Maximum Rate of Drying Shelled Corn in Layers*. West Lafayette: Purdue University, 1949. Tese (Mestrado).
- [87] PARK, Y. K.; AGUIAR, C. L.; ALENCAR, S. M.; MASCARENHAS, H. A. A.; SCAMPARINI, A. R. P. Avaliação do teor de isoflavonas em soja Brasileira. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 3, n. 3, p. 156-160, 2001.
- [88] PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. *Drying Technology*, v.15, n.2, p.605-624, 1997.
- [89] PATEL, K.; BRIGDMATER, J.; BAKER, C. G. J.; SCHNEIDER, T. Spout Behavior of wet solids. In International Drying Symposium - IDS, VI, 1989. *Proceedings...* New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1990.
- [90] PERRY, S. *Chemical Engineers' Handbook*. New York: Ed. McGraw-Hill, 1984, 2581p.
- [91] PERUSSELLO, C. A. *Estudo dos Parâmetros de Processo e Modelagem Numérica da Secagem do Resíduo Sólido da Produção do Extrato Hidrossolúvel de Soja (Okara)*. Dissertação de Mestrado. Curitiba: Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, PUC-PR, 2008. 137p. Tese (Mestrado).
- [92] PHAM, Q. T. Behavior of a conical spouted-bed dryer for animal blood. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v,61, n,3, p.426-434, 1983.
- [93] PIOTROWSKI, D.; LENART, A; WARDZYNSKI, A. Influence of osmotic dehydration on microwave-convective drying of frozen strawberries. *Journal of Food Engineering*

v.65, n.4, p.519–525, 2004.

- [94] PROYECTO PILOTO de emprendimento solidário de producción, elaboración y distribución de alimentos de soja para assistência alimentaria em comedores comunitarios del partido. Universidad Nacional de La Plata, Argentina. 2002.
- [95] RACHEL, C. A.; JACOB, K. V. *Entrainement from industrial rotary dryer* In International Drying Symposium - IDS, VIII, 1992, Quebec. *Proceedings...* Quebec: Elsevier Science Publishers B. V., 1992, p.1248-1257.
- [96] RAGHAVAN, G. S. V.; SILVEIRA, A. M. Shrinkage characteristics of strawberries osmotically dehydrated in combination with microwave drying. *Drying Technology*, v.19, n.2, p.405-414, 2001.
- [97] RÉ, M. I.; FREIRE, J. T. . Secagem de sangue animal em leite de jorro. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 4, n. 2, p. 5-17, 1987.
- [98] RIBEIRO, V. A. *Aproveitamento do Resíduo do Extrato de soja na Elaboração de um Produto Tipo Paçoca*. Lavras: Departamento de Ciência dos Alimentos, Universidade Federal de Lavras, 2006. 75p. Tese (Mestrado).
- [99] ROCHA, A. P. T.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, V. S.; da SILVA, F. L. H. Cinética de produção de levedura seca em leite de jorro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, n.1, p. 81-86, 2008.
- [100] RODRIGUES, A. M. da C.; TOBINAGA, S. Secagem de suspensão protéica de peixe em leite de jorro: propriedades funcionais. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v.3, n.1, p.31-36, 2001.
- [101] SACHAROW, S.; SCHIFFMANN, R. *Microwave Packaging*. UK: Pira International, 1992. 155p.
- [102] SALINAS, R. A. E. *Secagem de suspensões em leite de jorro cônico*, Rio de Janeiro: UFRJ, 1993. Tese (Doutorado).
- [103] SARSILMAZ, C.; YILDIZ, C.; PEHLIVAN, D. Drying of apricots in a rotary column cylindrical dryer (RCCD) supported with solar energy. *Renewable Energy*, v.21, p.117-127, 2000.
- [104] SCHIFFMANN, R. F. *Microwave and dielectric drying*. In MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. New York: Marcel Decker, p. 327-356, 1987.
- [105] SCHWEIZER, T. F.; BEKHECHI, A. R.; KOELLREUTTER, B.; REIMANN, S.; POMETTA, D.; BRON, B. A. Metabolic effects of dietary fiber from dehulled soybeans

