

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS**

**ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO
PAPAYA (*Carica papaya* L.) EM SECADOR
CONVECTIVO HORIZONTAL E LEITO DE JORRO E A
INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE ÓLEO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DANIEL PADOIN CHIELLE

**Santa Maria, RS, Brasil
2014**

**ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO
PAPAYA (Carica papaya L.) EM SECADOR CONVECTIVO
HORIZONTAL E LEITO DE JORRO E A INFLUÊNCIA NA
EXTRAÇÃO DE ÓLEO**

Daniel Padoin Chielle

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia de Processos**.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo H. Tanabe
Co-orientador: Prof. Dr. Lucas Meili

Santa Maria, RS, Brasil
2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Padoin Chielle, Daniel

ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO PAPAYA (Carica papaya L.) EM SECADOR CONVECTIVO HORIZONTAL E LEITO DE JORRO E A INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE ÓLEO / Daniel Padoin Chielle.-2014.

147 p.; 30cm

Orientador: Eduardo Hiromitsu Tanabe

Coorientador: Lucas Meili

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, RS, 2014

1. Secagem 2. Fluidodinâmica 3. Sementes de mamão 4. Óleo 5. Ácidos graxos I. Hiromitsu Tanabe, Eduardo II. Meili, Lucas III. Título.

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação de Mestrado

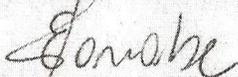
**ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO PAPAYA
(Carica papaya L.) EM SECADOR CONVECTIVO HORIZONTAL E
LEITO DE JORRO E A INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE ÓLEO**

elaborada por

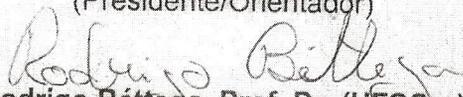
Daniel Padoin Chielle

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia de Processos

COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Eduardo H. Tanabe
(Presidente/Orientador)



Rodrigo Béttega. Prof. Dr. (UFSCar)



Raquel Cristine Kuhn. Prof. Dr (UFSM)

Santa Maria, 28 de março de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha avó materna,
in memoriam, Ilba Catharina Zamberlan Padoin,
por demonstrar que com fé tudo é possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por, de alguma maneira, nos auxiliar em nossas escolhas.

Agradeço a meus pais, Zeferino Genesio Chielle e Maria Clara Padoin Chielle e a meus irmãos, Saulo e Jonas, pelos eternos ensinamentos sobre a vida e por sempre estarem presentes, com amor e dedicação, não importando a dificuldade.

Agradeço à Priscila Gularte Padoin, minha namorada, principalmente pela compreensão e por todo o amor e motivação.

Agradeço a todos os colegas do mestrado e grandes amigos, pelos vários e grandes momentos de alegria ao longo dos últimos dois anos.

Agradeço aos alunos de iniciação científica, Daliomar, Bianca, Taís e Lilian, por todo o auxílio durante os longos períodos de trabalho e pela excelente convivência.

Ao professor Roger Wagner e a aluna Raquel Vendruscolo, do curso de Tecnologia em Alimentos, da Universidade Federal de Santa Maria, pelas análises químicas realizadas.

Agradeço, em especial, aos professores Lucas Meili e Eduardo H. Tanabe, por toda a compreensão, orientação e empenho ao longo do mestrado.

Agradeço aos demais Professores e técnicos do PPGEPro pelo apoio e amizade.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Ministério da Educação) pela bolsa de incentivo à pesquisa e a FAPERGS (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado do Rio grande do Sul) pelos recursos para aquisição de materiais e equipamentos.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO DA SECAGEM DE SEMENTES DE MAMÃO PAPAYA (*Carica papaya*) EM SECADOR CONVECTIVO HORIZONTAL E LEITO DE JORRO E A INFLUÊNCIA NA EXTRAÇÃO DE ÓLEO

AUTOR: DANIEL PADOIN CHIELLE

ORIENTADOR: EDUARDO H. TANABE

COORIENTADOR: LUCAS MEILI

Data e Local de Defesa: Santa Maria, 28 de março de 2014.

Durante o processamento do mamão, 50% da fruta é descartada, entre casca e sementes. A cavidade central do fruto contém 15% do peso do fruto em sementes, as quais são possíveis fontes de produtos de alto valor agregado. As sementes, em geral descartadas, possuem alto teor de umidade e um alto teor em óleo, assim favorecendo a produção de óleos comestíveis, essenciais ou biocombustíveis. Partindo desta hipótese, o objetivo do trabalho foi o de estudar a secagem de sementes de mamão em secador convectivo horizontal e secador leito de jorro, verificar a influência das variáveis controladas em cada equipamento na redução da umidade, no rendimento de óleo e a influência sobre o perfil de ácidos graxos. As variáveis controladas foram a temperatura (T) e a velocidade (U) (min. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 m s^{-1} e máx. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 m s^{-1}) para o secador convectivo e para o leito de jorro, a temperatura, a velocidade e o tempo de secagem (t) (mín. $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,1U_{mj}\text{ m s}^{-1}$ e 0,5 horas; máx. $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,4U_{mj}\text{ m s}^{-1}$ e 4 horas) utilizando Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Os resultados mostraram que para secador convectivo horizontal, a menor umidade (6% b.u.) foi obtida com $T=91\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $U=1,29\text{ m s}^{-1}$ e o melhor rendimento de óleo (19,23%) com $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $U=2\text{ m s}^{-1}$. Para o secador leito de jorro, a menor umidade foi de (2,4% b.u.) com $T=87,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U=1,34U_{mj}\text{ m s}^{-1}$ e $t=3,29$ horas e o melhor rendimento de óleo (26,50%) com $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $U=1,25U_{mj}$ e $t=4$ horas. Não houve alteração significativa na composição de ácidos graxos entre os experimentos em ambos os secadores.

ABSTRACT

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos
Universidade Federal de Santa Maria

PAPAYA SEEDS DRYING STUDY IN HORIZONTAL CONVECTIVE AND SPOUTED BED DRYERS AND THE INFLUENCE ON EXTRACTION OIL

AUTHOR: DANIEL PADOIN CHIELLE

ADVISOR: EDUARDO H. TANABE

CO ADVISOR: LUCAS MEILI

Date and presentation place: Santa Maria, 28 de março de 2014.

During the papaya processing, 50% of the fruit is discarded as peel and seeds. The fruit central cavity contains 15% of fruit weight in seeds, which are potential products sources of high added value. The seeds, generally discarded, have high moisture content and high amount of oil, thus favoring the production of edible or essential oil or even biofuels. Based on this hypothesis, the aims of this study was to study the drying papaya seeds process in a horizontal convective dryer and spouted bed dryer, verify the controlled variables influence in each equipment on moisture reduction, oil yield and the influence over the fatty acid profile. The controlled variables were: temperature (T), speed (U) (min. 40 °C, 1 m s⁻¹ and máx. 100 °C, 3 m s⁻¹) to the convective dryer, and for the spouted bed dryer was temperature, speed and drying time (t) (min. 40 °C, 1,1Umj m s⁻¹e 0,5 hours; max. 100 °C, 1,4Umj m s⁻¹ e 4 ours), using Central Compound Rotational Design (CCRD). The result showed that for horizontal convective dryer, the lowest moisture (6% b.u.) was obtained with com T=91 °C e U=1,29 m s⁻¹ and the oil yield (19,23%) with T=70 °C e U=2 m s⁻¹. To the spouted bed dryer the lowest moisture (2,4% b.u.) with T=87,9 °C, U=1,34Umj m s⁻¹ e t=3,29 hours and oil yield (26,50%) with com T=70 °C, U=1,25Umj e t=4 hours. There was not significant change on fatty acid compound between the experiments in both dryers.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos empíricos de cinéticas de secagem.	33
Tabela 2 – DCCR com variáveis codificadas para secagem do secador convectivo horizontal.	51
Tabela 3 – DCCR com variáveis codificadas para determinação de quantidade de massa de sementes e volume de solvente.	53
Tabela 4 – DCCR com variáveis codificadas para leite de jorro.	59
Tabela 5 - Resultado dos ajustes dos parâmetros e as análises estatísticas de cada modelo no DCCR.	70
Tabela 6 – Resultados da umidade final das sementes obtidas no DCCR.	72
Tabela 7 – Coeficientes de regressão para umidade final das sementes de mamão.	73
Tabela 8 – Tabelas ANOVA para Umidade.	74
Tabela 9 - Rendimento de óleo obtido através da variação de solvente e massa da amostra.	75
Tabela 10 – Resultados do rendimento de óleo das sementes secas obtidas no DCCR.	76
Tabela 11 – Coeficientes de regressão para rendimento de óleo das sementes secas de mamão.	77
Tabela 12 – Tabela ANOVA para rendimento de óleo.	78
Tabela 13 – Erro Absoluto e Erro relativo do modelo para previsão do rendimento de óleo.	79
Tabela 14 – Composição de ácido graxo do óleo extraído das sementes secas a 70°C e velocidade de 2 m s ⁻¹	81
Tabela 15 – Resultados da umidade final das sementes (b.u.) obtidas no DCCR. ..	90
Tabela 16 – Coeficientes de regressão para umidade final das sementes de mamão (b.u.).	90
Tabela 17 – Coeficientes de regressão reparametrizados para umidade final das sementes de mamão (b.u.).	92
Tabela 18 – Tabela ANOVA para umidade final em % (b.u.).	92
Tabela 19 – Erro Absoluto e Erro relativo do modelo para previsão da umidade final.	94

Tabela 20 – Valores experimentais obtidos no DCCR para o Rendimento de óleo extraído das sementes.	95
Tabela 21 – Coeficientes de regressão para rendimento de óleo extraído das sementes de mamão secas.	96
Tabela 22 – Coeficientes de regressão para rendimento de óleo extraído das sementes de mamão secas.	97
Tabela 23 – Tabela ANOVA para rendimento.98 Tabela 24 - Erro Absoluto e Erro relativo do modelo para previsão do rendimento de óleo das sementes secas em leito de jorro.	99
Tabela 25 – Composição de ácidos graxos das sementes secas a 70°C, velocidade de 10,5 m s ⁻¹ e tempo de 4 horas.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição das sementes de mamão. Fonte: Autor (2014).	23
Quadro 2 - Propriedades do óleo de semente de mamão. Fonte: adaptado Melo (2010).	24
Quadro 3 - Propriedades físico-químicas do óleo de semente de mamão. Fonte: Malacrida (2011).	25
Quadro 4 - Composição dos ácidos graxos do óleo de semente de mamão e as temperaturas de secagem das sementes. Fonte: adaptado Melo (2010)	25
Quadro 5 - Alguns tóxicos das sementes de mamão. Fonte: Marfo (1986).	27
Quadro 6 - Valores dos pontos axiais conforme o número de fatores. Fonte: Rodrigues e lemma (2009).....	43
Quadro 7 - Valores médios obtidos para a caracterização das sementes in natura. Fonte: Autor (2014)	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mamão com sementes. Fonte: Adaptado Carlesso (2009).....	19
Figura 2 - Vista externa da Semente de mamão in natura a) com a exotesta, b) sem a exotesta. Fonte: Melo (2010).	22
Figura 3 - Corte longitudinal da semente de mamão com as devidas caracterizações. Fonte: Santos (2009).....	22
Figura 4 - Variação da umidade em função do tempo. Fonte: Costa (2012).....	30
Figura 5 - Taxa de secagem em função do teor de umidade. Fonte: Costa (2012).	31
Figura 6 - Regiões características do leito de jorro. Fonte: Lima (2004).	38
Figura 7 - Curva fluidodinâmica genérica – Perda de Carga x Velocidade. Fonte: Lima (2004).....	39
Figura 8 - Representação do delineamento do composto central rotacional. Fonte: Rodrigues e lemma (2009).....	42
Figura 9 - Sementes sendo pré-tratadas. Fonte: Autor (2014).....	45
Figura 10 - Três principais dimensões das sementes onde eixo x é o comprimento, eixo y é largura e o eixo z é altura. Fonte: Adaptado de Mohseni (1980)	47
Figura 11 - Analisador de umidade por infravermelho. Fonte: Autor (2014).....	48
Figura 12 - Esquema do secador convectivo horizontal. Fonte: Autor (2014).	48
Figura 13 – Secador convectivo horizontal utilizado para os experimentos. Fonte: Autor (2014).....	49
Figura 14 – Balança para pesagens do secador convectivo horizontal. Fonte: Autor (2014)	49
Figura 15 – Recipiente utilizado para a secagem das sementes. Fonte: Autor (2014)	50
Figura 16 - Extração por percolação com agitação magnética. Fonte: Autor (2014)	53
Figura 17 - Evaporador rotativo. Fonte: Autor (2014).	54
Figura 18 - Esquema secador leito de jorro. Fonte: Autor (2014).	55
Figura 19 - Unidade experimental de leito de jorro. Fonte: Autor (2014).....	55
Figura 20 - Manômetro tipo “U”. Fonte: Autor (2014).....	57
Figura 21 - Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios realizados em túnel de vento a temperatura de 70 °C e velocidade de 2 m s ⁻¹ . Fonte: Autor (2014).....	64

Figura 22 – Taxa de secagem em função do adimensional de umidade no ponto central, temperatura 70 °C velocidade de 2 m s ⁻¹ . Fonte: Autor (2014)	65
Figura 23 - Adimensional de umidade em função do tempo com velocidade de 2 m s ⁻¹ . Fonte: Autor (2014)	66
Figura 24 - Adimensional de umidade em função do tempo; com temperatura de 70 °C. Fonte: Autor (2014)	67
Figura 25 - Adimensional de umidade em função do tempo; temperatura de 91 °C. Fonte: Autor (2014).	67
Figura 26 - Adimensional de umidade em função do tempo; temperatura de 49 °C. Fonte: Autor (2014)	68
Figura 27 – Modelos Ajustados para os dados experimentais para ensaios 9,10 e 11, Temperatura de secagem de 70 °C e velocidade de 2 m s-1. Fonte: Autor (2014).	71
Figura 28 – Distribuição dos resíduos dos modelos a) Lewis, b) Overhults, c) Exponencial com dois termos e d) Aproximação da Difusão, no ponto central T= 70 °C e U=2 m s-1. Fonte: Autor (2014)	71
Figura 29 – Gráfico de pareto para o modelo da umidade final das sementes de mamão secas em secador convectivo horizontal. Fonte: Autor (2014).....	73
Figura 30 – Gráfico de pareto referente ao rendimento de óleo das sementes de mamão conforme o DCCR. Fonte: Autor (2014).	77
Figura 31 – Superfície de resposta para o rendimento de óleo obtido nas faixas experimentais de temperatura e velocidade. Fonte: Autor (2014).	79
Figura 32 – Adimensional de pressão no leito de jorro em função do tempo, Ensaio 15, 16 e 17; U 10,5 m s-1; T 70°C e tempo de 2,25 h. Fonte: Autor (2014).....	82
Figura 33 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de U, Ensaio 12 (a) e 15 (b): (a) U 11,76 m s-1; T 70 °C e t 2,25 h; (b) U 10,5 m s-1; T 70 °C e t 2,25 h. Fonte: Autor (2014).....	83
Figura 34 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de T, Ensaio 7 (a) e 8 (b); (a) U 11,25 m s-1; T 52,1 °C e t 3,29 h; (b) U 11,25 m s-1; T 87,9 °C e t 3,29 h. Fonte: Autor (2014).....	84
Figura 35 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 15, 16 e 17; U 10,5 m s-1; T 70°C e tempo de 2,25 h. Fonte: Autor (2014).....	86

Figura 36 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 9: U 10,5 m s ⁻¹ ; T 40°C e tempo de 2,25 h. Ensaio 10: U 10,5 m s ⁻¹ ; T 100 °C e tempo de 2,25 h. Fonte: autor (2014).....	87
Figura 37 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 11: U 9,24 m s ⁻¹ ; T 70°C e tempo de 2,25 h. Ensaio 12: U 11,76 m s ⁻¹ ; T 70 °C e tempo de 2,25 h. Fonte: Autor (2014).	88
Figura 38 – Gráfico de pareto para a variável umidade final das sementes. Fonte: Autor (2014).....	91
Figura 39 – Superfície de resposta para a umidade (b.u.) obtida nas faixas experimentais de temperatura e tempo, com a velocidade fixada no ponto central. Fonte: Autor (2014).....	94
Figura 40 – Gráfico de pareto referente a rendimento de óleo obtido em leito de jorro. Fonte: Autor (2014).....	96
Figura 41 – Superfície de resposta para rendimento (%) obtido nas faixas experimentais de velocidade e tempo, com a temperatura fixada no ponto central. Fonte: Autor (2014).....	100
Figura 42 – Superfície de resposta para rendimento (%) obtido nas faixas experimentais de temperatura e tempo, com a velocidade fixada no ponto central. Fonte: Autor (2014).....	100
Figura 43 – Superfície de resposta para rendimento (%) obtido nas faixas experimentais de temperatura e velocidade, com tempo fixado no ponto central. Autor (2014).....	101

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
OBJETIVO GERAL.....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.1. Origem, classificação botânica e cultivo do mamão	18
1.2. Sementes	21
1.2.1. Características gerais.....	21
1.2.2. Óleo da semente de mamão.....	23
1.3. Secagem	28
1.4. Cinética de secagem	29
1.5. Secador Convectivo	35
1.6. Leito de Jorro	36
1.7. Secagem de sementes de mamão.....	40
1.8. Planejamento experimental	41
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	45
2.1. Matéria-prima.....	45
2.2. Caracterização física e umidade	46
2.2.1. Diâmetro médio de Sauter.....	46
2.2.2. Esfericidade	46
2.2.3. Densidade aparente.....	47
2.2.4. Umidade	47
2.3. Secagem em secador convectivo horizontal.....	48
2.3.1. Planejamento experimental.....	50
2.3.2. Operação do equipamento.....	51
2.3.3. Cinética de secagem	52
2.3.4. Umidade e rendimento de óleo das sementes após secagem	52
2.4. Secagem em leito de jorro	54
2.4.1. Pré-secagem das sementes	57
2.4.2. Velocidade mínima de jorro (U_{mj}).....	57
2.4.3. Planejamento experimental.....	58
2.4.4. Operação do equipamento.....	58
2.4.5. Umidade e rendimento de óleo das sementes após secagem em leito de jorro.....	60
2.5. Análise dos Ácidos Graxos do óleo de sementes de mamão	60

2.5.1. Derivatização dos Triacilgliceróis	60
2.5.2. Perfil de ácidos graxos.....	61
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
3.1. Caracterização das Sementes <i>in natura</i>	62
3.2. Secagem	63
3.2.1. Secador convectivo horizontal	63
3.2.2. Cinética de secagem	69
3.2.3. Análise do DCCR para umidade das sementes	72
3.2.4. Extração do óleo.....	75
3.2.5. Análise do DCCR para o rendimento de óleo das sementes de mamão	76
3.3. Secador leito de jorro.....	81
3.3.1. Fluidodinâmica das sementes de mamão.....	81
3.3.1.1. Velocidade Mínima de Jorro (U_{mj})	81
3.3.1.2. Análise da fluidodinâmica do leito de jorro	81
3.3.2. Análise da secagem através do adimensional da umidade relativa	85
3.3.3. Análise da umidade final do produto através do DCCR.....	89
3.3.4. Análise do rendimento de óleo das sementes através do DCCR	95
4. CONCLUSÃO	103
4.1. Secador Convectivo Horizontal	103
4.2. Secador Leito de Jorro.....	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
APÊNDICE	118
APÊNDICE A	118
APÊNDICE B	120
APÊNDICE C	122
APÊNDICE D	124
APÊNDICE E	127

INTRODUÇÃO

O mamoeiro é uma das frutíferas mais comuns em quase todos os países da América tropical, sendo uma das mais cultivadas e consumidas nas regiões tropicais e subtropicais do mundo. De acordo com a (FAO 2011), 10% da produção mundial de frutas tropicais é representada pela cultura do mamão, com cerca de oito milhões de toneladas, das quais 39% são produzidas na América Latina e Caribe. O Brasil é o segundo maior produtor, com 1,8 milhões toneladas em uma área de 35 mil ha no ano de 2011. O volume de exportação foi de 27.057 toneladas, com uma arrecadação em exportação de 35.122 milhões de dólares no ano de 2010 (AGRIANUAL, 2012). A maior parte da produção fica para o consumo interno (86,5%), sendo apenas o fruto aproveitado (MELO, 2010). No seu processamento ou até mesmo em seu consumo *in natura*, em torno de 50% da matéria-prima é descartada, consistindo em casca e sementes, possíveis fontes de produtos de alto valor agregado. Dos resíduos sólidos gerados ao consumir ou processar o fruto de mamão, entre 15 a 20% do seu peso é composto pelas sementes (PAQUES 2006). As sementes são totalmente descartadas e estas apresentam diversas características interessantes que tornam favoráveis o seu processamento. Uma destas características é o alto teor em óleo: (25%), (22,45%) e (30,78%), de acordo, com Winayanuwattikun, Kaewpiboon et al. (2008), Silva (2007) e Puangsri, Abdulkarim et al. (2005), respectivamente, demonstrando que as mesmas podem ser utilizadas para a produção de óleos comestíveis, essenciais ou biocombustíveis. As sementes também apresentam uma quantidade considerável de glicosinolatos, precursores do isotiocianato de benzila, o qual apresenta atividades anti-carcinogênicas, anti-helmínticas e anti-inflamatórias (PAQUES, 2006).

A semente possui teor de umidade muito elevada, com valores entre 70 a 80% (b.u.). A redução do teor de umidade das sementes torna-se uma operação imprescindível, pois permite efetuar o processamento deste produto por um maior período de tempo sem que esta sofra alterações nas suas características.

A secagem é uma operação unitária utilizada em produtos perecíveis, com o intuito de aumentar a vida útil do material, diminuir o custo de armazenamento e transporte e conservar os constituintes químicos e minerais dos mesmos. Porém, se a secagem for realizada de forma inadequada, pode proporcionar a deterioração dos constituintes e nutrientes do produto submetido, acarretando em etapas seguintes de um processo. Com isso, é importante o conhecimento dos fenômenos envolvidos durante esta operação para auxiliar na uniformidade do produto final e na construção de equipamentos adequados ao produto a ser seco (COSTA, 2012).

Segundo Oliveira Jr. (2003), grande parte dos estudos sobre secadores é realizado em secadores de leito fixo com camada fina. Este equipamento tem a importância na obtenção de informações sobre materiais nos quais os comportamentos da cinética de secagem não são muito conhecidos. Esta metodologia torna possível obter informações relevantes sobre a influência das variáveis de processo nos fenômenos de transferência de calor e massa, uma vez que há um amplo controle das condições operacionais (PRADO, 1999).

Segundo Massarani (1997), o sistema de secagem de leito de jorro para grãos possui boa eficiência e um baixo custo de operação. O secador leito de jorro, de forma geral, é constituído por uma câmara de secagem cilíndrica conectada a uma base cônica, a qual possui em sua extremidade inferior um orifício de dimensão reduzida, através do qual o fluido de jorro é alimentado ao sistema, proporcionando um íntimo contato entre o fluido e as partículas (PALLAI; SZENTMARJAY; MUJUMDAR, 1995).

Tentando suprir a falta de informações decorrentes sobre a secagem das sementes de mamão e a interferência da secagem na obtenção do óleo, o presente trabalho visa estudar dois métodos de secagem e verificar a influência das variáveis de cada secador na obtenção do óleo extraído das sementes secas de mamão da variedade papaya.

OBJETIVO GERAL

O objetivo do presente trabalho foi estudar a secagem de sementes de mamão em secador convectivo horizontal e em secador leito de jorro, a fim de verificar a influência das variáveis controladas em cada equipamento na redução da umidade e no rendimento de óleo obtido das sementes de mamão secas, bem como na influência sobre o perfil de ácido graxos do óleo extraído.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o comportamento das sementes de mamão durante a operação de secagem conforme a variação da temperatura e da velocidade do ar em um secador convectivo horizontal.
- Ajustar os modelos empíricos propostos na literatura para os dados obtidos em um secador convectivo horizontal.
- Verificar a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem na umidade final e no rendimento de óleo em secador convectivo horizontal.
- Analisar a composição dos ácidos graxos e verificar as suas alterações ao variar a temperatura e a velocidade do ar de secagem.
- Analisar o comportamento fluidodinâmico das sementes de mamão em um secador de leito de jorro.
- Analisar a influência da temperatura, da velocidade do fluido e do tempo de permanência no leito de jorro na umidade final e no rendimento do óleo das sementes de mamão.
- Analisar o perfil de ácidos graxos conforme a variação da temperatura, da velocidade do fluido e do tempo de permanência em secador leito de jorro.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Origem, classificação botânica e cultivo do mamão

O mamoeiro cultivado comercialmente (*Carica papaya* L.) insere-se na classe Dicotyledoneae, subclasse Archichlamydeae, ordem Violales, subordem Caricineae, família Caricaceae e gênero *Carica* (QUINTAL, 2009).

É uma planta frutífera com sua origem na América do Sul, sendo posteriormente distribuída por todo o mundo tropical. Seu cultivo efetua-se em áreas com até 32° de Latitude Norte ou Sul nas quais a temperatura média anual é de 25°C, com limites entre 21°C e 33°C, precipitação pluviométrica de 1.500 mm anual bem distribuída e solo levemente ácido (pH 6,0 – 6,5) (LITZ, 1984; MEDINA, 1989).

A planta do mamão, apesar de comumente referida como uma "árvore", segundo Morton (1987), é propriamente uma grande erva que possui uma faixa de crescimento de 1,8 a 3 m no primeiro ano e pode chegar de 6 a 10 m de altura. O mamoeiro possui um caule cilíndrico, com 10 a 30 cm de diâmetro, herbáceo, fistuloso, ereto, de coloração verde-clara no ápice e verde acinzentada na base; no ápice possui uma coroa de folhas, dispostas de forma espiralada (MARIN e GOMES, 1986).

As folhas são caracterizadas por uma forma lanceolada, partidas em sete lóbulos oblongos, sinuosos ou lanceolados, com até 70 cm de diâmetro. As folhas têm aparência de lâminas ovais com estrias. Grande parte das variedades possui folhas com coloração verde-claro na face superior e verde pálido na face inferior, sendo a superfície revestida de material ceroso com a ausência de pelos. Possui pecíolo, fistuloso, oco, verde-pálido ou vermelho - vinho, geralmente de 50 a 70 cm de comprimento, podendo alcançar até um metro. A vida de uma folha é de 4 a 6 meses (MEDINA et al., 1989).

O mamoeiro tem um sistema radicular pivotante, ramificando-se de forma radial, de coloração branca cremosa, bem distribuído nos primeiros 30 cm do solo. As raízes podem se desenvolver até duas vezes a altura da planta, podendo explorar uma camada de solo com uma profundidade de até um metro (LUNA, 1986).

O fruto do mamoeiro é uma baga de forma variável, podendo ser arredondado, oblongo, alongado, cilíndrico e piriforme. A casca é bem fina e lisa, com coloração verde no seu desenvolvimento e amarelo-clara a alaranjada no final do seu desenvolvimento, protegendo uma polpa com espessura de 2,5 a 5 cm, cuja coloração pode variar entre amarelo a laranja-avermelhado. O fruto pode atingir até 50 cm de comprimento, 10 a 20 cm de espessura e pesar desde alguns gramas até 10 quilos (Figura 1) (QUINTAL, 2009).



Figura 1 - Mamão com sementes. Fonte: Adaptado Carlesso (2009).

Conforme descrito por Quintal (2009), a seguir são apresentadas as variedades de interesse comercial com base em trabalhos de Pereira et al., (2004), Dantas et al. (2002), Marin (1995) e Medina et al. (1989):

- Sunrise solo: procedente do Havaí. Planta precoce, frutos piriformes ou arredondados, com peso de 400 a 600 g, polpa laranja-avermelhada de excelente sabor, indicada para consumo *in natura*, podendo produzir 37 t/ha/ano. Possui casca lisa e firme e cavidade interna em forma de estrela. A produção inicia-se de 8 a 10 meses após o plantio.
- Tainung nº 1: frutos redondos ou alongados, polpa laranja-avermelhada, ótimo sabor, boa produtividade, aproximadamente 30,9 kg por planta e apresenta resistência ao transporte.
- Improved Sunrise Solo CV. 72/12: precoce (8 meses pós-plantio), produtivo, fruto piriforme a ovalado, aproximadamente 450 g de peso, polpa vermelho-alaranjada, produção abaixo da Sunrise Solo. Conhecido como mamão-havaí, apresenta resistência ao transporte e ao armazenamento.
- Baixinho de Santa Amália: porte baixo, com início da produção no oitavo mês após o plantio. Polpa vermelha alaranjada, pouco firme e peso médio de 550 g.

- Kapoho Solo: frutos com polpa firme, casca lisa, formato piriforme, coloração amarela e com peso de 380 a 520 g.
- Waimanalo: possui alta tolerância à podridão das raízes. Os frutos possuem casca lisa, fina e brilhante, são de excelente qualidade e de alto rendimento.
- Golden: possuem frutos piriformes, cor da polpa rosa salmão, cavidade interna estrelada, casca lisa, tamanho uniforme, peso médio de 450 g e excelente aspecto visual. Tem boa aceitação no mercado internacional, com teor de sólidos solúveis nos frutos e produtividade inferiores ao 'Sunrise Solo'.
- Taiwan: é uma linhagem da variedade Sunrise Solo, com porte mais baixo, alta produtividade e boa qualidade dos frutos colhidos no verão. Fruto com polpa vermelha alaranjada, peso médio de 400 a 600 g, formato piriforme a ovalado e cavidade interna estrelada.
- UENF/CALIMAN 01: híbrido do cruzamento entre uma variedade Formosa e uma variedade Solo. Fruto de cor verde, polpa avermelhada, com peso médio de 900 gramas, casca fina e ótimo sabor. Nos últimos anos tem tido um incremento de sua área de plantio, sendo cultivado em outros países, como México, Austrália e Costa Rica.

Em 2010, a produção mundial de mamão representava 10% da produção mundial de frutas tropicais, sendo que 39% foram produzidas na América Latina e Caribe. A produção mundial em 2013 foi de 11 milhões de toneladas, com uma área colhida de 421 mil ha (FAO, 2013). O Brasil é o segundo maior produtor mundial, produzindo, em 2011, 1,8 milhão de toneladas em aproximadamente 35 mil ha (SERRANO e CATTANEO; 2010, AGRIANUAL, 2012). Em 2008, o Brasil produziu 1,9 milhões com um valor da produção estimado em R\$ 1 bilhão e exportou cerca de 30 mil toneladas gerando uma receita de US\$ 38,6 milhões. A Comunidade Europeia e os Estados Unidos são os principais importadores do mamão brasileiro, representando 80% e 14%, respectivamente (SERRANO e CATTANEO; 2010).

O cultivo do fruto no Brasil possui uma grande importância econômica e social, pois a cultura do mamoeiro é uma grande geradora de emprego e renda, absorvendo mão de obra durante todo o ano, pela necessidade

constante de tratos culturais, colheita e comercialização, efetuadas de maneira contínua nas lavouras, além dos plantios serem renovados, em média, a cada três anos (BENASSI, 2006).

O cultivo do mamoeiro destina-se basicamente para a produção de frutos, visando seu consumo como fruta fresca, tanto no mercado nacional como no internacional. Vários produtos ou subprodutos poderiam ser obtidos a partir dos frutos como, por exemplo, doces, compotas, geleias, néctar e papaína, mas infelizmente poucos são explorados. No seu processamento ou até mesmo no seu consumo *in natura*, cerca de 50% da matéria-prima é descartada, consistindo em casca e sementes. Estes resíduos podem ser considerados possíveis fontes de produtos com bom valor agregado. Porém, não havendo o aproveitamento desses subprodutos ou resíduos, tanto da planta como do fruto, acabam tornando-se um grave problema ambiental e econômico (PAQUES e MACEDO, 2006).

1.2. Sementes

1.2.1. Características gerais

A caracterização da estrutura da semente do mamoeiro é pouco conhecida, levando muitas vezes a contradições em relação à terminologia das estruturas das sementes e também às características físicas.

As sementes do fruto são pequenas, redondas ou ovais, bem rugosas e recobertas por uma camada mucilagínosa chamada de exotesta (Figura 2). As sementes apresentam uma coloração que varia de acordo com as variedades (QUINTAL, 2009).

Segundo Santos (2009), foram feitas observações sobre as características da semente. Na Figura 3, é possível observar um corte longitudinal de uma semente: as protuberâncias possuem coloração marrom escuro na parte externa, constituindo a mesotesta (mest). A endotesta (ent) foi caracterizada por uma camada de coloração marrom claro. Na endotesta observa-se o tégmen (teg), caracterizado por uma camada de tonalidade bege. As camadas mesotesta, endotesta e tégmen constituem a estrutura do

tegumento que reveste o endosperma (end), eixo embrionário hipocótilo radícula (ex) e o cotilédone (cot).

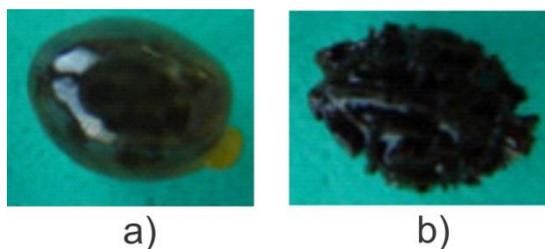


Figura 2 - Vista externa da semente de mamão in natura a) com a exotesta, b) sem a exotesta. Fonte: Melo (2010).

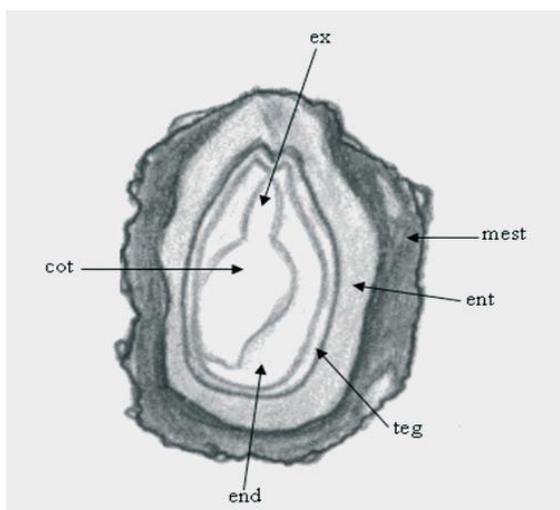


Figura 3 - Corte longitudinal da semente de mamão com as devidas caracterizações. Fonte: Santos (2009)

Um fruto pode produzir em torno de 1000 sementes. Um mamão, cultivar formosa, com peso de 1 a 2 kg, possui cerca de 600 a 700 sementes que pesam aproximadamente 8 g ao todo. Já os da variedade Havaí, com peso de 0,5 a 1 kg, contêm de 600 a 640 sementes que pesam 8 a 10 g (MELO, 2010).

Segundo Desai e Wagh (1995), a cavidade central do mamão contém grandes quantidades de sementes que compreendem em torno de 15% do peso úmido do fruto. No processamento do mamão, são removidas casca e sementes, o que pode representar uma perda de 50% de matéria-prima, ou seja, cerca de 2 800 ton/ano (PAQUES e MACEDO; 2006). Segundo Prado e Sartori (2000), as sementes possuem, em média, uma umidade entre 72 a 80% (b.u.).

Considerando a tendência mundial no que diz respeito ao uso de resíduos sólidos e agroindustriais como matérias-primas, a extração do óleo pode agregar valor econômico a uma grande quantidade de sementes que, geralmente, são descartadas. A extração e utilização de óleos vegetais, durante séculos, tem desempenhado um papel importante na produção de um grande número de produtos industriais e alimentícios (MALACRIDA, 2011).

1.2.2. Óleo da semente de mamão

As sementes de mamão caracterizam-se pelo alto teor de gordura e conteúdo em proteína, como pode ser evidenciado no Quadro 1, descrito por diversos autores.

Composição	Malacrida (2011)	Melo (2010)			Jorge e Malacrida (2008)		Silva et al. (2007)		Pereira (1985)		Marfo (1986)
	Formosa	Formosa	Havaí	Golden	Solo	Formosa	Verde	Maduro	Formosa	Comum	-
Umidade	6,43	7,8	6,88	6,5	8,4	8,6	14,29	13,2	12,3	12,3	6,2
Proteína	25,63	23,58	24,66	25,45	26,6	25,3	19,22	17,9	26,73	24,42	27,8
Lipídios	29,16	28,08	28,04	28,03	25,8	27,5	22,45	17,97	30,52	29,59	28,3
Cinzas	8,27	5,12	6,48	5,40	7,5	7,8	7,1	6,97	7,7	8,78	3,5
Fibras	30,51	19,19	16,07	16,24	29,2	28,2	14,58	28,89	19,9	20,8	22,6
Carboidratos		16,17	17,8	18,36	1,8	2,8	22,45	17,97	2,76	3,12	11,67

Quadro 1- Composição das sementes de mamão. Fonte: Autor (2014).

Pereira (1985) descreveu teores de lipídios elevados para as variedades Formosa e Solo, mesmo com as sementes apresentando um residual de umidade de respectivamente 12,3% e 13,2%.

A qualidade dos óleos pode ser influenciada em função do método de extração empregado, pois suas características bioativas podem ser alteradas. As características físico-químicas podem ser alteradas pelas condições operacionais empregadas na extração (ROBBERS et al., 1998). Os métodos de extração mais usuais são: extração por arraste a vapor, hidrodestilação, extração com solventes orgânicos, prensagem a frio e extração com CO₂ supercrítico. O método mais utilizado pela indústria para a extração de óleos

em grande escala ainda permanece sendo com a utilização de solventes orgânicos (SIMÕES et al., 2000; SEMEN e HIZIROGLU, 2005).

Conforme Melo (2010), no Quadro 2 é apresentado um resumo das características do óleo de mamão obtidas pela extração com solvente orgânico.

AUTORES	ÍNDICE DE REFRAÇÃO	ÍNDICE DE ACIDEZ	DENSIDADE	ÍNDICE DE SAPONIFICAÇÃO	ÍNDICE DE IODO
Loesecke; Nolte (1937)	1,4666 (20°C)	3,05	0,9091 (20 °C)	189,5	72,5
Asenjo; Goyco (1943)	1,4671 (20 °C)	2,69	0,9133	199	65,3
Subrahmanyam; Achaya (1957) apud Badami; Daulatabad (1967)	-	4	1,4623 (25 °C)	-	68,3
Badami; Daulatabad (1967)	-	-	-	201	67,3
Strocchi et al. (1977)	1,4670 (20 °C)	0,78; 0,88	-	187,2	68,8
Chan et al. (1978)	1,4627 (40 °C)	2,22	0,9130 (25 °C)	1,43	74,77
Marfo et al. (1986)	-	1,84	-	194	-
Puangrsi et al. (2005)	-	-	-	154,7	66
Winayanuwattikun et al. (2008)	-	-	-	202	75,6
Melo. (2010)	-	1	0,9059 (25 °C)	190,1	70,67

Quadro 2 - Propriedades do óleo de semente de mamão. Fonte: adaptado Melo (2010).

No Quadro 3, são apresentados os dados obtidos para óleo de mamão da variedade Formosa, analisados por Malacrida (2011).

O teor em óleo das sementes de mamão, em geral, é superior ao de algumas sementes oleaginosas, como a soja e o algodão, cujos teores estão em torno de 18 a 20% (MORETTO; FETT, 1989).

Característica	Valores
Índice de Refração (40 °C)	1,4581
Índice de Iodo (g l.100 g ⁻¹)	79,95
Índice de saponificação (mg KOH.g ⁻¹)	9640
Material insaponificável (%)	1,35
Ácido graxos livres (%)	1,27
Índice de Acidez (mg KOH.g ⁻¹)	2,53
Índice de Peróxido (mEq.Kg ⁻¹)	5,37
Estabilidade Oxidativa	77,97

Quadro 3 - Propriedades físico-químicas do óleo de semente de mamão. Fonte: Malacrida (2011).

A determinação da composição de ácidos graxos de um óleo vegetal é um dado importante, pois ele deve ser compatível ao objetivo de uso industrial. Para que um óleo vegetal possa ser utilizado como alimento e/ou como combustível, deverá conter um teor adequado de ácidos graxos saturados e insaturados que permitam atender as especificações, tanto da indústria alimentícia quanto a de biocombustíveis (Melo, 2010).

No Quadro 4, é apresentada a composição de ácidos graxos do óleo extraído de semente de mamão.