- in humans. *American Journal of Clinical Nutrition*, v.38, p.1–11, 1983.
- [106] SENISE, J. T. Aplicações de radiofrequências e microondas na eletrônica industrial. *Revista Brasileira de Engenharia Química*, v. 8, n. 1, p. 51-61, 1985.
- [107] SHERRIT, R.G.; CAPLE, R.; BEHIE, L. A.; MEHROTRA, A. K. The movement of solids through flighted rotating drums (Part I). *Journal of Chemical Engineering*, v.71, p.337-346, 1993.
- [108] SHILTON, N. *Drying Theory*, 2002. Universidade de Dublin. Disponível em <<http://www.ucd.ie/food/html/homepage/nshilton.htm>> acesso em 20 de março de 2008.
- [109] SHURTLEFF, W.; AOYAGI, A. History of Soybean and Soyfoods: 1100B.C. to the 1980s (Manuscrito Não Publicado) Soyinfo Center, Califórnia, Estados Unidos, 2007. Disponível em < <http://www.soyinfocenter.com/HSS/soymilk1.php>>, acesso em 26 de março de 2008.
- [110] SMIT, J. *Microondas*. Érica Editora Ltda , São Paulo, 1987.
- [111] SMITH, F. J. Microwave –hot air drying of pasta, onions and bacon. *Microwave Energy Applications Newsletter*, v.12, n.6, p. 6-12, 1979.
- [112] SOUZA, C. R. F. *Estudo comparativo da produção de extrato seco de Bauhinia forficata pelos processos spray-dryer e leito de jorro*. Riberão Preto: Faculdade de Ciências Farmacêuticas, USP, 2003. 180p. Tese (Mestrado).
- [113] STRUMILLO, C.; LOPEZ-CAICEDO, C. *Energy aspects in drying*. In MUJUMDAR, A. S. Handbook of Industrial Drying. New York: Marcel Decker, p.823-862, 1987.
- [114] SUREL, O.; COUPLET, B. Influence of the dehydration process on active compounds of Okara during its fractionation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v.85, n.8, p.1343–1349, 2005.
- [115] SVENSON, G. Microwave systems save time, energy. *Prepared Foods*, v.156, p. 86-90, 1987.
- [116] TARUNA. I.; JINDAL. V. K. Drying of soy pulp (Okara) in a bed of inert particles, *Drying Technology*, v.20, n.5-6, p.1035–1051, 2002.
- [117] TEJO, F. A. F.; CONFORTI, E. ; ROCHA, C. S. *Desenvolvimento de um Protótipo de Forno a Microondas para Fins Domésticos e Comerciais*, 1976. Projeto Tecnológico.
- [118] UNITED NATIONS. Disponível em <www.un.org>, acesso em 15 de março de 2008.
- [119] USDA (United Nations Department of Agriculture), 1999. *World Soybean Production*, Disponível em <<http://www.fas.usda.gov/WAP/circular/1999/99-05/soy.pdf>>, acesso em

26 de março de 2008.

- [120] USDA (United Nations Department of Agriculture), 2008. *World Agricultural Production*, Disponível em <<http://www.fas.usda.gov/wap/circular/2008/08-03/wapfull0308.pdf>>, acesso em 13 de março de 2008.
- [121] VALENTAS, K. J.; ROTSTEIN, E.; SINGH, R. P. *Handbook of Food Engineering Practice*. USA: Editora LLC. 718p. 1997.
- [122] VAN DER RIET, W.B.; WIGHT, A.W.; CILLIERS, J.J.L.; DATEL, J.M. Food Chemical Investigation of Tofu and Its Byproduct Okara. *Food Chemistry* v.34, n.3, p.193–202, 1989.
- [123] WACHRAPHANSKUL, S; DEVAHASTIN, S. Drying Kinetics and Quality of Soy Residue (Okara) Dried in a Jet Spouted-Bed Dryer. *Drying Technology*, v.23, n.6, 1229-1242p, 2005.
- [124] WACHIRAPHANSKUL S.; DEVAHASTIN, S. Drying kinetics and quality of Okara dried in a jet spouted bed of sorbent particles. *LWT – Food Science and Technology*, v.40, n.22, p.207-219, 2007.
- [125] WALISZEWSKI, K. N.; PARDIO, V.; CARREON, E. Physiochemical and Sensory Properties of Corn Tortillas Made from Nixtamalized Corn Flour Fortified With Spent Soymilk Residue (Okara). *Journal of Food Science*, v. 67, n.8, p.3194-3197, 2002.
- [126] WEBB, P.; ORR, C. *Analytical methods in fine particle technology*. USA: Micromeritics Instrument Corporation, 1997.
- [127] YOUNG, V. R.; PELLETT, P. L. Plant proteins in relation to human protein and amino acid nutrition. *American Journal of Clinical Nutrition*. v.59, n.5 (Suppl), p.1203-1212. 1994.
- [128] ZULKE, K. R. *Secagem em Leito de Jorro com Aeração Auxiliar na Região Anular*. São Carlos: Faculdade de Engenharia Química, UFSCar, 1988. Tese (Mestrado).