Ácido graxo (%)	Marfo (1986) (60 °C)	Badami & Daulatabad (1967)	Chan et al (1978)	Pereira (1985)		Puan gsri et al. (2005)	Winaynu wattikun et al (2008)	Melo (2010) (56 °C)			Malacrida (2011)
				Solo	Comum			Formosa	Havaí	Golden	
Láurico C(12:0)	0,01	0,4	0,13	-	-	-	0,26	-	-	-	-
Mirístico C(14:0)	0,04	0,4	0,16	0,25	0,93	0,2	0,46	0,20	0,22	0,21	0,2
Palmitico C(16:0)	16,6	16,2	15,13	15,93	13,82	13,9	17,12	18,2	18,95	18,89	16,16
Palmitoleico C(16:1)	-	0,8	-	-	-	0,2	0,45	0,23	0,32	0,29	0,27
Margárico C(17:0)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13
Esteárico C(18:0)	1,9	5	3,61	3,94	3,81	4,9	2,98	5,3	5,07	5,20	4,73
Oleico C(18:1)	79,1	74,3	71,6	75,73	77,57	76,8	72,91	72,04	70,13	69,78	71,3
Linoleico C(18:2)	2,57	0,4	7,68	4,13	3,87	3	4,83	3,23	4,65	4,84	6,06
Linolênico C(18:3)	-	-	0,6	-	-	0,2	-	-	-	-	0,22
Araquidônico C(20:0)	-	0,9	0,87	-	-	0,4	0,67	0,39	0,35	0,41	0,38
Eicosenóico C(20:1)	-	-	-	-	-	0,3	-	0,41	0,32	0,38	0,32
Behênico C(22:0)	-	1,6	0,22	-	-	-	0,07	-	-	-	0,23

Quadro 4 - Composição dos ácidos graxos do óleo de semente de mamão e as temperaturas de secagem das sementes. Fonte: adaptado de Melo (2010)

A composição de ácidos graxos demonstra que os saturados mais comuns são o mirístico, palmítico e o esteárico e entre os insaturados o oleico e o linoleico. O oleico monoinsaturado é o majoritário, com uma percentual variável entre 71,60 a 79,1% entre todos os ácidos graxos, seguido do ácido palmítico, com um percentual variável entre 13,82 a 17,12%, do esteárico com teores entre 2,57 e 7,68% e do linoleico, em concentrações percentuais que variaram entre 3,0 e 4,83%. Já os ácidos Mirístico, palmitoléico, margárico, linolénico, araquidônico, eicosenoico e beénicos foram encontrados em quantidades pequenas. A composição de ácidos graxos do óleo de semente de mamão mostrou conteúdo semelhante ao do azeite de oliva, que tem 14% de ácido palmítico, 71% de oleico e 10% de linoleico (D'IMPERIO et al., 2007).

Observando a composição das sementes, esta se torna uma fonte de matéria-prima abundante, tanto no aproveitamento do óleo para uso alimentício como para a síntese do biodiesel.

Esta composição rica em ácido oleico é considerada ideal para seu consumo como alimento, pois reduz o teor de colesterol de forma eficiente, possivelmente aumentando a atividade dos receptores do LDL que carregam o colesterol ruim e não diminuem os níveis das lipoproteínas de alta densidade (HDL) carreadoras do colesterol bom (MATHERSON et al., 1996). Outra utilização para o óleo do mamão é em produtos para o cuidado da pele, óleos de banho, condicionadores de cabelo e maquiagem (MALACRIDA, 2011).

Inúmeros trabalhos têm demonstrado que o extrato de semente de mamão, obtido por extração aquosa ou com solventes orgânicos, apresenta um componente bioativo, o isotiocianato de benzila (DAR et al., 1965; ETTLINGER e HODGKINS, 1956; KRISHNAKUMARI e MAJUMDER, 1960; TANG, 1971). Segundo Marfo (1986), no óleo de semente de mamão há alta proporção deste composto, quando comparado a outros elementos tóxicos. A presença de isotiocianatos está em uma proporção de 0,03%, conforme demonstrado no Quadro 5. A presença desses elementos, em grande quantidade, é tóxica, podendo limitar a utilização no consumo por animais ou humanos. Marfo (1986) também afirma que o aproveitamento industrial da semente ou de seus subprodutos ainda não é difundido, pois não existem muitos estudos toxicológicos sobre a presença de fatores anti-nutricionais ou de substâncias tóxicas.

Composto	% semente desengordurada
Ácido fítico	3,04
Glicosinolatos	10
Taninos	6,35

Quadro 5 - Alguns tóxicos das sementes de mamão. Fonte: Marfo (1986).

Os isotiocianatos são obtidos a partir da conversão dos glicosinolatos pela ação da enzima mirosinase, a qual está presente no próprio vegetal ou na microflora do trato digestivo humano. Esta enzima inicia sua atividade pela injúria ou ação de fungos no tecido vegetal das plantas frescas (BONES; 1996). Os glicosinolatos (β -tioglicosídeo-N-hidroxissulfatos) ocorrem em 16 famílias de espécies vegetais, existindo, pelo menos, 120 estruturas diferentes identificadas em plantas (CASTRO et al., 2008). Diversos estudos demonstram que os vegetais possuem propriedades quimioprotetoras, as quais são atribuídas à ocorrência em baixas concentrações de certas substâncias como os glicosinolatos. O isotiocianato de benzila, formado a partir dos glicosinolatos, encontrado no mamão, quando administrado em dosagens baixas, tem ação inibidora no desenvolvimento de câncer de pâncreas (KERMANSIHAL et al.; 2001) e sobre o câncer de pulmão, aumentando a ocorrência de apoptoses das células cancerosas (KUANG E CHEN; 2004; D'AGOSTINI et al.; 2005). Além destas características, estudos laboratoriais confirmaram que várias preparações de sementes de mamão papaya podem matar, de forma efetiva, helmintos *in vitro* e *in vivo* (Robinson; 1958; Krishnakumari and Majumder, 1960; Dar et al., 1965; Lal et al., 1976; Kermanshahi; 2001), sendo o benzil isotiocianato o composto ativo responsável por tal característica.

Matsui (1980) apud Pereira (1985) observou que ratos alimentados com óleo cru apresentavam intoxicação aguda. Os animais alimentados com óleo refinado nada sofriam, concluindo o autor que produto tóxico teria sido eliminado no processo de refinação. No entanto, ficou uma lacuna quanto ao composto e concentração que poderia estar causando a intoxicação (MELO, 2010).

1.3. Secagem

De acordo com Silva e Casali (2000), a partir do momento da colheita das plantas, inicia-se um processo de degradação das substâncias ativas ou de interesse. Com isso, o processo de secagem promove a conservação das propriedades físicas e químicas durante um maior período de tempo, pois os teores elevados de água nas partes vegetais, além de permitirem a ação enzimática, também favorecem o desenvolvimento de micro-organismos, comprometendo sua qualidade (Farias, 2003; Corrêa et. al, 2004). Assim, a etapa de secagem permitirá a inibição da atividade enzimática e o desenvolvimento de micro-organismos, reduzindo custos com o armazenamento e o transporte.

O processo de secagem é uma operação presente em praticamente todos os setores industriais, comumente utilizado nas indústrias químicas, agrícolas e farmacêuticas. É uma das operações unitárias mais antigas praticadas (KUNDRA e MUJUMDAR, 2002). Ao se falar em secagem, aborda-se um assunto muito amplo e interdisciplinar, envolvendo um processo energético intenso (STRUMILLO e KUNDRA, 1986).

A secagem é um processo de transferência de calor e massa, baseado na remoção de líquidos voláteis que estão presentes na superfície ou no interior do sólido. A diferença de temperatura entre a superfície do material sólido e a fonte quente proporciona a transferência de calor e, simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água entre a superfície do material e o sorvedor de umidade promove a migração da umidade (COSTA, 2012, APUD SILVA, 2005).

Segundo McCormick (1983), a secagem normalmente é um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. De acordo com Mujundar (2004), a operação de secagem converte um semi-sólido em um sólido através da evaporação do líquido para uma fase através da aplicação de calor. Devido a enorme complexidade do processo de secagem, não existe uma teoria simples que possa ser utilizada para todos os materiais e equipamentos (GEANKOPLIS, 2003). Strumillo e Kudra (1986) demonstram que a análise teórica de projeto de secadores possui diversas complicações

devido a vários fatores, tais como transferências simultâneas de calor e massa para a superfície e para o interior do material, a hidrodinâmica do movimento da partícula no interior de equipamentos, características de alimentação e sistemas de limpeza do gás.

Segundo Park et al. (2007), no processo de secagem, a movimentação da água, do interior até a superfície do material, tem diferentes mecanismos de transferência de massa, sendo que os mais importantes são:

- **Difusão líquida:** movimentação do líquido decorrente do gradiente de concentração da umidade;
- **Difusão de vapor:** movimento da umidade por difusão de vapor decorrente da diferença de pressão do vapor provocada pela diferença de temperatura;
- **Escoamento capilar:** força resultante da diferença de pressão hidrostática e dos efeitos da tensão superficial.

Existe uma variedade de secadores de grãos no mercado, sendo em sua maioria secadores convectivos. Entre os secadores convectivos, os mais utilizados são os secadores de leito fixo, de leito deslizante, de fluxos cruzados. A escolha de um determinado secador é função das características do produto e de sua posterior utilização. São considerados os custos e as facilidades operacionais e a qualidade final do produto. Torna-se interessante a escolha de um secador que possua uma versatilidade para os mais variados tipos de produtos (MEDEIROS, 2004).

Entretanto, a exposição de plantas e grãos ao ar quente de secagem pode causar a degradação, devido a reações que causam modificação na cor e na decomposição de ingredientes ativos. Portanto, a secagem deve ser criteriosa e a definição de metodologias mais apropriada para cada espécie é necessária, visando assegurar os teores de substâncias ativas (CORRÊA et al, 2004).

1.4. Cinética de secagem

A cinética de secagem está associada às mudanças da umidade média do material e da sua temperatura média com o tempo. Através da cinética, será

possível calcular a quantidade de água evaporada, o tempo de secagem, a energia consumida, etc. As mudanças na quantidade de umidade, conforme o tempo, são consequência de parâmetros de processos como temperatura, umidade do ar, velocidade superficial do ar, entre outros (STRUMILLO e KUDRA; 1986).

A cinética de secagem pode ser determinada considerando-se uma curva obtida por meio de pesagens sucessivas, durante o tempo de permanência no equipamento, utilizando uma batelada de amostra inserida no secador, determinando-se, assim, a umidade perdida durante o processo (MEILI, 2009).

Nas Figuras 4 e 5, são mostrados exemplos de gráficos de conteúdo de umidade por tempo de secagem e taxa de secagem por conteúdo de umidade, respectivamente. Durante o processo de secagem, a curva apresenta períodos distintos, os quais são mostrados e descritos a seguir (PARK et al., 2007):

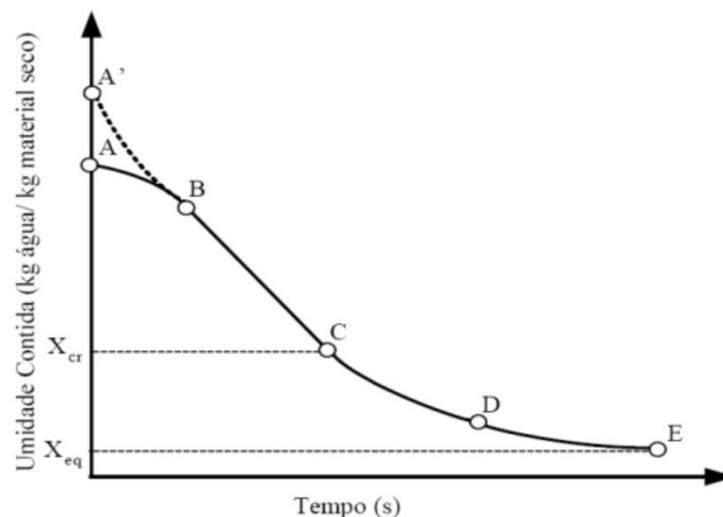


Figura 4 - Variação da umidade em função do tempo. Fonte: Costa (2012)

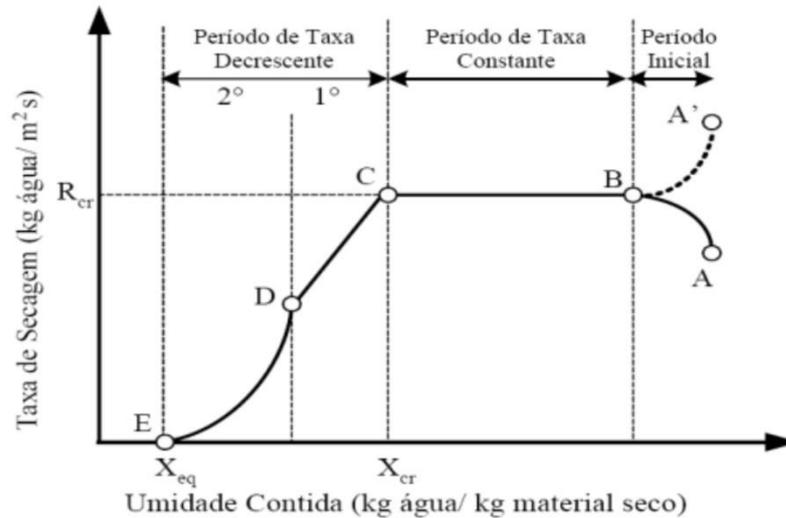


Figura 5 - Taxa de secagem em função do teor de umidade. Fonte: Costa (2012).

O período A-B é o tempo em que inicia a secagem. Nessa situação, o sólido encontra-se em temperatura menor que a temperatura do fluido. O calor fornecido pelo fluido proporciona o aumento da temperatura até a temperatura do bulbo úmido do ar. Do ponto B ao ponto C a taxa de secagem apresenta um comportamento linear, que é igual ao coeficiente angular da reta B-C. Neste ponto, o sólido está com a umidade tão elevada que o comportamento é de um filme contínuo de água na sua superfície, atuando como se o sólido não estivesse presente. Outra etapa é a (A'-B), quando a temperatura do sólido é inicialmente maior que a temperatura do fluido. Neste caso, a temperatura do sólido tende a diminuir até atingir a temperatura de bulbo úmido do ar e, após, tem o mesmo comportamento citado para A-B.

Após o ponto C, a taxa de secagem assume uma taxa decrescente até o ponto D. Neste período, a água existente na superfície é insuficiente para manter o filme contínuo de água. A superfície do sólido não está totalmente úmida e a área molhada diminui continuamente até ficar seca, sendo este período denominado de primeiro período de taxa decrescente. O segundo período de taxa decrescente tem início a partir no ponto D, quando a superfície está completamente seca e diminui até atingir o ponto E, em que a umidade de equilíbrio é atingida. O calor necessário à evaporação é transferido através do sólido para a zona de evaporação e, então, a água vaporizada se move através

do sólido até a corrente de ar. Em alguns materiais, a região CD pode desaparecer completamente (GEANKOPLIS, 2003).

Após o ponto E, o material atinge a umidade de equilíbrio (X_{eq}) e a taxa de secagem tende a zero. A umidade de equilíbrio é o teor de umidade que corresponde ao equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no ambiente, e este corresponde à umidade final que um produto pode alcançar em determinadas condições (BARROZO, 1995).

Segundo Oliveira Jr. (2003), grande parte dos estudos cinéticos são realizados em secadores de leito fixo de camada fina, cujo estudo cresce em importância quando se trata de materiais para os quais informações acerca de seu comportamento cinético são escassas. Utilizando-se esta metodologia, é possível obter-se informações relevantes sobre a influência das variáveis de processo nos fenômenos de transferência de calor e massa, uma vez que há um amplo controle das condições operacionais (PRADO, 1999).

Na secagem em camada delgada, a variação da temperatura dentro da câmara de secagem e do perfil do sólido é bastante reduzida, considerando-se assim um processo no qual a temperatura varia somente no tempo e não na posição (CHIRIFE, 1983).

Os modelos obtidos a partir da secagem em camada delgada contribuem para o conhecimento das características da secagem dos materiais. Os modelos de secagem em camada delgada podem ser distribuídos em três categorias principais, modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos (LAHSASNI et al., 2004).

Os modelos teórico, empíricos e semi-empíricos são equações propostas para representar a transferência de massa durante a secagem de produtos alimentícios, porém incluem as resistências de transferência de massa e calor e as características do material todas juntas em parâmetros simples. Além disto, são baseados apenas nas condições externas do processo, como a temperatura, a velocidade e a umidade do ar (CARLESSO et al., 2007; PRADO, 2004; MARTINAZZO, 2007; ZANOELO et al., 2007;).

Na Tabela 1, estão descritos os principais modelos matemáticos descritos na literatura.

Tabela 1 - Modelos empíricos de cinéticas de secagem.

Modelo	Referência	Equação
1	Lewis (Bruce; 1985)	$MR = \exp(-k \cdot t)$
2	Page (Page; 1949)	$MR = \exp(-k \cdot t^n)$
3	Overhults (Barrozo; 1995)	$MR = \exp[-(k \cdot t)^n]$
4	Henderson and Pabis (Henderson and Pabis; 1961)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t)$
5	Logarithmic (Togrul and Pehlivan; 2002)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$
6	Midilli (Midilli et al.; 2002)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$
7	Two terms (Henderson; 1974)	$MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_2 \cdot t)$
8	Exponential with two terms (Sharaf-Eldeen et al.; 1980)	$MR = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k \cdot a \cdot t)$
9	Approximation of diffusion (Yaldiz and Ertekin; 2001)	$MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + (1-a) \cdot \exp(-k_2 \cdot t)$
10	Henderson and Pabis Modified (Ertekin and Yaldiz; 2004)	$MR = a \cdot \exp(-k_1 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_2 \cdot t) + c \cdot \exp(-k_3 \cdot t)$

Fonte: Mocelin et al (2014).

Os modelos são descritos pela razão adimensional de umidade em função do tempo de secagem, conforme descrito na Equação 1. O adimensional de umidade é dado por MR, M é a umidade da amostra, M_{eq} é a umidade de equilíbrio e M_0 é a umidade inicial.

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (1)$$

Os modelos, em geral, podem representar satisfatoriamente a perda do conteúdo de umidade das sementes durante o período de secagem (BRUCE 1985; SOGI et al. 2003). Na Tabela 1, o modelo 1 representa um modelo exponencial simples, que se assemelha à cinética de primeira ordem. Nos modelos 2 e 3, uma vez que o ajuste do modelo obtido por estes dois modelos são iguais, apenas o valor do parâmetro k será diferente. Estes modelos não

correspondem a uma cinética de ordem n e sim a uma modificação empírica do modelo de primeira ordem e, então, estes dois modelos tornam-se matematicamente iguais. O Modelo 4 apresenta um parâmetro adicional que pode melhorar o ajuste do modelo, porém se o valor estimado do parâmetro a é diferente de 1, no momento com tempo igual a 0, a relação de umidade adimensional não irá assumir um valor igual a 1, o que anula a sua consistência matemática.

O modelo 5 possui semelhança com o modelo 4, mas com o parâmetro c . Com este acréscimo, no momento de $t=0$ será igual a 1, trazendo a consistência matemática para o modelo. Mas isso ocorrerá se apenas os valores estimados dos parâmetros a e c apresentarem uma soma igual a 1. Porém, mesmo que esta restrição seja verificada, se os valores de tempo forem elevados, o índice de umidade adimensional não assume um valor que irá tender a zero. O valores de MR assumiram o valor do parâmetro c , demonstrando que existe uma inconsistência matemática no modelo 5.

O modelo 6 apresenta algumas inconsistências matemáticas, uma vez que os valores previstos do parâmetro a são iguais a 1, assegurando que no momento inicial da relação adimensional de umidade é igual a 1. Porém, quando os valores são mais elevados de tempo, não tendem a se aproximar de 0.

Os modelos 7, 8 e 9 apresentam uma soma de dois termos exponenciais. No modelo 7, a consistência matemática é apresentada se $a + b = 1$ ou se $b = 1 - a$. É interessante observar, nos modelos 8 e 9, que o segundo termo exponencial já é multiplicado por $1 - a$, assegurando a consistência matemática dos modelos 8 e 9. Deve-se observar que, se a restrição $b = 1 - a$, é aplicada para modelo 7, este modelo é matematicamente equivalente ao modelo 9. Como o modelo 8 apresenta o parâmetro a , multiplicando os termos exponenciais e também no interior do segundo termo exponencial, o modelo 8 não é equivalente matematicamente ao modelo 9. O Modelo 10 apresenta uma soma de três termos exponenciais. A fim de apresentar uma consistência matemática dos valores estimados dos parâmetros a , b e c , o modelo deve ser restrito se a soma de $a + b + c = 1$.

Com a análise, observou-se que os modelos 1, 3, 8 e 9 não apresentam nenhuma diferença significativa entre eles (MOCELIN et al. 2014).

Segundo Carlesso (2009), nas condições de 35, 40, 45, 50, 55 e 60°C, à velocidade de 0,8 m.s⁻¹, avaliadas em termos do tipo de semente e do teor de água inicial, foi o modelo 10 que melhor ajustou as curvas de secagem experimentais, em camada fina, das sementes de mamão do híbrido UC-01 e da cultivar Golden com alto teor de água inicial. No entanto, para as sementes de mamão da cultivar Golden com baixo teor de água, apenas o modelo de Page foi considerado satisfatório na representação das curvas de secagem.

1.5. Secador Convectivo

A secagem convectiva é um processo simultâneo de transferência de massa e calor, no qual a água é transferida por difusão do interior do material para sua superfície e desta para a corrente de ar por convecção. Assim, parte do calor que é transferido ao produto é utilizada para vaporizar a água (calor latente de vaporização). A outra parte da energia em movimento é utilizada para elevar a temperatura do material (calor sensível). Os fatores que normalmente influenciam a taxa de secagem são: velocidade do ar de secagem, temperatura do ar de secagem, geometria da amostra e as propriedades físicas do material (FORTES; OKOS. 1980). Estes secadores são de simples construção e possuem a tendência de serem mais econômicos na manutenção (ALVES; SILVEIRA, 2002; MACHADO et al., 2008).

A secagem convectiva forçada com ar quente é uma técnica muito utilizada pelas indústrias de alimentos. Para a operação destes equipamentos, a tendência é de que a temperatura do ar pode variar entre 40 °C a 80 °C, enquanto que a velocidade do ar normalmente varia de 0,5 a 5 m s⁻¹. O tempo de secagem depende desses e outros parâmetros e pode chegar perto de vinte horas, conforme as características do material (AVERSA et al., 2007).

1.6. Leito de Jorro

Entre as diversas operações unitárias que envolvem partículas sólidas e fluidas, destaca-se o leito de jorro. Tendo por finalidade promover íntimo contato entre fluído e partículas, esta técnica é aplicada com eficiência na secagem de materiais granulares, de pastas e suspensões, na granulação e no recobrimento de partículas (MEDEIROS, 2004).

A técnica do leito de jorro, conforme apresentado por Freire (1992), foi estabelecida inicialmente por Gishler e Mathur em 1955, visando à secagem de grãos de trigo.

No Canadá, foram implantadas unidades industriais para secagem de ervilha, lentilha e fibras de linho (MATHUR e GISHLER, 1955). Segundo Mathur e Epdtein (1974), unidades de leito de jorro foram utilizadas para resfriamento de sólidos, granulação, revestimento de partículas, cristalização, ativação de carvão e estudos em escala piloto para aplicação na redução de minério de ferro, carbonização e gaseificação de carvão, moagem e mistura de sólidos, pirólise de xisto e produção de clínquer de cimento. Segundo Massarani (1997), o sistema de secagem de leito de jorro é eficiente quando aplicável em grãos.

Brunello, Peck e Della Nina (1974) estudaram a secagem de malte de cevada em um secador tipo jorro cônico-cilíndrico operando em batelada, utilizando três diferentes temperaturas de ar de secagem (60, 80 e 90 °C) e três cargas de sólidos, com umidade inicial de 80% b.s. Os autores demonstraram que a secagem pode ser conduzida em temperaturas mais elevadas que nos equipamentos clássicos. Canesin e Massarani (1984) estudaram a secagem de arroz em leito de jorro. Eles projetaram uma unidade industrial contínua para a secagem de 1.600kg/h de arroz com uma redução de 8% de umidade. Cremasco, Rocha e Massarani (1987) obtiveram dados dinâmicos e as curvas de secagem para milho em leito de jorro cônico com tubo interno. O equipamento mostrou-se adequado à redução da umidade do milho sem prejudicar a qualidade do grão. Alves Filho e Massarani (1987) realizaram a secagem de café cereja em leito de jorro cônico, com ângulo de 60°, altura de 0,9 m e diâmetro da base e do topo de 0,13 e 0,10 m, respectivamente. Neste

trabalho, a umidade final do produto foi fortemente influenciada pela temperatura do ar e, em menor escala, pela umidade inicial do produto.

Viswanathan, Lyall e Raychaudhuri (1986) realizaram experimentos de secagem de milho, arroz, ervilha e trigo em leito de jorro cônico-cilíndrico. Utilizaram leitos com diâmetro da coluna (D_c) de 0,10 m, 0,25 m e 0,31 m, todos com ângulo da base de 60° e temperatura de secagem de até 130°C . A partir dos dados obtidos, desenvolveram uma correlação empírica para a taxa de secagem, com validade para temperatura do ar de até 130°C , com o objetivo de ser utilizada em projetos de secadores de leito de jorro.

Lima (1995) analisou a secagem de feijão carioca em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado. O secador utilizado, em escala de laboratório, foi do tipo cônico-cilíndrico e operava em batelada com cargas de 1,5 kg e 3,0 kg. As plantas apresentavam 20 e 30% de teor de umidade inicial e as temperaturas do ar de secagem na faixa de 73 a 83°C . Os resultados deste trabalho mostraram que os três secadores, operando nas mesmas condições, apresentaram comportamento muito semelhante, com uma ligeira vantagem para o leito fixo.

O regime de jorro é estabelecido pela entrada de um jato de fluido em um leito de sólidos particulados. O menor diâmetro dos sólidos recomendável para garantir o estabelecimento de um regime fluidodinâmico estável é de 1 mm. Após a entrada do fluido, normalmente constituído por ar, observa-se a aceleração ascendente das partículas sólidas com a formação de um canal central diluído, sendo que as mesmas apresentam elevada velocidade. Essa região é denominada de região de jorro. Ao redor do canal central, verifica-se a presença de um leito denso de partículas que se desloca contra o fluxo ascendente de ar, traçando uma trajetória parabólica em relação à região central do equipamento. A região que compreende esse leito deslizante de partículas recebe a denominação de ânulo ou região anular (MATHUR, 1974).

A desaceleração das partículas provenientes da região de jorro ocorre após as mesmas atingirem a superfície do leito (região de fonte) e resulta em sua queda sobre a região anular. Por fim, essas partículas descreverão uma trajetória anular de volta para a região de jorro, seja após atingirem a base do leito (próximo ao orifício de entrada do ar), seja através de fluxo cruzado (na interface jorro-ânulo) (MARRETO, 2006). A Figura 6 ilustra esquematicamente

a movimentação cíclica e ordenada das partículas em um leito de jorro convencional.

Segundo Mathur e Epstein, 1974, existem basicamente três geometrias de secadores de jorro: a cônica, a cone-cilíndrica e a retangular. A estabilidade de um leito de jorro depende das dimensões do leito e das propriedades das partículas. Para cada tipo de partícula e cada leito de jorro, é possível determinar experimentalmente o seu diagrama de fase. Existem inúmeras correlações para a previsão da perda de carga no jorro estável. Do ponto de vista fluidodinâmico, os principais parâmetros ligados ao projeto de secador de leito de jorro são: a perda de carga no leito, em função da vazão de fluido; a perda de carga máxima; a perda de carga no jorro estável; a velocidade de jorro mínimo; e a altura máxima de jorro estável. Além destes parâmetros, é conveniente ter-se uma ideia do perfil de velocidade do gás no leito, do movimento das partículas e de sua circulação (FREIRE, 1992).

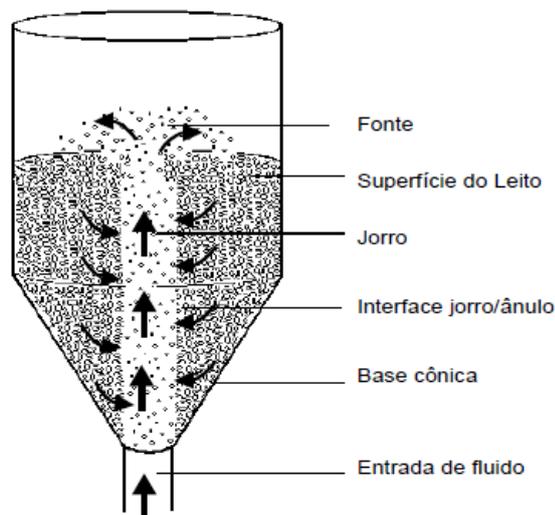


Figura 6 - Regiões características do leito de jorro. Fonte: Lima (2004).

A velocidade de jorro mínimo define-se como a menor velocidade superficial onde o jorro ainda existe. Este parâmetro depende da geometria do sistema bem como das características físicas do fluido e das partículas. A altura de jorro estável indica a altura do leito em que qualquer valor superior a ela prejudicará a estabilidade do jorro. Esta informação estima a quantidade total de material que poderá ser processada em cada batelada de um determinado equipamento. A perda de carga no jorro estável é o valor da

queda de pressão que ocorre durante o funcionamento estável do leito de jorro. E a queda de pressão máxima é o valor da pressão que ocorre pouco antes da formação do jorro. Esta perda de carga, juntamente com o valor da velocidade de jorro mínimo, fornece dados necessários para a especificação do soprador.

Para determinar as características de cada equipamento de secagem em particular, é necessário fazer-se uso da curva fluidodinâmica característica, que é uma representação gráfica da relação entre a velocidade de escoamento do fluido de secagem e a perda de carga na célula de secagem conforme demonstrado na Figura 7 (OLIVEIRA, 2004)

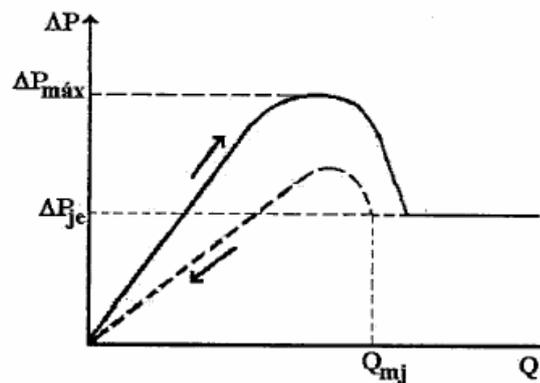


Figura 7 - Curva fluidodinâmica genérica – Perda de Carga x Velocidade. Fonte: Lima (2004).

Com o aumento da vazão de ar, as partículas próximas do orifício de entrada do ar formam uma cavidade acima desta região. As partículas serão deslocadas e, assim, comprimindo as partículas acima, formando uma camada compacta, aumentando a resistência ao escoamento. Desta forma, a queda de pressão vai aumentando até atingir um valor máximo através do qual se pode identificar o valor a queda de pressão máxima ($\Delta P_{máx}$).

A continuidade do aumento da vazão do ar proporciona o jorro no leito, causando diminuição da queda de pressão até esta ficar estável. Este valor é denominado de queda de pressão de jorro estável (ΔP_{je}). O aumento da vazão do ar pode provocar um aumento da altura do jorro, porém a queda de pressão não sofre alteração significativa. Este parâmetro permite identificar qual a quantidade de material que pode ser submetida dentro do equipamento. Ao

verificar o sentido inverso da curva, quando a vazão do ar está em decréscimo, a queda de pressão mantém-se até uma determinada vazão e neste momento define-se a vazão de jorro mínimo (Q_{mj}). Ao reduzir a vazão do gás, a queda de pressão segue o comportamento observado no sentido de vazões crescentes, porém com valores menores, pois o leito não se encontra empacotado como inicialmente, não havendo ruptura do mesmo (LIMA, 2004).

1.7. Secagem de sementes de mamão

O primeiro estudo encontrado que apresentou secagem de sementes de mamão foi o de Vazquez (1969), em que foi avaliada a secagem das sementes ao sol e na sombra, como também a secagem em estufa à temperatura de 35°C, a fim de verificar a qualidade das sementes para utilizar na propagação da fruta. Verchio e Shirwa (1987) tornaram a avaliar a qualidade fisiológica das sementes secas em pleno sol e à sombra e observaram que a secagem à sombra tinha um poder germinativo maior que o seco a pleno sol. Schimildt et al. (1993) novamente avaliaram o desempenho fisiológico, em termos de germinação e vigor, para sementes secas à sombra. Prado e Sartori (2000) secaram sementes de mamão, com e sem arilo, em leito fixo e camada delgada, avaliando o efeito imediato da temperatura (32, 41 e 50°C) e da velocidade do ar (0,5, 1,5 e 2,5 m.s⁻¹) sobre sua qualidade fisiológica. Balbinot (2006) utilizou temperatura do ar de secagem de aproximadamente 37°C e velocidades de 0,4; 0,8 e 1,2 m s⁻¹ para a redução do teor de água de sementes de mamão Golden até valores próximos de 7,0% (b.u.). Estes constataram que a velocidade do ar não influenciou no vigor e na germinação das sementes. Venturini et al. (2012) analisou a secagem de sementes de mamão em estufa nas temperaturas de 60 e 70 °C, utilizando ultrassom para a obtenção de extrato da sementes. Outros trabalhos citados anteriormente comentaram sobre a secagem e posteriormente a extração do óleo, porém não descrevem detalhadamente como foi realizada a secagem destas sementes.

1.8. Planejamento experimental

Um experimento é uma série de ensaios nos quais ocorre a variação nos parâmetros ou variáveis de entrada do processo ou de uma operação industrial, objetivando verificar e identificar as variações nas respostas (MONTGOMERY, 1991).

O planejamento experimental é um procedimento que permite avaliar os efeitos de variáveis independentes sobre a resposta utilizada quando se precisa melhorar um processo industrial. Com o planejamento, há um aproveitamento dos dados que certamente não seriam considerados sem a utilização do método (RODRIGUES e IEMMA, 2009).

As técnicas usuais de planejamento de experimentos e otimização de processos, amplamente utilizadas em ciências e engenharia, são encontradas de forma detalhada nos textos de Box, Hunter e Hunter (1978) e Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001). Os planejamentos fatoriais e os fatoriais fracionários são as técnicas mais usuais no planejamento experimental, usando o quadro de análise de variância (ANOVA) para análise dos dados.

A primeira etapa para o planejamento consiste em selecionar os fatores, as variáveis independentes do sistema que interferem no processo, e os níveis, valores escolhidos para os fatores. Em seguida, determina-se qual o melhor planejamento experimental que defina como os fatores e níveis devem estar associados.

Desta forma, o planejamento estatístico de experimentos e a análise de variância proporcionam um vantajoso método para a avaliação dos efeitos e interações das variáveis operacionais. Assim, para alcançar o resultado esperado, as variáveis operacionais devem ser cuidadosamente controladas e suas influências na variável de resposta quantificadas, sendo recomendada a utilização de experimentos estatisticamente planejados e técnicas de otimização, que são ferramentas indispensáveis de auxílio à pesquisa, pois fornecem resultados a partir de um reduzido número de experimentos (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). Uma das técnicas mais utilizadas na otimização estatística de experimentos é a metodologia de superfícies de resposta, que implica na representação de superfícies em duas e três dimensões,

demonstrando, de forma clara, uma tendência na variável de resposta que deve ser analisada criteriosamente.

O arranjo mais comum e simples é o fatorial completo, em que os níveis e fatores são organizados de forma a garantir todas as combinações possíveis e denota-se o número de experimentos por N^k , onde N é o número de níveis e k os fatores. A desvantagem deste tipo de planejamento é que, com o aumento do número de fatores, o número de experimentos cresce exponencialmente e isto pode tornar o número de experimentos inviável (RODRIGUES e IEMMA, 2009).

O delineamento composto central é um planejamento experimental muito usado para realizar análises de superfícies de resposta, devido à possibilidade de se explorar um grande espaço amostral com um número pequeno de ensaios. É um planejamento simétrico e consiste na repetição do ponto central e na adição de pontos axiais, sendo o número de experimentos dado pela Equação 2.

$$NE = PF + PA + PC \quad (2)$$

O termo NE é o número de experimentos, PF o planejamento fatorial 2^k , PA corresponde à quantidade de pontos axiais e PC é o número de repetições no ponto central. A adição dos pontos centrais no planejamento permite obter informações extras sobre a região central do experimento, pois é onde normalmente encontram-se as melhores respostas, melhorando a estimativa dos efeitos quadráticos e permitindo graus de liberdade para uma estimativa do erro experimental (PENTEADO, 2010).

Na Figura 8, é apresentada a representação gráfica de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

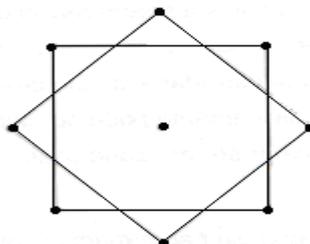


Figura 8 - Representação do delineamento do composto central rotacional. Fonte: Rodrigues e Iemma (2009).

Após determinar a quantidade de ensaios deve-se determinar o nível dos pontos axiais, também denominado de distância entre o centro e os pontos axiais, e representada por alfa, de acordo com a Equação 3. Os valores estão resumidos no Quadro 5.

$$\alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

K	2	3	4	5	6
α	$\pm 1,4142$	$\pm 1,6818$	± 2	$\pm 2,3784$	$\pm 2,8284$

Quadro 6 - Valores dos pontos axiais conforme o número de fatores. Fonte: Rodrigues e lemma (2009).

Determinado o nível nos pontos axiais, é necessário determinar o valor das variáveis independentes referente a cada nível dos pontos axiais. Para estabelecer estas variáveis, é utilizada a equação da variável codificada, dada pela Equação 4.

$$c_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\beta} \quad (4)$$

O termo \bar{x} é a média dos níveis, do mais alto e do mais baixo, x_i é o valor da variável não codificada e β é o espaçamento entre os valores das variáveis. Os c_i são utilizados os valores de -2, -1, 0, 1, e 2. Depois de escolhido o planejamento, realizados os experimentos e obtidas as respostas para cada condição, uma das formas de se analisar os dados é através da Metodologia de Superfície de Resposta. Esta metodologia consiste em um conjunto de ferramentas matemáticas e estatísticas para analisar os dados obtidos, definindo uma relação entre as variáveis independentes e a resposta. A relação pode ser expressa por uma equação polinomial de 2ª ordem, conforme demonstrado na Equação 5, que pode estimar qualquer valor da variável resposta (PAIVA, 2008).

$$y = \beta_0 + \sum_j \beta_j x_j + \sum_{i-j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_j \beta_{jj} x_j^2 + e \quad (5)$$

Os termos x_i e x_j são as variáveis independentes, β_0 é o ponto de inserção, β_j são relacionados aos efeitos lineares, β_{jj} são os efeitos quadráticos, β_{ij} são os efeitos de interação, sendo estimados pelo método dos mínimos quadrados e e é o erro experimental. (PENTEADO, 2010; WERKEMA e AGUIAR, 1996).

Antes de construir os modelos, os resultados obtidos são submetidos a uma análise dos parâmetros para verificar quais destas variáveis apresentam significância estatística na resposta. A análise utilizada para a verificação das variáveis é a de regressão múltipla. Depois do modelo reparametrizado, são construídas as superfícies de resposta. As superfícies de resposta são representações gráficas em que é possível mapear uma determinada região, visualizando quais as melhores condições, conforme a necessidade do processo (KARIMI et al., 2012; WERKEMA e AGUIAR, 1996).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Matéria-prima

Neste trabalho, foram utilizadas sementes de mamão da variedade *papaya* oriundas de frutos que seriam descartados. As sementes foram adquiridas em etapas, no período de julho a setembro de 2013, junto ao comércio local da cidade de Santa Maria - RS.

Os frutos eram recebidos no laboratório, cortados ao meio e com as mãos retiradas as sementes da cavidade central do fruto. Para a realização dos experimentos, as sementes foram inicialmente lavadas para remover partes da polpa do fruto que ficavam aderidas a elas. Após a lavagem, as sementes eram colocadas sobre uma peneira com malha, com diâmetro inferior ao das mesmas e friccionadas com o auxílio de uma colher contra a tela da peneira, promovendo o rompimento da exotesta (Figura 9) (SANTOS, 2009). Após o rompimento da exotesta, as sementes eram enxaguadas e colocadas em recipientes plásticos para congelamento em freezer horizontal, com temperatura de -10°C até a secagem.



Figura 9 - Sementes sendo pré-tratadas. Fonte: Autor (2014).

2.2. Caracterização física e umidade

2.2.1. Diâmetro médio de Sauter

Para a determinação do diâmetro médio de Sauter, foi realizada a distribuição granulométrica da amostra através do método de peneiramento (peneiras série *Tyler* 4, 5, 7, 8 e 9) e um agitador da marca *Prodotest*, 220V-2A. Após o fim do peneirando, foi determinada a fração de massa retida em cada peneira (x_i) e o diâmetro médio da menor e da maior abertura das peneiras em análise (D_i). Com isso, obteve-se a distribuição granulométrica e o diâmetro médio de Sauter (Equação 6), descrita por Cremasco (2012).

$$d_{ps} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_i} \right)} \quad (6)$$

2.2.2. Esfericidade

A Esfericidade das sementes *in natura* foi calculada com base nas propriedades isométricas de uma esfera, conforme a Equação 7 (MOHSENIN, 1980).

$$\emptyset = \frac{(x.y.z)^{1/3}}{x} \quad (7)$$

As dimensões geométricas x , y , z (Figura 10) das sementes foram medidas com um paquímetro marca *Vernier Caliper* 150 mm com precisão de $\pm 0,02$ centímetros.