ANEXO A

Densidade energética da secagem no secador de cilindro rotativo com aplicação de microondas para o experimento 9 (ponto central)

Dados de entrada:

Umidade inicial % (b.s) [U _o]	: 150 (entrada)
Umidade final % (b.s) [U _f]	: 8,436 (saída)
Temperatura do ar de secagem	: 70 °C
Potência nominal das microondas	: 1200 W
Vazão mássica de entrada [M _{oe}]	: 1,92 kg/h (inicial)
Vazão mássica de saída [M _{os}]	: 0,838 kg/h (final)

Segundo ALAM e SHOVE (1973), o Cp da soja (Cps) é calculada pela Equação (A.1).

$$Cps = 0,39123 + 0,0046057.U\% \text{ [cal/g.}^\circ\text{C]} \quad (A.1)$$

Onde : U% é umidade do produto em base seca.

Calcula-se o Cps da entrada do material

Na entrada Cps = 1,082085 cal/g.°C = 4,539608 kJ/kg.°C

Através da equação (A.2), Calcula-se a parcela de potência relativa ao aquecimento do Okara:

$$P_{Cp} = M_{oe}.Cps.(T_{ar \text{ quente}} - T_{ambiente}) \quad (A.2)$$

Onde : M_{oe} é a vazão mássica de Okara úmido na entrada.
Cp é calculado na entrada.
T é temperatura.

$$P_{Cp} = (1,92\text{kg/h}).(4,5396 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C})(70^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})=391,36\text{kJ/h}=108,72\text{W}$$

Segundo ALAM e SHOVE (1973), o calor latente da umidade da soja (Cl_s) é calculada pela Equação (A.3):

$$Cl_s = 539 . (1+0,21624.e^{-0,06233U\%}) \text{ [cal/g]} \quad (A.3)$$

Onde : U% é umidade do produto em base seca.

Determinado o valor da Equação (A.3) pela umidade na entrada obteve-se Cl_s = 539,01 cal/g e pela umidade na saída Cl_s = 607,89 cal/g, podendo-se calcular o calor latente médio igual a Cl_{s médio} = 573.45 cal/g = 2400 kJ/kg.

Através da Equação (A.4) calcula-se a parcela de potência relativa à evaporação da umidade do Okara:

$$P_{Cl} = Cl_{s_{\text{m\u00e9dio}}} \cdot (M_{oe} - M_{os}) \quad (\text{A.4})$$

Onde : M_{oe} \u00e9 a vaz\u00e3o m\u00e1ssica de Okara na entrada;
 M_{os} \u00e9 a vaz\u00e3o m\u00e1ssica de Okara na sa\u00edda;
 $Cl_{s_{\text{m\u00e9dio}}}$ \u00e9 calor latente m\u00e9dio.

$$P_{Cl} = (2400 \text{ kJ/kg}) \cdot (1,92\text{kg/h} - 0,838\text{kg/h}) = 2597,3 \text{ kJ/h} = 721,47\text{W}$$

Foi determinada a potencia real pela soma da P_{Cp} mais P_{Cl} igual a $P_{\text{real}}=830,18\text{W}$. Para determinar a efici\u00eancia da energia transferida para o material, aplicamos a Equa\u00e7\u00e3o (A.5).

$$\text{Efici\u00eancia (\%)} = \text{Pot\u00eancia real} \times 100 / \text{Pot\u00eancia nominal} \quad (\text{A.5})$$

$$\text{Efici\u00eancia (\%)} = 830,18\text{W} \times 100 / 1200\text{W} = 69,18\%$$

Para determinar a densidade de pot\u00eancia, divide-se a pot\u00eancia real pela vaz\u00e3o m\u00e1ssica inicial de entrada. Neste experimento 9 (ponto central), a densidade de pot\u00eancia foi igual a $830,18\text{W}/1,92\text{kg/h}=432,39\text{Wh/kg}$.