Figura 10 - Três principais dimensões das sementes onde eixo x é o comprimento, eixo y é largura e o eixo z é altura. Fonte: Adaptado de Mohseni (1980)

2.2.3. Densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente (ρ) foi utilizada a técnica de picnometria ou método de Arquimedes, conforme descrito por Cremasco (2012). Os materiais utilizados neste procedimento foram um picnômetro de 25 mL, água destilada à temperatura de 25 °C (densidade de 0,996 g.cm⁻³) e uma balança analítica modelo Marks 5201 da empresa *Bel Engineering* com precisão de 0,1g. Para o cálculo das massas específicas das sementes, foram obtidos os seguintes valores: a massa do picnômetro, a massa do picnômetro + amostra, a massa do picnômetro + amostra + água e a massa do picnômetro + água. Após obter esses valores, foi realizada a seguinte rotina de cálculo descrita a seguir:

$$V_{\text{pic}} = (m_{\text{pic} + \text{água}} - m_{\text{pic}}) / \rho_{\text{água}} \quad (8)$$

$$V_{\text{água}} = (m_{\text{pic} + \text{amostra} + \text{água}} - m_{\text{pic} + \text{amostra}}) / \rho_{\text{água}} \quad (9)$$

$$V_{\text{amostra}} = V_{\text{pic}} - V_{\text{água}} \quad (10)$$

$$\rho_{\text{semente}} \text{ (g/mL)} = (m_{\text{pic} + \text{amostra}} - m_{\text{pic}}) / V_{\text{amostra}} \quad (11)$$

2.2.4. Umidade

A umidade foi determinada através de um Analisador de Umidade por Infravermelho marca Gehaka IV2001 (Figura 11), utilizando como parâmetro a temperatura de 160°C e o tempo de permanência de 10 minutos. Esses parâmetros foram definidos através de testes preliminares, conforme descrito

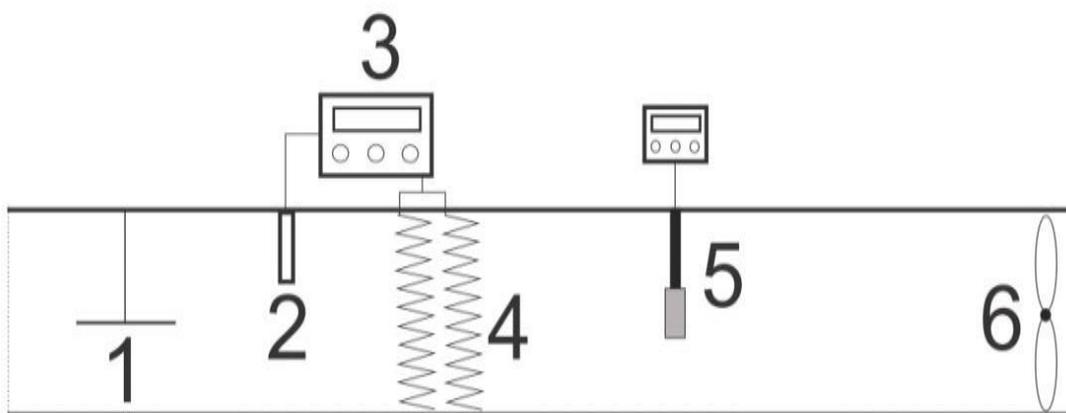
no manual de operação, e os resultados obtidos foram comparados com ensaio padrão pelo método direto em estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ por 24 horas.



Figura 11 - Analisador de umidade por infravermelho. Fonte: Autor (2014).

2.3. Secagem em secador convectivo horizontal

A umidade utilizada para a secagem das sementes foi um secador convectivo horizontal, com convecção forçada de ar, da empresa Eco Educacional, conforme demonstrado na Figura 12 e 13.



1) Recipiente e câmara de secagem, (2) Termopar, (3) Controlador de temperatura, (4) câmara de aquecimento com resistências elétricas, (5) Termoanemômetro de hélice e (6) Soprador axial.

Figura 12 - Esquema do secador convectivo horizontal. Fonte: Autor (2014).



Figura 13 – Secador convectivo horizontal utilizado para os experimentos.
Fonte: Autor (2014).

O equipamento era constituído pelas seguintes especificações: um soprador axial com potenciômetro para variação da velocidade com capacidade de 0,1 a 3,5 m.s^{-1} ; um termoanemômetro de hélice para medição da velocidade do ar, marca Minipa, modelo MDA 11, possuindo intervalo operacional de 0 a 30,0 m.s^{-1} , com resolução de 0,01 m.s^{-1} ; uma câmara de aquecimento com cinco resistências de 1000W acoplado; e um controlador NOVUS N960 com operação máxima de 200 ° C, com precisão de 1°C, acoplado a um termopar do tipo “K” para controle da temperatura e aquecimento do ar. O controle da umidade do produto e a cinética de secagem foram realizados com auxílio de uma balança analítica marca Marte, modelo AS500C, com resolução de 0,01 g (Figura 14).



Figura 14 – Balança para pesagens do secador convectivo horizontal. Fonte: Autor (2014)

O recipiente onde foram colocadas as sementes para a realização dos ensaios é mostrado na Figura 15, o qual possui um diâmetro de 16 cm.



Figura 15 – Recipiente utilizado para a secagem das sementes. Fonte: Autor (2014)

2.3.1. Planejamento experimental

Devido à dificuldade de obtenção de grandes volumes de sementes, foi realizado um planejamento experimental com o objetivo de reduzir o número de experimentos e obter resultados bem distribuídos com bom grau de significância. Para a realização dos experimentos em secador convectivo horizontal, as variáveis independentes foram a temperatura (T) e a velocidade do ar (U). Adotou-se então um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) $2^2 + 4$ pontos centrais + 4 pontos axiais, conforme demonstrado na Tabela 2 (RODRIGUES e IEMMA, 2009). Os experimentos de secagem foram realizados nas temperaturas de 40, 49, 70, 91, 100°C e nas velocidades do ar de 1; 1,29; 2; 2,71; 3 m.s^{-1} . As variáveis independentes foram codificadas conforme descrito anteriormente, sendo considerados como base para os cálculos os valores mínimos e máximos de cada variável independente.

Os resultados obtidos no planejamento experimental foram analisados através das superfícies de respostas construídas com o auxílio do software *Statística 9.1*, no qual foram analisados o R^2 e os valores de F tabelado e o valor do F calculado.

Tabela 2 – DCCR com variáveis codificadas para secagem do secador convectivo horizontal.

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m s⁻¹)
1	48 (-1)	1,29 (-1)
2	91 (1)	1,29 (-1)
3	48 (-1)	2,71 (1)
4	91 (1)	2,71 (1)
5	40 (-1,41)	2 (0)
6	100 (1,41)	2 (0)
7	70 (0)	1 (-1,41)
8	70 (0)	3 (1,41)
9	70 (0)	2 (0)
10	70 (0)	2 (0)
11	70 (0)	2 (0)
12	70 (0)	2 (0)

Fonte: Autor (2014)

2.3.2. Operação do equipamento

Para a realização de cada experimento, o equipamento era ligado através de uma chave geral, na qual posteriormente acionou-se a ventilação do equipamento. Realizou-se o ajuste da temperatura e da velocidade do ar desejada, conforme planejamento experimental, e aguardou-se até ocorrer a estabilização do sistema. Preencheu-se o cesto metálico com uma camada fina de sementes e realizou-se a pesagem na balança analítica (Figura 14). Após a estabilização do sistema, a amostra foi colocada na câmara de secagem e realizou-se a pesagem inicial. Na operação de secagem, as pesagens foram quantificadas em intervalos de 5 minutos até completar 30 minutos. Após este tempo, os intervalos foram de 10 minutos até atingir 60 minutos de secagem e a partir deste momento foi realizada a pesagem a cada 15 minutos, até as amostras atingirem três pesagens constantes.

2.3.3. Cinética de secagem

Para descrever as curvas de razão de umidade em função do tempo, dentro das temperaturas e das velocidades do ar estudadas, foram ajustados a partir dos modelos empíricos e semiempíricos, conforme descrito por Mocelin et al. (2014). Os modelos utilizados foram 1, 3, 8 e 9, citados na Tabela 1 do item 1.4 da revisão bibliográfica. Nos modelos apresentados, MR representa a razão adimensional de umidade, conforme a equação 12, na qual M é o conteúdo de umidade do produto e M_0 é o conteúdo de umidade inicial do produto. O valor da soma dos quadrados dos resíduos (SQR), o erro quadrado médio (EQM) e os coeficientes de correlação (R^2) foram calculados com o auxílio do software *Statistica 9.1*. Os critérios para determinar a melhor qualidade dos ajustes foram os valores mais próximos a 1 para o R^2 e os menores valores da soma dos quadrados dos resíduos (SQR). Também foi analisada a distribuição dos resíduos pelos valores preditos, a fim de verificar a existência de tendências para a determinação dos modelos (COSTA, 2012).

$$MR = \frac{M}{M_0} \quad (12)$$

2.3.4. Umidade e rendimento de óleo das sementes após secagem

Após a realização da secagem, tendo como parâmetros as variáveis independentes citadas anteriormente, as variáveis dependentes que foram obtidas no planejamento experimental foram a Umidade (b.u) e o Teor de Óleo.

A umidade das sementes após a secagem foi determinada conforme método por infravermelho, metodologia descrita no item 2.2.4.

Para a realização da extração sólido-líquido, foi utilizado o método de extração por percolação à temperatura ambiente com agitação magnética (Figura 16) em um balão de 1000 mL, por 12 horas, com o solvente Hexano P.A. oriundo da empresa VETEC (NAGUETINI, 2006). Para a determinação da quantidade de solvente e quantidade de sementes moídas a ser utilizada, foi realizado um DCCR $2^2 + 3$ pontos centrais + 4 pontos axiais, conforme a

Tabela 3, na qual os volumes de solventes foram de 100, 158, 300, 442 e 500 mL e as quantidades de sementes moídas foram de 60, 72, 100, 128 e 140 g (valores codificados). Após as extrações, o solvente foi separado do óleo, através de evaporador rotativo a vácuo da marca Fisatom 801, temperatura do banho de 70°C e pressão de -550 mm Hg (Figura 17).



Figura 16 - Extração por percolação com agitação magnética. Fonte: Autor (2014)

Tabela 3 – DCCR com variáveis codificadas para determinação de quantidade de massa de sementes e volume de solvente.

Ensaio	Massa (g)	Volume(mL)
1	72 (-1)	158 (-1)
2	128 (1)	158 (-1)
3	72 (-1)	442 (1)
4	128 (1)	442 (1)
5	60 (-1,41)	300 (0)
6	140 (1,41)	300 (0)
7	100 (0)	100 (-1,41)
8	100 (0)	500 (1,41)
9	100 (0)	300 (0)
10	100 (0)	300 (0)
11	100 (0)	300 (0)

Fonte: Autor (2014)



Figura 17 - Evaporador rotativo. Fonte: Autor (2014).

Para o cálculo do rendimento de óleo, foi utilizada a metodologia proposta por Santos et al. (1998) e calculada através da Equação 13.

$$T_o = \frac{M_o}{Bm - \left(\frac{Bm \cdot U}{100}\right)} \cdot 100 \quad (13)$$

Onde:

To – Teor de óleo (%);

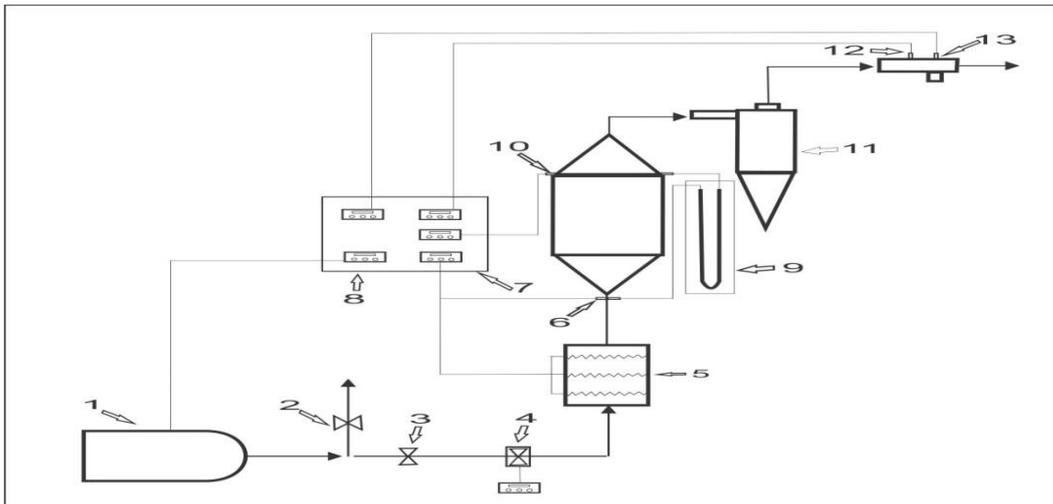
M_o – Massa de óleo (g);

Bm – Biomassa (g)

U – umidade da biomassa (%)

2.4. Secagem em leito de jorro

O equipamento de leito de jorro utilizado para realizar as secagens foi fornecido pela empresa Eco Educacional e está representado esquematicamente nas Figuras 18 e 19.



(1) Soprador radial, (2) Válvula de globo, (3) Válvula de esfera, (4) Termoanemômetro de hélice, (5) Aquecedor, (6) Termopar do controle de temperatura, (7) Controlador de temperatura, (8) Potenciômetro de controle de velocidade do ar, (9) Manômetro em “U”, (10) Termopar, (11) Ciclone, (12) Termopar de bulbo seco e (13) Termopar de bulbo úmido.

Figura 18 - Esquema secador leito de jorro. Fonte: Autor (2014).



Figura 19 - Unidade experimental de leito de jorro. Fonte: Autor (2014).

A unidade experimental apresentada na Figura 19 foi formada pelos sistemas periféricos de fornecimento e aquecimento de ar, medição da velocidade do ar, câmara de secagem e instrumentação.

O fornecimento de ar ocorre por um soprador radial da marca ARTEC modelo ACR 7,5 com potência de 7,5 CV e vazão máxima de $6,2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. A regulação da vazão de ar foi feita através de um potenciômetro da marca SIEMENS. Um sistema *by-pass*, constituído por uma válvula de gaveta e uma válvula de globo de 2", direcionou o ar fornecido pelo soprador ou para o leito de jorro ou para a descarga de ar. A medição da velocidade do ar fornecida ao secador foi realizada através de um Termoanemômetro de hélice da Marca Instruterm, modelo TAD-500, com amplitude de medição de 0 a $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e precisão de $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

O aquecimento do ar na câmara de secagem foi realizado através de um trocador de calor, formado por 3 resistências de 1000W de potência cada. As resistências foram acopladas a um sistema de controle NOVUS S320, permitindo o ajuste da temperatura do ar fornecido ao secador com um delta de ± 3 .

A câmara de secagem consiste de um leito de jorro de coluna cheia com uma base cônica, construída em aço inox, com angulação de 60° e altura e diâmetro do bocal de entrada de 0,14 m e 0,02 cm, respectivamente. Acoplado a este sistema, existe uma coluna cilíndrica de vidro de 0,54 m de altura e diâmetro externo de 0,172 m, unida ao cone superior com angulação de 45° com altura de 0,07 m e diâmetro externo do bocal de saída de 0,07 m.

A separação do pó do ar de secagem foi realizada na saída do leito de jorro por um ciclone do tipo Lapple, construído em aço inox com um diâmetro externo de coluna de 0,15 m e altura de 0,275 m. Na parte inferior do ciclone, foi acoplado um recipiente de vidro para obtenção do produto separado.

A unidade experimental tem suporte instrumental para obter dados simultâneos de pressão e temperatura durante todo o período do experimento. Para obtenção dos dados de pressão da unidade foi utilizado um manômetro do tipo "U", tendo como fluido manométrico água destilada (Figura 20).

Para as medições de temperatura, foram utilizados 4 termopares do tipo PT100, sendo um localizado na entrada do ar na câmara de secagem, o segundo na saída da câmara de secagem e o terceiro e quarto são os termopares de bulbo úmido e bulbo seco, localizados após o ciclone, para obtenção dos dados de temperatura de bulbo úmido e bulbo seco, conforme demonstrado na Figura 18.



Figura 20 - Manômetro tipo “U”. Fonte: Autor (2014)

2.4.1. Pré-secagem das sementes

Para a secagem de sementes de mamão em um secador leito de jorro, foi necessário efetuar uma pré-secagem das mesmas até a umidade de 40% (b.u.). Em testes preliminares realizados, observou-se o colapso do leito formando canais preferenciais, pois o excesso de umidade ocasiona uma grande força coesiva entre as partículas, não ocorrendo a formação do jorro. Esse processo de pré-secagem foi realizado em uma estufa de convecção natural da marca SOLAB modelo SL-101, com temperatura de 60 ± 3 °C até as mesmas obterem 40% de umidade (b.u.), indicada pelo analisador por infravermelho.

2.4.2. Velocidade mínima de jorro (U_{mj})

Para obter as conformações da unidade experimental com as sementes a 40% de umidade (b.u), foi utilizado 500g de sementes, quantidade suficiente para que as mesmas atingissem a altura cônico-cilíndrica do leito. Com isso, foi possível determinar a velocidade mínima de jorro, aplicando a metodologia descrita por Almeida (2009). Foram obtidos os dados de cada par de velocidade do ar/queda de pressão do equipamento, com e sem as sementes,

à temperatura ambiente. Através do método visual, foi determinada a velocidade mínima de jorro.

2.4.3. Planejamento experimental

A caracterização da unidade experimental consistiu na obtenção das curvas fluidodinâmicas da unidade experimental de leito de jorro, umidade final do produto e rendimento do óleo para as velocidades, temperaturas e tempos empregados nos experimentos de secagem.

Devido à dificuldade de obtenção de sementes e para se ter uma representatividade dos dados obtidos, foi utilizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) $2^3 + 3$ pontos centrais + 6 pontos axiais, totalizando 17 experimentos, conforme demonstrado na Tabela 4. Os experimentos de secagem foram realizados em cinco diferentes temperaturas: 40, 52,1, 70, 87,9 e 100°C; cinco velocidades do ar: $1,1U_{mj}$; $1,16 U_{mj}$; $1,25 U_{mj}$; $1,34 U_{mj}$ e $1,4 U_{mj}$ $m.s^{-1}$; e cinco tempos: 0,5; 1,21; 2,25; 3,29 e 4 horas. As variáveis independentes foram codificadas conforme descrito anteriormente.

Para analisar os dados, foram coletados os valores de temperatura de saída da câmara de secagem, de temperatura de bulbo seco e bulbo úmido na saída do ciclone e da queda de pressão em períodos pré-determinados. Após a obtenção dos dados dos termopares de bulbo úmido e bulbo seco e os dados de pressão foram calculados a umidade relativa do ar e os adimensionais de pressão e de umidade. As curvas foram construídas de acordo com a metodologia descrita por Meili (2009) e Almeida (2009). A análise da umidade e do rendimento do óleo, após a secagem, foi realizada através das superfícies de respostas, utilizando o programa Statistica 9.1.

2.4.4. Operação do equipamento

Os experimentos foram realizados de forma aleatória. Conforme o experimento escolhido, era adotada a seguinte rotina: verificou-se o manômetro em “U”, ajustando para que o mesmo estivesse zerado enquanto o equipamento estava desligado; ligou-se o fornecimento de energia do

equipamento e esperou-se por cinco minutos para ocorrer a estabilização da leitura dos termopares; abriu-se a válvula de alívio e o soprador foi acionado; regulou-se, através das válvulas e do potenciômetro, com o auxílio do anemômetro, a velocidade do ar; após estabilizar a velocidade, regulou-se a temperatura de controle do aquecimento e acionaram-se as resistências; aguardou-se que a temperatura e a velocidade se tornassem estáveis e anotou-se a queda de pressão do equipamento vazio nas condições estipuladas, a umidade relativa do ar ambiente e a temperatura do ambiente.

Tabela 4 – DCCR com variáveis codificadas para leito de jorro.

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m.s⁻¹)	Tempo (horas)
1	52,1 (-1)	9,75 (-1)	1,21 (-1)
2	87,9 (1)	9,75 (-1)	1,21 (-1)
3	52,1 (-1)	11,25 (1)	1,21 (-1)
4	87,9 (1)	11,25 (1)	1,21 (-1)
5	52,1 (-1)	9,75 (-1)	3,29 (1)
6	87,9 (1)	9,75 (-1)	3,29 (1)
7	52,1 (-1)	11,25 (1)	3,29 (1)
8	87,9 (1)	11,25 (1)	3,29 (1)
9	40 (-1,68)	10,5 (0)	2,25 (0)
10	100 (1,68)	10,5 (0)	2,25 (0)
11	70 (0)	9,24 (-1,68)	2,25 (0)
12	70 (0)	11,76 (1,68)	2,25 (0)
13	70 (0)	10,5 (0)	0,5 (-1,68)
14	70 (0)	10,5 (0)	4 (1,68)
15	70 (0)	10,5 (0)	2,25 (0)
16	70 (0)	10,5 (0)	2,25 (0)
17	70 (0)	10,5 (0)	2,25 (0)

Fonte: Autor (2014)

O equipamento era desligado momentaneamente e abastecido o leito com 500g de sementes pré-secas; depois de abastecido, o equipamento era religado e a velocidade era ajustada novamente para a velocidade do experimento, sendo anotados os parâmetros iniciais de operação através dos quais se identificou o ΔP através do manômetro em “U”, as temperaturas de saída da câmara de secagem e as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido. As informações eram obtidas a cada dois minutos de experimento, até completar vinte minutos e, posteriormente, eram coletadas de cinco em cinco

minutos até completar sessenta minutos e, por fim, eram coletados a cada dez minutos até o final do experimento. A velocidade era ajustada no decorrer do experimento, quando se fazia necessário, para manter a mesma velocidade durante todo o processo, conforme o tempo estipulado.

2.4.5. Umidade e rendimento de óleo das sementes após secagem em leito de jorro

Os resultados do rendimento de óleo e a umidade das sementes após secas foram realizadas conforme a metodologia descrita na secagem em túnel de vento.

2.5. Análise dos Ácidos Graxos do óleo de sementes de mamão

2.5.1. Derivatização dos Triacilgliceróis

A derivatização dos triacilgliceróis foi realizada de acordo com o método descrito por Hatman e Lago (1973). Foram pesados aproximadamente 30 mg de óleo de semente de mamão em tubos de ensaio. A estes se adicionou 1 mL de solução de hidróxido de sódio (0,4 M) em metanol que foram submetidos a um banho-maria a 100°C por 10 min. Posteriormente, os tubos foram resfriados com água corrente para adição de 3 mL de solução de ácido sulfúrico (1 M) em metanol. Estes foram dispostos novamente em banho-maria nas mesmas condições de tempo e de temperatura. Em seguida, os tubos foram resfriados e adicionados por 4 mL de hexano e, então, homogeneizados em vórtex por 20 segundos. Por fim, foi realizada a retirada da parte superior do tubo contendo os ésteres metílicos de ácidos graxos (FAME) dissolvidos em hexano para análise cromatográfica.

2.5.2. Perfil de ácidos graxos

As análises foram realizadas no laboratório do curso Superior de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Santa Maria. Os ésteres metílicos de ácidos graxos (FAMES) dissolvidos em hexano foram analisados por cromatógrafo a gás, equipado com detector de ionização em chama (GC-FID) da marca Varian modelo Star3400CX e um amostrador automático de mesma marca, modelo 4200. Os FAMES foram separados em coluna capilar SP 2560 (Agilent Technologies, California, USA) (100 mm × 0,25 mm × 0,20 µm). O gás de arraste utilizado foi o hidrogênio à pressão constante de 20 psi. O injetor manteve-se no modo split com razão de 1:50 e temperatura de 240°C. A temperatura inicial da coluna foi de 80 °C, que permaneceu por 0,5 minutos e, após, aumentou até 175°C com taxa de 15°C/min e, posteriormente, até 190°C com taxa de 0,5°C/min e então com taxa de aumento de 8°C/min para atingir 240°C, mantendo-se em isoterma por 15 minutos. A identificação dos FAME foi realizada por comparação dos tempos de retenção dos analitos com os padrões (FAME Mix-37, Supelco Analytical, USA). A quantificação foi feita pela normalização das áreas dos ácidos graxos/padronização interna, utilizando um padrão C23.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os principais resultados e as respectivas discussões. Os dados da caracterização das sementes *in natura* foram determinados e serão apresentados a seguir. Os dados experimentais obtidos na secagem em secador convectivo horizontal foram obtidos, ajustados aos modelos citados, sendo apresentados os resultados da umidade e da extração de óleo. As análises da fluidodinâmica, térmica e de massa do leito de jorro durante o período de secagem e os resultados de umidade e extração também serão apresentados neste capítulo. E, por fim, serão demonstrados os dados do perfil de ácidos graxos do óleo extraído em cada secador.

3.1. Caracterização das Sementes *in natura*

Uma amostra de 150g de sementes *in natura* foi peneirada e utilizada na distribuição granulométrica para identificar o diâmetro médio Sauter, sendo que o valor encontrado foi de 3,24 mm. Os dados da distribuição granulométrica são apresentados no Apêndice A, Tabela A1. A esfericidade das sementes foi obtida em triplicata através dos tamanhos dos eixos, com auxílio de paquímetro, sendo que o resultado foi de $77,43 \pm 3,29\%$ (Apêndice A, Quadro A1). Para a densidade aparente, utilizando picnometria líquida, obteve-se o resultado de $946,41 \pm 8,547 \text{ kg.m}^{-3}$ (Apêndice A, Quadro A2). A umidade da semente de mamão foi mensurada em analisador de umidade por infravermelho, analisadas em triplicata e o resultado foi de $79 \pm 1,26\%$. Os valores de umidades das sementes apresentaram valores próximos aos obtidos por Prado e Sartori (2000).

Os valores apresentados no Quadro 7 tiveram concordância com os obtidos por Carlesso (2009). A densidade aparente mostrou-se alta, devido ao alto teor de umidade das sementes, conferindo com o descrito por Costa (2012).

X (mm)	y e z (mm)	ϕ (%)	ρ (kg m ⁻³)	d _{ps} (mm)	Umidade (%)
5,27±0,09	3,59±0,17	77,44±3,29	946,41±8,547	3,24	79±1,26

Quadro 7 - Valores médios obtidos para a caracterização das sementes in natura. Fonte: Autor (2014)

3.2. Secagem

Visando obter informações sobre o processo de secagem de sementes de mamão da variedade *papaya*, foram obtidos resultados referentes ao adimensional de umidade e a influência da temperatura (T) e da velocidade do fluido quando utilizado o túnel de vento. Também foram analisados modelos estatísticos através do planejamento experimental, verificando o nível de significância das variáveis estudadas (T e U) e analisando as superfícies de contorno e de resposta, com o objetivo de identificar a melhor região de operação.

Para o caso do leito de jorro, foram estudados os comportamentos fluidodinâmicos das sementes dentro do equipamento através do adimensional de pressão e a sua variação conforme a alteração da temperatura, da velocidade do fluido e tempo de permanência no equipamento. Para o estudo da secagem em si, foram analisados os dados de adimensionais de umidade do ar de saída do equipamento, assim observando a capacidade do ar de retirar umidade durante a passagem na câmara de secagem.

3.2.1. Secador convectivo horizontal

O comportamento do adimensional de umidade foi analisado conforme a variação da temperatura e da velocidade. Na Figura 21, é apresentado o comportamento dos ensaios 9, 10 e 11, pois estes foram obtidos nas mesmas condições experimentais, temperatura de 70°C e velocidade do ar de 2 m s⁻¹. O ensaio 12 não foi analisado por apresentar um comportamento incomum observado no erro experimental.

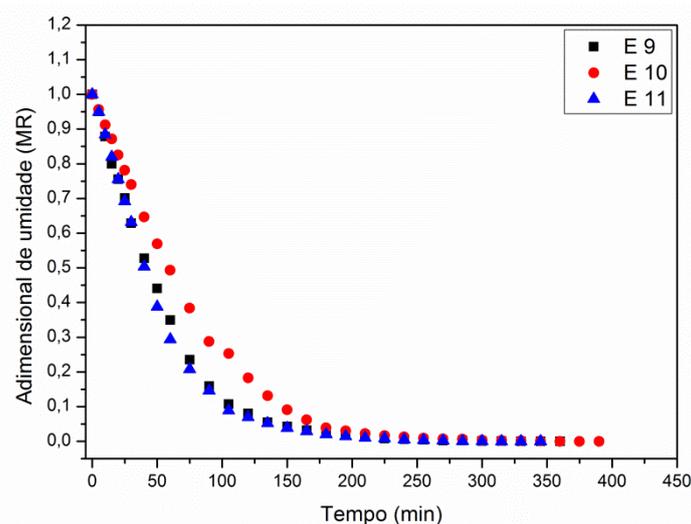


Figura 21 - Adimensional de umidade em função do tempo para os ensaios realizados em túnel de vento à temperatura de 70°C e velocidade de 2 m s⁻¹. Fonte: Autor (2014)

No ponto central, pode-se analisar o comportamento da curva de secagem de sementes de mamão com umidade inicial de 78,6, 79,6 e 78,8% para os ensaios 9, 10 e 11, respectivamente. Os ensaios 9 e 11 apresentaram o comportamento da curva quase idênticos, porém o ensaio 10 demonstrou uma pequena divergência. Este comportamento incomum pode ser atribuído ao fato de que as condições psicrométricas no momento do ensaio eram diferentes dos outros dois ensaios realizados. Analisou-se a umidade inicial das sementes e não foi atribuído este quesito na diferença na curva de secagem, devido a todas as sementes estarem com umidades altas. Assim, foi identificado que essa diferença estava relacionada às condições psicrométricas do ar, por não ter no ensaio 10 a mesma capacidade de absorção que nos ensaios 9 e 11 e, assim, deslocando a curva para a direita.

Outra hipótese possível apresentada por Costa (2012) diz respeito à reprodutibilidade de ensaios de secagem. Há uma dificuldade na reprodutibilidade devido ao fato de muitas variáveis não poderem ser controladas. Mesmo com as alterações de comportamento entre os ensaios de secagem com mesmas condições experimentais, demonstrou-se que os mesmos obtiveram boa reprodutibilidade,

Na Figura 22, são demonstrados os comportamentos distintos de uma curva de taxa de secagem.

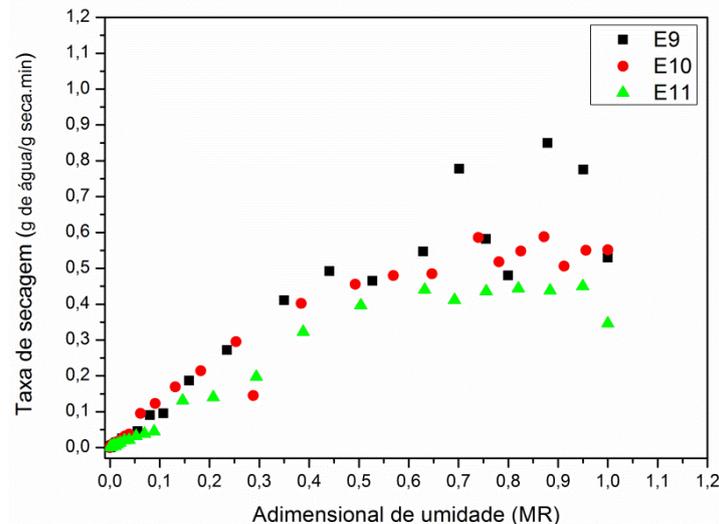


Figura 22 – Taxa de secagem em função do adimensional de umidade no ponto central, temperatura de 70°C velocidade de 2 m s⁻¹. Fonte: Autor (2014)

O comportamento apresentado entre o adimensional de umidade de 0,65 até 1 foi linear. A taxa de secagem foi constante, devido ao grande percentual de umidade na superfície das sementes e pelo produto ser muito poroso. Neste ponto, a transferência de massa foi controlada pelo processo convectivo. Após o período de secagem à taxa constante, ocorreu um período com taxa decrescente. Este período pode ser visualizado no adimensional de umidade de 0,65 até o momento que começou a tender a 0. Nesta etapa, a umidade não manteve a superfície das sementes saturadas. Então ocorreu o aumento da temperatura da superfície das sementes e elas tenderam a atingir a temperatura do ar de secagem. Assim, a secagem foi controlada pelo processo difusivo da água do interior para a superfície das sementes. Após a taxa decrescente, as sementes chegaram à umidade de equilíbrio constatada na qual a taxa de secagem chegou a 0.

Na Figura 23, é analisada a influência da temperatura sobre o comportamento da cinética de secagem.

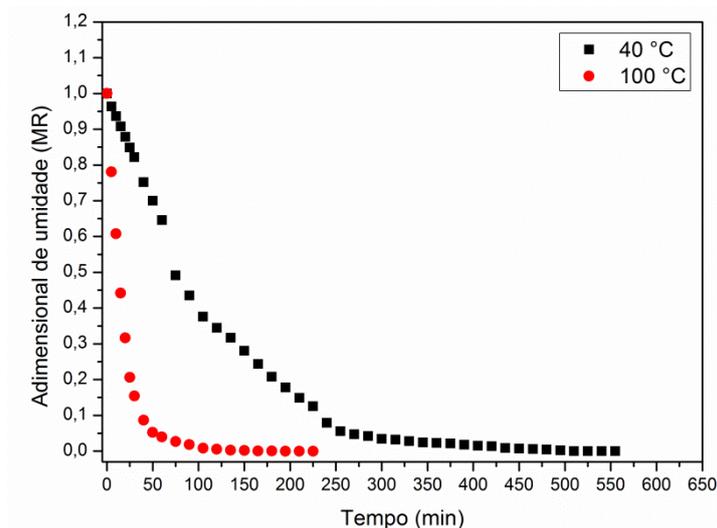


Figura 23 - Adimensional de umidade em função do tempo com velocidade de 2 m s^{-1} . Fonte: Autor (2014)

A influência da temperatura ficou clara no adimensional de umidade com a variação da temperatura. Com velocidade de 2 m s^{-1} em ambas as secagens e temperatura de 40°C e 100°C observou-se a redução significativa no tempo para atingir a umidade de equilíbrio. Ao utilizar a temperatura de 40°C , o tempo para alcançar a umidade de equilíbrio foi de 540 minutos. Já para a temperatura de 100°C , o tempo para atingir o mesmo ponto foi de 225 minutos. Este comportamento pode ser explicado devido à temperatura afetar diretamente na transferência de massa e calor. O gradiente entre o fluido e o sólido foi maior ao se trabalhar com temperatura mais elevadas, devido à alteração do coeficiente difusivo, assim ocorrendo maior transferência de material para o fluido. O aumento da temperatura do ar de secagem alterou as condições psicrométricas do ar, aumentando a capacidade de retenção de vapor de água pelo ar. Obteve-se uma redução de 240% no tempo de secagem neste caso estudado. Os demais experimentos com variação de temperatura também obtiveram o mesmo comportamento e são demonstrados no Apêndice B e nas Figuras B1 e B2.

Nas Figuras 24, 25 e 26 é demonstrada a influência da velocidade do ar sobre a curva de cinética de secagem.

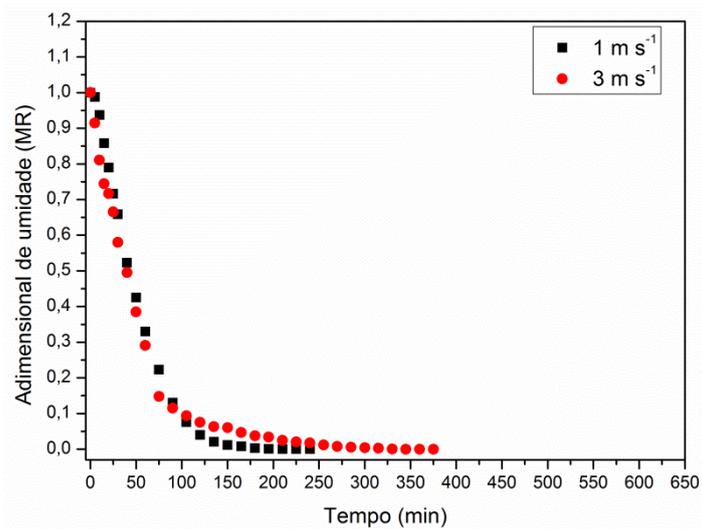


Figura 24 - Adimensional de umidade em função do tempo, com temperatura de 70°C. Fonte: Autor (2014)

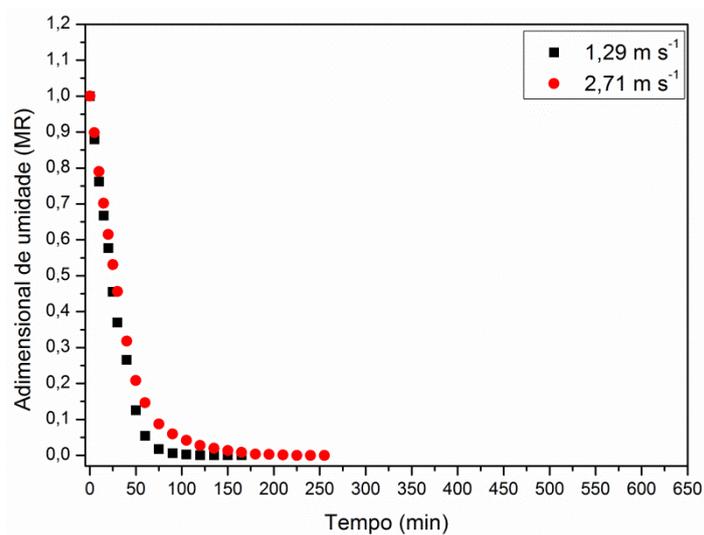


Figura 25 - Adimensional de umidade em função do tempo com temperatura de 91°C. Fonte: Autor (2014).

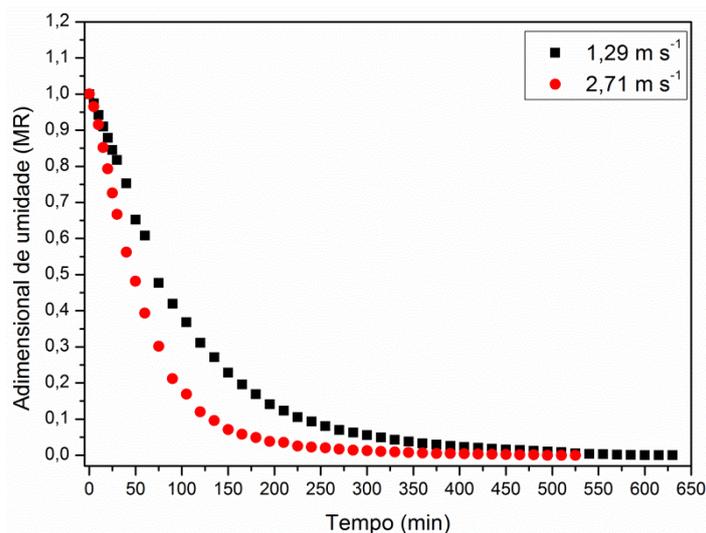


Figura 26 - Adimensional de umidade em função do tempo; temperatura de 49 °C. Fonte: Autor (2014)

Foi observado nos gráficos do adimensional de umidade em relação ao tempo que a velocidade do ar não apresentou grande influência no comportamento da curva de cinética de secagem. Nas Figuras 24 e 25, analisa-se graficamente o tempo para atingir a umidade de equilíbrio, quando se utilizou a menor velocidade. Nesta análise, observou-se uma diminuição em 64% do tempo comparando com as velocidades na Figura 24 e uma diminuição de 64,7%, comparando as velocidades na Figura 25. Porém, ao observar a Figura 26, o comportamento apresentou uma relação contrária ao apresentando na análise anterior. Neste caso, houve uma diminuição do tempo de 81% ao aumentar-se a velocidade. Essa redução no tempo observada na Figura 26 pode ser atribuída ao fato de que temperaturas elevadas com velocidades maiores poderiam ter modificado a estrutura da superfície das sementes. Vários compostos orgânicos (lipídios, proteínas, carboidratos, etc.) podem ser encontrados nas sementes, proporcionando alterações em um ou mais compostos quando submetidos à temperaturas maiores do que 60°C, dificultando o processo de secagem. A Figura 26, na qual a temperatura foi mais branda, o comportamento da transferência de massa e calor seguiu o padrão. Quanto maior a vazão de ar, maior foi a taxa de transferência de massa e calor e, assim, mais rápido ocorreu a secagem.