ANEXO B

Densidade energética da secagem no secador de forno de microondas adaptado para o experimento 9 (ponto central)

Dados de entrada:

Umidade inicial % (b.s)	: 150
Umidade final % (b.s)	: 8
Temperatura do ar de secagem	: 70 °C
Potência nominal das microondas	: 200 W
Tempo de secagem	: 57 min
Massa de entrada (m _e)	: 0,275 kg
Massa de saída (m _s)	: 0,119 kg

Segundo ALAM e SHOVE (1973), o Cp da soja (Cps) é calculada pela Equação (B.1).

$$Cps = 0,39123 + 0,0046057.U\% \text{ [cal/g.}^\circ\text{C]} \quad (\text{B.1})$$

Onde : U% é umidade do produto em base seca.

Calcula-se o Cps da entrada do material, que resulta em

$$Cps = 1,082085 \text{ cal/g.}^\circ\text{C} = 4,529608 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C}$$

Através da equação (B.2), obtém-se a parcela de potência que relativa ao aquecimento de Okara:

$$P_{Cp} = m_e.Cps.(T_{ar \text{ quente}} - T_{ambiente}).(60/t_{sec}) \quad (\text{B.2})$$

Onde : m é massa de Okara úmido.
Cp é calculado na entrada [kJ/kg]
T é temperatura [°C]
t_{sec} = tempo de secagem [min]

$$P_{Cp} = (0,275\text{kg}).(4,5296 \text{ kJ/kg.}^\circ\text{C})(70^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}).(60/57) = 59,00 \text{ kJ/h} = 16,39\text{W}$$

Aplicando a Equação (B.3) determinamos os calores latentes da massa inicial e da massa final:

$$Cl_s = 539 . (1 + 0,21624.e^{-0,06233U\%}) \text{ [cal/g]} \quad (\text{B.3})$$

Onde : U% é umidade do produto em base seca.

Em seguida obtém-se o valores respectivos da Equação (B.3) na entrada Cl_{s inicial} = 539,01 cal/g e na saída Cl_{s final} = 609,79 kJ/kg e pode-se calcular o calor latente médio igual a Cl_{s médio} = 574,40 cal/g = 2404,44 kJ/kg . Através da Equação (B.4) calcula-se a parcela de potência relativa à evaporação da umidade do Okara:

$$P_{Cl} = Cl_{s\text{médio}} \cdot (m_e - m_s) \cdot (60/t_{\text{sec}}) \quad (\text{B.4})$$

Onde : m_e é a massa de entrada do Okara;
 m_s é a massa de saída do Okara;
 $Cl_{s\text{médio}}$ é calor latente médio.
 t_{sec} = tempo de secagem (min)

$$P_{Cl} = (2404,44 \text{ kJ/kg}) \cdot (0,275\text{kg} - 0,119\text{kg}) \cdot (60/57) = 394,83 \text{ kJ/h} = 109,7\text{W}$$

Resultando numa energia real consumida igual a 453,83kJ/h.=126,06W

Para determinar a eficiência da energia transferida para o material, aplicamos a Equação (B.5)

$$\text{Eficiência (\%)} = \text{Potência real} \times 100 / \text{Potência nominal} \quad (\text{B.5})$$

$$\text{Eficiência (\%)} = 126,06\text{W} \times 100 / 200\text{W} = 63,03\%$$

Para determinar a densidade de potência, multiplica-se a potência real pelo tempo de secagem e divide-se pela massa inicial de entrada, Neste experimento 9 (ponto central), a densidade de potência foi igual a $(126,06\text{W}) \cdot (57/60\text{h}) / (0,275\text{kg}) = 435,48\text{Wh/kg}$.