3.2.2. Cinética de secagem

Quatro modelos semiempíricos de cinética de secagem foram avaliados: Lewis (Bruce; 1985), Overhults (Barrozo; 1995), Exponencial com dois termos (Sharaf-Eldeen et al.; 1980) e Aproximação da difusão (Yaldiz e Ertekin; 2001). Para a verificação do melhor ajuste foi utilizado o R^2 , a Soma dos Quadrados dos Resíduos (SQR) e o Erro Quadrado Médio (EQM). Os valores dos parâmetros ajustados e das análises são apresentados na Tabela 5. O ensaio 12 não foi utilizado, devido ao fato do mesmo ter apresentado comportamento irregular, atribuindo-se isto ao erro experimental.

Analisando os modelos estudados, foi observado que o modelo de Lewis apresentou em todos os casos a maior soma dos quadrados dos resíduos, variando-se entre 0,0766 e 0,005, e o maior erro quadrado médio, variando entre 0,0036 a 0,0002. Os valores de R^2 ficaram entre 0,98 e 0,99. Esta característica, conforme descrito por Costa (2012), está relacionada ao número de parâmetros a serem ajustados que, neste caso é somente um, sendo assim mais eficiente.

Ao analisar-se os outros modelos, pode-se observar que todos tiveram suas soma dos quadrados dos resíduos baixa, sendo que o valor máximo foi de 0,02, o que indica que o modelo tendeu a proporcionar um bom ajuste para as situações estudadas. Este pode ser confirmado ainda com a análise do R^2 , em que todos os ajustes possuíram 0,99 e o erro quadrado médio, em que o valor máximo foi de 0,0011.

Porém, quando analisada a facilidade usual dos modelos, devido a todos os modelos apresentarem bons ajustes para os dados estudados, atribui-se isto a quantidade de parâmetros necessários. Observando este quesito, definiu-se que os melhores modelos são o Lewis e o de Overhults.

A última análise realizada foi para a verificação da qualidade dos modelos, utilizando a distribuição dos resíduos. Na Figura 27, são apresentados os modelos ajustados para os ensaios realizados nas mesmas condições experimentais no ponto central. A partir da análise gráfica, pode verificar-se que todos os modelos apresentaram um ajuste muito próximo dos

dados experimentais. O modelo que tende a ser mais distante dos dados ajustado é o modelo de Lewis, devido ao fato deste possuir somente um termo para ajuste.

Na Figura 28, são apresentados os resíduos do ponto central dos quatro modelos ajustados.

Tabela 5 - Resultado dos ajustes dos parâmetros e as análises estatísticas de cada modelo no DCCR.

Modelo	T (°C)	U (m s ⁻¹)	K		R ²	SQR	EQM	
Lewis	48	1,29	0,00930		0,9978	0,0217	0,0004	
	91	1,29	0,03341		0,9925	0,0292	0,0018	
	48	2,71	0,01531		0,9973	0,0223	0,0005	
	91	2,71	0,02766		0,9974	0,0125	0,0005	
	40	2	0,00886		0,9967	0,0323	0,0007	
	100	2	0,05683		0,9983	0,0054	0,0002	
	70	1	0,01789		0,9874	0,0766	0,0036	
	70	3	0,01976		0,9969	0,0191	0,0006	
	70	2	0,01757		0,9964	0,0241	0,0008	
	70	2	0,01307		0,9947	0,0414	0,0013	
	70	2	0,01849		0,9952	0,0322	0,0011	
	T (°C)	U (m s ⁻¹)	K	n	R ²	SQR	EQM	
Overhults	48	1,29	0,00923	1,13210	0,9992	0,0073	0,0001	
	91	1,29	0,03341	1,30365	0,9988	0,0047	0,0003	
	48	2,71	0,01538	1,18959	0,9995	0,0033	0,0000	
	91	2,71	0,02786	1,18189	0,9996	0,0017	0,0000	
	40	2	0,00872	1,15777	0,9989	0,0106	0,0002	
	100	2	0,05643	1,12914	0,9993	0,0022	0,0001	
	70	1	0,01812	1,44509	0,9997	0,0012	0,0000	
	70	3	0,01985	1,11455	0,9978	0,0134	0,0004	
	70	2	0,01764	1,21855	0,9997	0,0016	0,0000	
	70	2	0,01294	1,26075	0,9997	0,0021	0,0000	
	70	2	0,01871	1,27086	0,9997	0,0018	0,0000	
	T (°C)	U (m s ⁻¹)	K	a	R ²	SQR	EQM	
Exponencial com dois termos	48	1,29	0,01233	1,67699	0,9992	0,0081	0,0001	
	91	1,29	0,04906	1,83202	0,9984	0,0060	0,0004	
	48	2,71	0,02169	1,75899	0,9996	0,0031	0,0000	
	91	2,71	0,0385	1,72830	0,9997	0,0013	0,0000	
	40	2	0,01178	1,69491	0,9988	0,0111	0,0002	
	100	2	0,07449	1,65608	0,9993	0,0021	0,0001	
	70	1	0,02913	1,98494	0,9995	0,0024	0,0001	
	70	3	0,02590	1,63579	0,9979	0,0126	0,0004	
	70	2	0,02501	1,77085	0,9997	0,0015	0,0000	
	70	2	0,018828	1,81120	0,9996	0,0027	0,0000	
	70	2	0,027726	1,84215	0,9998	0,0011	0,0000	
	T (°C)	U (m s ⁻¹)	K	K2	a	R ²	SQR	EQM
Difusão aproximado	48	1,29	0,01050	0,07521	1,117723	0,9996	0,0031	0,0000
	91	1,29	0,03800	7,63115	1,121256	0,9958	0,0164	0,0011
	48	2,71	0,01834	0,09679	1,178865	0,9998	0,0013	0,0000
	91	2,71	17,03824	0,03044	-0,08151	0,9989	0,0053	0,0002
	40	2	39,36948	0,00946	-0,05881	0,9980	0,0188	0,0004
	100	2	20,58450	0,06210	-0,08719	0,9992	0,0025	0,0001
	70	1	14,79568	0,02167	-0,17601	0,9966	0,0204	0,0010
	70	3	44,62603	0,02075	-0,03880	0,9973	0,0166	0,0005
	70	2	51,52104	0,01950	-0,08769	0,9986	0,0095	0,0003
	70	2	59,13556	0,01446	-0,08941	0,9974	0,0199	0,0006
	70	2	36,31166	0,02108	-0,11161	0,9984	0,0102	0,0003

Fonte: Autor (2014)

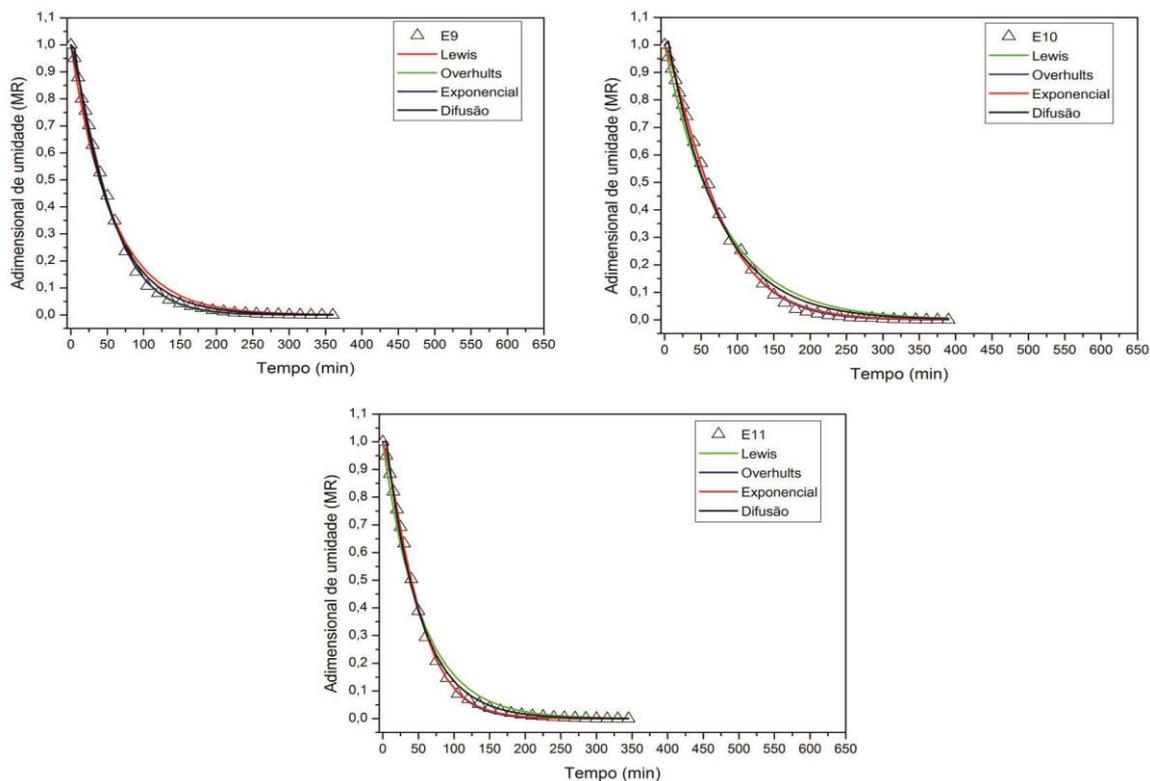


Figura 27 – Modelos Ajustados para os dados experimentais para os ensaios 9, 10 e 11, Temperatura de secagem de 70°C e velocidade de 2 m s⁻¹. Fonte: Autor (2014).

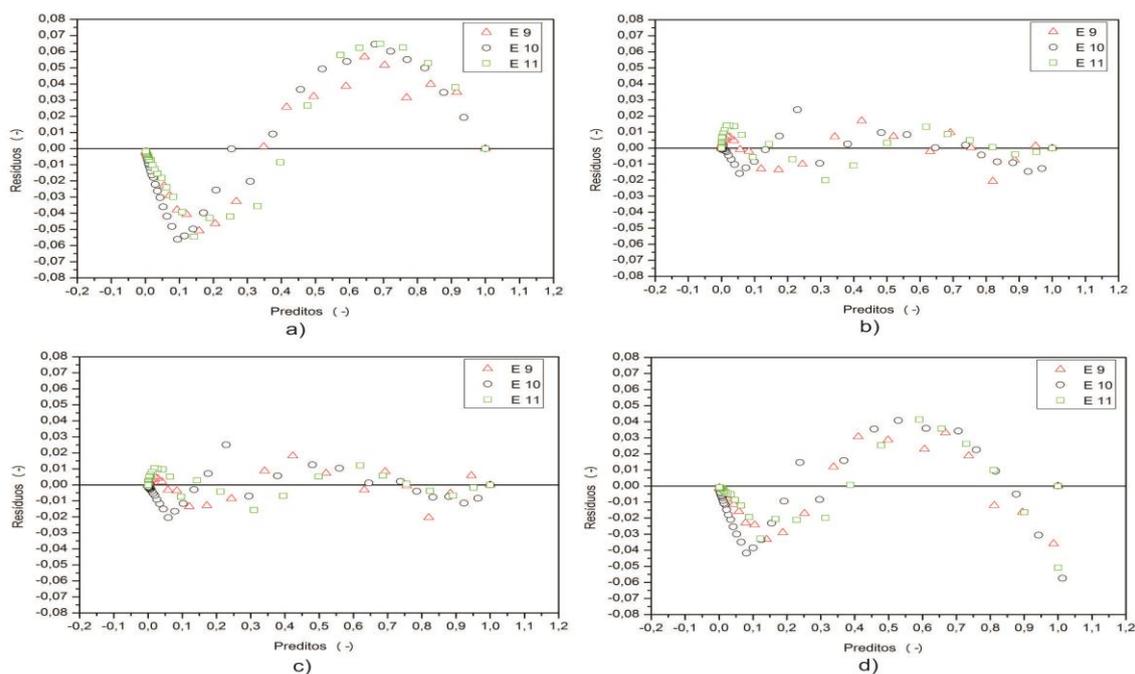


Figura 28 – Distribuição dos resíduos dos modelos a) Lewis, b) Overhults, c) Exponencial com dois termos e d) Aproximação da Difusão, no ponto central $T = 70^{\circ}\text{C}$ e $U = 2 \text{ m s}^{-1}$. Fonte: Autor (2014)

Analisando a Figura 28, pode-se verificar que o modelo de Lewis apresentou uma tendência na distribuição dos resíduos. Esse índice estatístico apresenta a informação de que o modelo não traz um bom ajuste para a predição dos dados propostos, necessitando de mais uma variável para ajustar o modelo. Já os modelos de Overhults e o Exponencial com dois termos demonstraram uma distribuição aleatória, obtendo-se um melhor ajuste. O modelo da Aproximação da Difusão apresentou o mesmo comportamento do modelo de Lewis. Mesmo possuindo um bom ajuste, a distribuição dos resíduos demonstrou uma distribuição tendenciosa e, assim, reduzindo a confiabilidade do modelo. Logo, o modelo de Overhults atendeu tanto a análise do R^2 como a distribuição dos resíduos e o menor número de parâmetros necessários para sua utilização.

3.2.3. Análise do DCCR para umidade das sementes

Nesta etapa, será apresentada a análise estatística do Delineamento Composto Central Rotacional, analisando a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem. Na Tabela 6, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados.

Tabela 6 – Resultados da umidade final das sementes obtidas no DCCR.

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m s ⁻¹)	Umidade % (b.u)
1	48	1,29	13,00%
2	91	1,29	6,00%
3	48	2,71	7,90%
4	91	2,71	8,50%
5	40	2	22,10%
6	100	2	9,00%
7	70	1	10,20%
8	70	3	9,30%
9	70	2	10,00%
10	70	2	7,40%
11	70	2	11,70%
12	70	2	22,10%

Fonte: Autor (2014)

Como foi mencionado anteriormente, o ensaio 12 foi excluído de todas as análises por apresentar comportamento fora do padrão dos demais.

Na Tabela 7, está apresentado a Análise de Variância (ANOVA) dos resultados do DCCR, utilizando o software Statistica 9.1. Foram analisadas a influência dos termos lineares (L) e quadráticos (Q) e a interação entre as variáveis num intervalo de confiança de 90%.

O gráfico de pareto, apresentado na Figura 29, demonstrou de forma mais clara a influência de cada variável.

Tabela 7 – Coeficientes de regressão para a umidade final das sementes de mamão.

Fator	Coeficientes de regressão	Erro Padrão	t(5)	p
Média	9,71564	1,979379	4,90843	0,004442
Temperatura (°C)(L)	-3,19112	2,427878	-2,62873	0,046604
Temperatura (°C)(Q)	1,89290	2,897090	1,30676	0,248168
Velocidade (m s ⁻¹)(L)	-0,39731	2,427878	-0,32729	0,756709
Velocidade (m s ⁻¹)(Q)	-0,97416	2,897090	-0,67251	0,531079
1L by 2L	1,97500	3,428426	1,15213	0,301359

Fonte: Autor (2014)

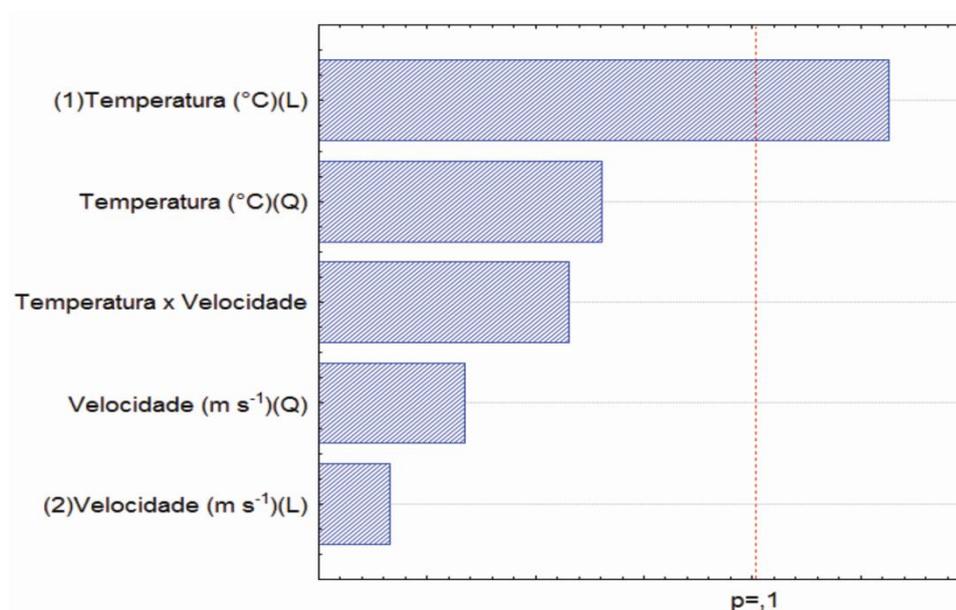


Figura 29 – Gráfico de pareto para o modelo da umidade final das sementes de mamão secas em secador convectivo horizontal. Fonte: Autor (2014).

Conforme visualizado no gráfico de pareto, a única variável que apresentou influência significativa foi a temperatura, com um comportamento linear. Esses valores foram analisados através do teste t. e reparametrizados utilizando somente as variáveis significativas. A Equação 14 descreve o modelo previsto para as variáveis significativas, neste caso a temperatura, utilizando os valores codificados.

$$Y (\%) = 10,38182 - 3,19122 T \quad (14)$$

Analisando o modelo reparametrizado, no qual há somente um termo referente à temperatura, pode-se verificar que a mesma apresentou um sinal negativo. Assim, observou-se que o comportamento da umidade é inversamente proporcional ao valor da temperatura, ou seja, quanto maior o valor da temperatura, menor será o valor da umidade final das sementes secas em túnel de vento.

Na Tabela 8, são apresentados os resultados da ANOVA, utilizando somente a variável significativa.

Tabela 8 – Tabelas ANOVA para Umidade.

Fator	SQR	GL	EQM	F	p
Temperatura (°C)(L)	81,2235	1	81,22354	6,648414	0,029772
Resíduos	109,9528	9	12,21698		
Total SS	191,1764	10			

$$R^2 = 42,48\% \quad F_{\text{tab}} = 3,36$$

Fonte: Autor (2014)

Depois de realizada a análise de variância demonstrada na Tabela 8, pode-se avaliar a qualidade do modelo estatístico obtido através dos dados experimentais. O primeiro parâmetro que deixou claro que o modelo não trouxe um bom ajuste foi o R^2 , pois este apresentou um valor de 42,48%, sendo muito baixo, assim afirmando que os dados experimentais ficaram distantes dos dados preditos pelo modelo. Através do teste F, pode-se realizar uma segunda análise do modelo, comparando o valor de F calculado pelo modelo e o F tabelado. O F calculado foi somente 1,97 vezes maior que o tabelado. Para que

o modelo fosse considerado satisfatório, segundo Biazus (2006), o valor de F calculado deveria ser de, no mínimo, quatro vezes maior que F tabelado. Conforme esta hipótese, pode-se verificar que o mesmo não atingiu o valor descrito e, assim, o modelo estatístico tornou-se inadequado para a previsão dos resultados de umidade final do produto através do termo temperatura.

3.2.4. Extração do óleo

Na Tabela 9, são apresentados os resultados obtidos para o rendimento do óleo, conforme o volume de solvente e a massa de sementes secas e moídas.

Tabela 9 - Rendimento de óleo obtido através da variação de solvente e massa da amostra.

Ensaio	Massa (g)	Volume (mL)	Teor de óleo (%)
1	72	158	11,73
2	128	158	13,86
3	72	442	13,55
4	128	442	14,64
5	60	300	17,80
6	140	300	7,61
7	100	100	0
8	100	500	14,14
9	100	300	8,05
10	100	300	7,04
11	100	300	9,18

Fonte: Autor (2014)

Nesta análise, foi somente interpretado o ponto no qual se obteve o melhor rendimento que foi no ensaio 5. Neste ensaio, foram utilizadas 60g de semente moída e 300mL de solvente. Assim, foram adotados estes valores para a obtenção de óleo nos demais experimentos.

3.2.5. Análise do DCCR para o rendimento de óleo das sementes de mamão

Nesta etapa, foi realizada a análise estatística do Delineamento Composto Central Rotacional, observando a influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no rendimento final de óleo. Na Tabela 10, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados.

Tabela 10 – Resultados do rendimento de óleo das sementes secas obtidas no DCCR.

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade (m s ⁻¹)	Rendimento (%)
1	48	1,29	13,11
2	91	1,29	14,54
3	48	2,71	14,86
4	91	2,71	18,44
5	40	2	13,72
6	100	2	16,40
7	70	1	17,24
8	70	3	15,62
9	70	2	18,56
10	70	2	19,23
11	70	2	19,03
12	70	2	13,89

Fonte: Autor (2014)

Conforme citado anteriormente, o ensaio 12 foi excluído das análises, considerado este como erro experimental.

Na Tabela 11, é apresentada a ANOVA dos resultados do DCCR, utilizando o software Statistica 9.1. Foram analisadas a influência dos termos lineares (L) e quadráticos (Q) e a interação entre as variáveis num intervalo de confiança de 90%.

As variáveis em vermelho foram as que apresentaram comportamento significativo nos resultados obtidos para o rendimento de óleo das sementes secas. A significância de cada termo pode ser facilmente verificada no gráfico de pareto, apresentado na Figura 30.

Após obter as variáveis significativas, foram ignorados os efeitos não significativos e gerado um modelo estatístico para obtenção dos valores preditos no rendimento do óleo de sementes de mamão. Esse modelo foi construído pelos coeficientes obtidos na Tabela 11 e demonstrado na Equação 15.

Tabela 11 – Coeficientes de regressão para rendimento de óleo das sementes secas de mamão.

Fator	Coeficientes de regressão	Erro Padrão	t(5)	p
Média	18,94523	0,764153	24,79248	0,000002
Temperatura (°C)(L)	1,10174	0,468649	2,35089	0,065488
Temperatura (°C)(Q)	-2,07577	0,559220	-3,71191	0,013828
Velocidade (m s ⁻¹)(L)	0,42049	0,468649	0,89724	0,410708
Velocidade (m s ⁻¹)(Q)	-1,38631	0,559220	-2,47900	0,055910
1L by 2L	0,53746	0,661783	0,81214	0,453624

Fonte: Autor (2014)

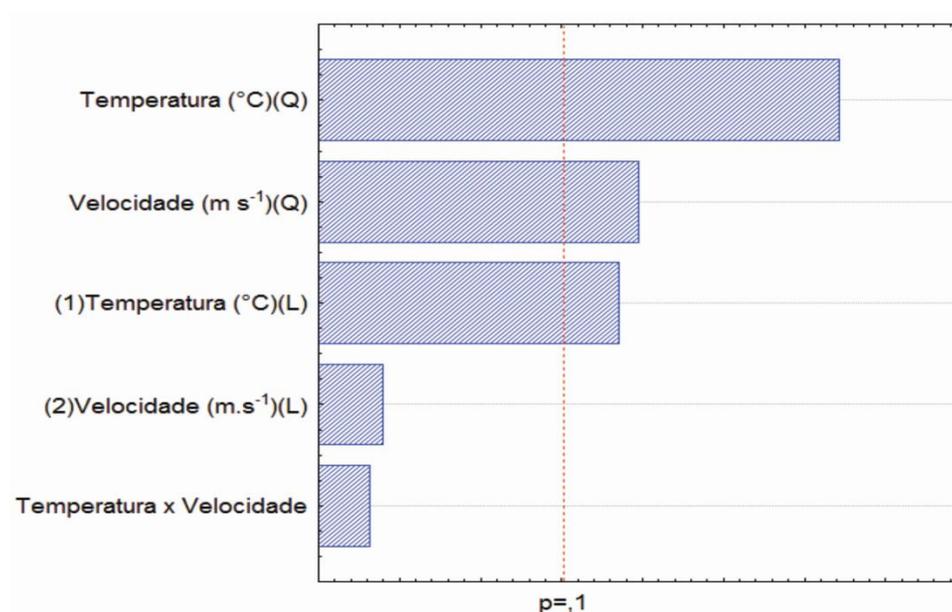


Figura 30 – Gráfico de pareto referente ao rendimento de óleo das sementes de mamão conforme o DCCR. Fonte: Autor (2014).

$$Y (\%) = 18,94523 + 1,10174 T^* - 2,07577 T^{2*} - 1,38631 U^{2*} \quad (15)$$

Onde: T=temperatura; U= velocidade; * valores codificados.

Na Tabela 12, são apresentados os resultados da ANOVA referente ao modelo. A partir da análise de variância demonstrada na Tabela 12, avaliou-se a qualidade do modelo gerado para o rendimento final do óleo. O R^2 apresentou um valor de 76,83, considerado baixo para ajustes quando se tem todas as variáveis externas não controladas. Porém, quando se trabalhou com sementes de mamão provenientes de resíduos (com diversos pontos de maturação do fruto) e com a secagem (com diversas variáveis externas não controladas, como as condições psicrométricas do ar de entrada), este valor de R^2 demonstrou uma precisão boa para a previsão aproximada dos valores de rendimentos obtidos nas condições trabalhadas.

Tabela 12 – Tabela ANOVA para rendimento de óleo.

Fator	SQR	GL	EQM	F	p
Regressão	44,58472	3	14,86157	9,186056	0,007991
Resíduos	11,32490	7	1,61784		
Total	55,90962	10			

$$R^2 = 76,83\% \quad F_{\text{tab}} = 3,07$$

Fonte: Autor (2014)

Outro parâmetro analisado para verificar a qualidade do modelo foi o teste F. O modelo apresentou um valor de F calculado de 9,186 e o valor de F tabelado é de 3,07. Conforme descrito anteriormente, por esta avaliação o modelo não apresentou uma boa predição dos valores, devido ao fato de o valor de F calculado ser 3 vezes maior que o tabelado, assim não atingindo a hipótese de que o valor do F calculado teria de ser no mínimo quatro vezes maior do que o valor de F tabelado.

A última análise para verificar a qualidade do modelo foi a identificação dos erros absoluto e relativo demonstrado na Tabela 13. Ao analisar-se o erro absoluto, foi observado que tem-se valores baixos, nos quais o erro máximo obtido nos valores calculados foi de 2,04%. Porém, se analisar o Erro relativo, esse valor foi baixo, mas há uma instabilidade no modelo quando se utilizar valores próximos aos extremos de temperatura e de velocidade do ar. Entretanto, ao analisarem-se os erros, notou-se que existe uma região ótima de trabalho, na qual se obtém bons valores de rendimento e com os menores

valores dos erros calculados. Esses valores podem ser mais facilmente verificados na superfície de resposta demonstrada na Figura 31.

Tabela 13 – Erro Absoluto e Erro relativo do modelo para previsão do rendimento de óleo.

Ensaio	Rendimento	Rendimentos previstos	Erro Absoluto	Erro Relativo
1	13,11	14,38	-1,27	-8,81
2	14,55	16,58	-2,04	-12,30
3	14,86	14,38	0,48	3,33
4	18,44	16,58	1,86	11,19
5	13,72	13,26	0,46	3,46
6	16,40	16,37	0,03	0,18
7	17,24	16,19	1,06	6,52
8	15,62	16,19	-0,57	-3,50
9	18,56	18,95	-0,38	-2,03
10	19,23	18,95	0,28	1,50
11	19,04	18,95	0,09	0,49

Fonte: Autor (2014)

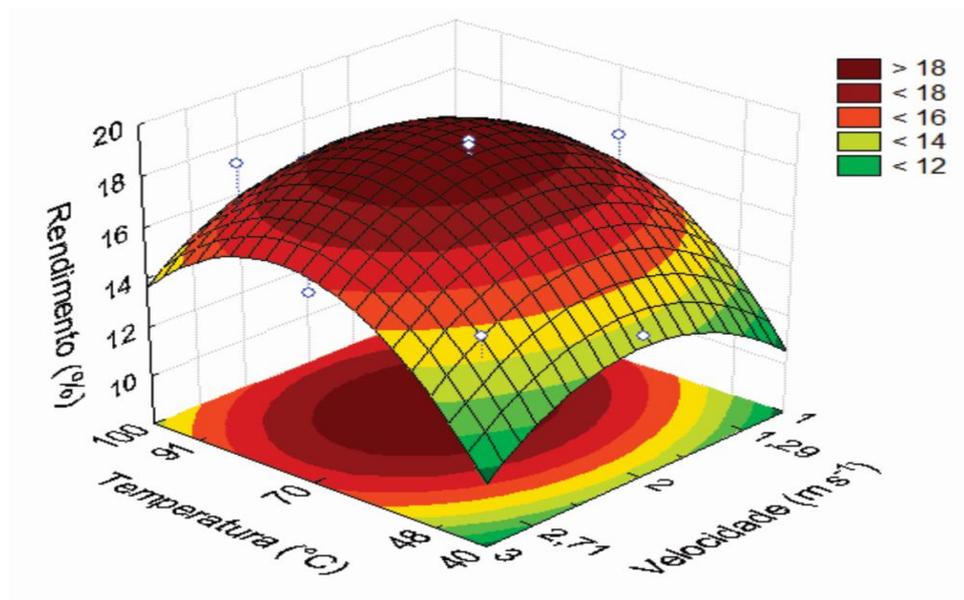


Figura 31 – Superfície de resposta para o rendimento de óleo obtido nas faixas experimentais de temperatura e velocidade. Fonte: Autor (2014).

Na superfície de resposta, a visualização de uma região ótima para os melhores rendimentos obtidos com os limites experimentais trabalhados apresenta-se destacada no entorno do ponto central. Pode-se observar que há

uma região com uma variação de 4% entre o melhor e o pior rendimento. Com esta visualização, observou-se que, ao trabalhar nos extremos dos dados experimentais, os resultados foram inferiores as demais áreas trabalhadas. Isto pode ser confirmado analisando-se a Tabela 13, através do erro relativo, na qual os valores foram baixos no ponto central e foi obtido o melhor rendimento de óleo.

A análise final pode ser realizada através da superfície de resposta. Ao se trabalhar com temperaturas maiores que 70°C, ocorreu alguma modificação nas características orgânicas das sementes ou na própria composição do óleo, pois trouxe uma redução do rendimento. Já nas menores temperaturas tem-se uma queda no rendimento devido aos maiores teores de umidade da semente, sendo que o rendimento é inversamente proporcional à umidade final da semente. No caso de se trabalhar com temperaturas inferiores a 70°C, a capacidade de retenção de vapor de água pelo ar foi reduzida e, conseqüentemente, as sementes ficarão com teores de umidade maiores, afetando diretamente o resultado final, necessitando de maior quantidade de produto para se obter o mesmo volume de óleo.

O melhor resultado dentre todos os ensaios realizados foi o 10, quando foi utilizada a temperatura de 70°C e a velocidade de 2 m s⁻¹ com o rendimento de 19,23%. O tempo para obter a umidade de equilíbrio foi de 390 minutos e a umidade final das sementes de 7,40% (b.u.). Após a identificação deste ponto, foi feita a análise da composição de ácidos graxos deste ensaio, apresentados na Tabela 14. Os demais resultados serão apresentados no Apêndice C, Tabela C1.

Conforme demonstrado por estudos da literatura, pode-se observar que a composição de ácidos graxos permaneceu apresentando a mesma tendência. O ácido Oleico, com 89,83% da composição dos ácidos graxos, apresentou-se com maior proporção. Observa-se que a composição dos ácidos graxos apresentou um perfil interessante, com grande volume de ácido graxo monossaturado, que pode ser de grande interesse para a utilização em fármacos.

A análise referente à temperatura e à velocidade mostraram que estas não apresentaram influência significativa sobre a modificação nas estruturas de ácido graxo, pois observou-se que o desvio padrão obtido entre os diversos

resultados não era de valores altos. Porém, não se podem obter afirmações conclusivas, pois diversas outras análises físico-químicas dos óleos obtidos teriam que ser realizadas para verificar se ocorreram alterações sobre o produto final.

Tabela 14 – Composição de ácido graxo do óleo extraído das sementes secas a 70°C e velocidade de 2 m s⁻¹.

Ácido Graxo	Quantidade (%)	Média dos Ensaio	Desvio Padrão
Ácido Mirístico C(14:0)	0,23	0,24	±0,011705
Ácido Palmitoleico C(16:1)	0,3	0,32	±0,027809
Ácido Esteárico C(18:0)	-	5,50	±0,156211
Ácido Oleico C(18:1)	89,83	84,66	±2,138749
NI*	3,52	3,43	±0,196557
Ácido Linoleico C(18:2)	5,04	5,68	±0,677153
NI*	0,42	0,45	±0,030222
Ácido Eicosênico C(20:1)	0,44	0,48	±0,027725
Ácido Docosadienóico C(22:2)	0,21	0,26	±0,049031

*NI- não identificado

Fonte: Autor (2014)

3.3. Secador leito de jorro

3.3.1. Fluidodinâmica das sementes de mamão

3.3.1.1. Velocidade Mínima de Jorro (U_{mj})

Para a identificação da velocidade mínima de jorro (U_{mj}) para sementes de mamão secas à temperatura ambiente, foi utilizada a análise visual do experimento, no qual, por diversas repetições, foi determinada em 8,4 m s⁻¹.

3.3.1.2. Análise da fluidodinâmica do leito de jorro

Nesta etapa, será discutido o comportamento das sementes de mamão dentro do leito de jorro através do adimensional de pressão. Serão demonstrados a influência da velocidade e da temperatura no comportamento fluidodinâmico do leito de jorro.

O comportamento da pressão foi analisado em relação às velocidades e as temperaturas utilizadas no decorrer do tempo para cada experimento. Nas

Figuras 32, 33 e 34, são apresentados os adimensionais de queda de pressão em diferentes velocidades e temperaturas. O adimensional de queda de pressão foi calculado dividindo-se cada valor de queda de pressão coletado no tempo pelo seu valor inicial.

A Figura 32 apresenta os valores obtidos do adimensional de pressão no ponto central (70°C e $1,25U_{mj}$ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) em relação ao tempo.

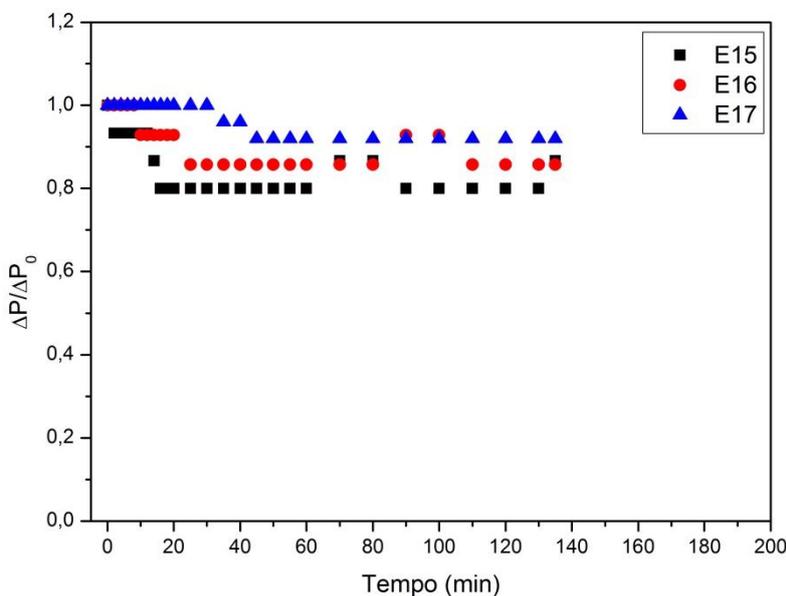


Figura 32 – Adimensional de pressão no leito de jorro em função do tempo, Ensaio 15, 16 e 17; U $10,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; T 70°C e tempo de 2,25 h. Fonte: Autor (2014)

Foi observado que há uma diferença de comportamento em cada experimento. Esta alteração pode ser explicada devido ao fato de que cada repetição foi feita em uma data diferente. Assim, cada período de realização dos ensaios possuía condições diferentes no ar ambiente, tendo sua temperatura e umidade relativa alteradas, interferindo nas propriedades do ar de entrada do leito de jorro e ocasionado pequenas alterações no comportamento fluidodinâmico.

Também foi observado que a distribuição das partículas dentro do leito, no período inicial, alterou o momento em que ocorre o início do jorro que, no ensaio 15 ocorreu aos 14 minutos, no ensaio 16 ocorreu aos 16 minutos e no ensaio 17 ocorreu aos 40 minutos. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de não ter sido realizada a homogeneização das sementes após serem colocadas

na câmara de secagem, ocorrendo diferentes distribuições e concentrações de partículas dentro do leito. Quando as partículas concentraram-se mais no centro da câmara de secagem, ou seja, diretamente sobre o orifício de entrada do ar de secagem, necessitou-se de maior energia para ocorrer o início do jorro, como foi observado no ensaio 17. No entanto, quando as partículas não se concentraram na parte central e sim próximo às extremidades da câmara de secagem. O jorro aconteceu em período de tempo menor, devido ao fato de não necessitar da mesma energia para iniciar o mesmo processo. Este comportamento foi observado nos ensaios 15 e 16.

Em uma análise geral do comportamento fluidodinâmico, em mesmas condições, o comportamento de P/P_0 demonstrou haver um padrão dentro das repetições, assim descrevendo que a pressão apresenta uma alteração somente até o momento que ocorre o jorro, depois que tem a tendência de manter-se estável.

Na Figura 33, é apresentada a influência da velocidade na fluidodinâmica das partículas.

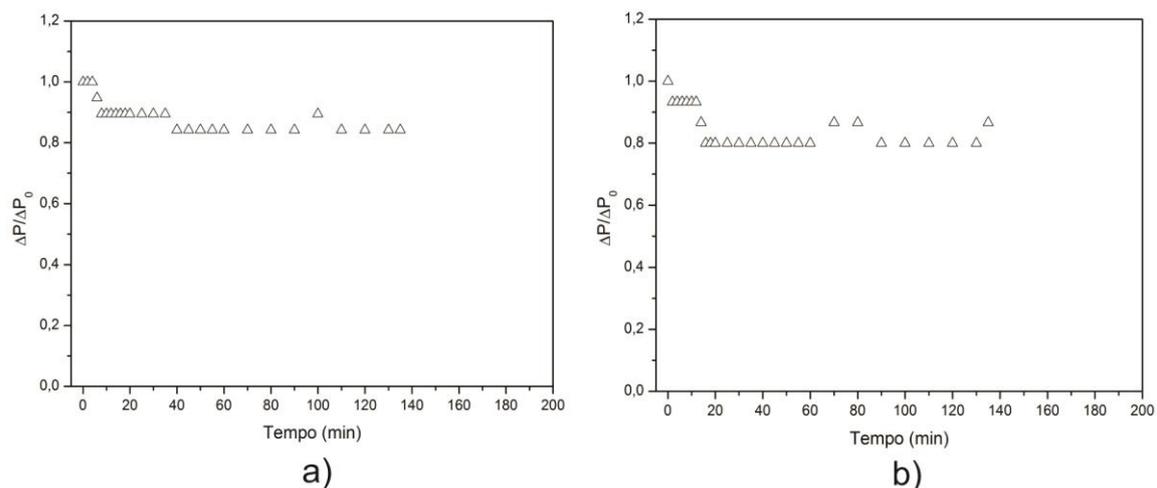


Figura 33 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de U , Ensaio 12 (a) e 15 (b): (a) $U = 11,76 \text{ m s}^{-1}$; $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $t = 2,25 \text{ h}$; (b) $U = 10,5 \text{ m s}^{-1}$; $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $t = 2,25 \text{ h}$. Fonte: Autor (2014)

A velocidade apresentou influência principalmente no tempo de início do jorro dentro da câmara de secagem, quando pode ser observado que, no Ensaio 15 (b), o jorro iniciou aos 14 minutos e no Ensaio 12 (a), no qual a velocidade foi superior, teve início aos 6 minutos. Outra constatação aconteceu

ao se utilizar maiores velocidades, pois observou-se a tendência de estabilização mais rápida da pressão. Esta avaliação torna-se importante, pois o aumento da velocidade não provocou aumento da pressão quando comparada a menores velocidades e, neste caso, obteve-se uma maior estabilidade.

Alterando a velocidade do ar de secagem, abre-se a possibilidade de obterem-se diferentes características fluidodinâmicas no leito, podendo provocar alterações desejadas, conforme o tipo de operação. Ao se aumentar a velocidade, conseqüentemente aumentou-se a vazão de ar, proporcionando o aumento na transferência de massa e calor, facilitando o processo de secagem e reduzindo o tempo. Porém, ocorreu a necessidade de se aumentar a potência para obter uma maior velocidade e isso deve ser analisado quando for considerada a questão econômica. Os demais ensaios comparando somente a mudança da velocidade do ar apresentaram comportamentos semelhantes e são apresentados no Apêndice D, Figuras D1, D2 e D3.

Na Figura 34, é analisada a influência da temperatura no comportamento fluidodinâmico das sementes.

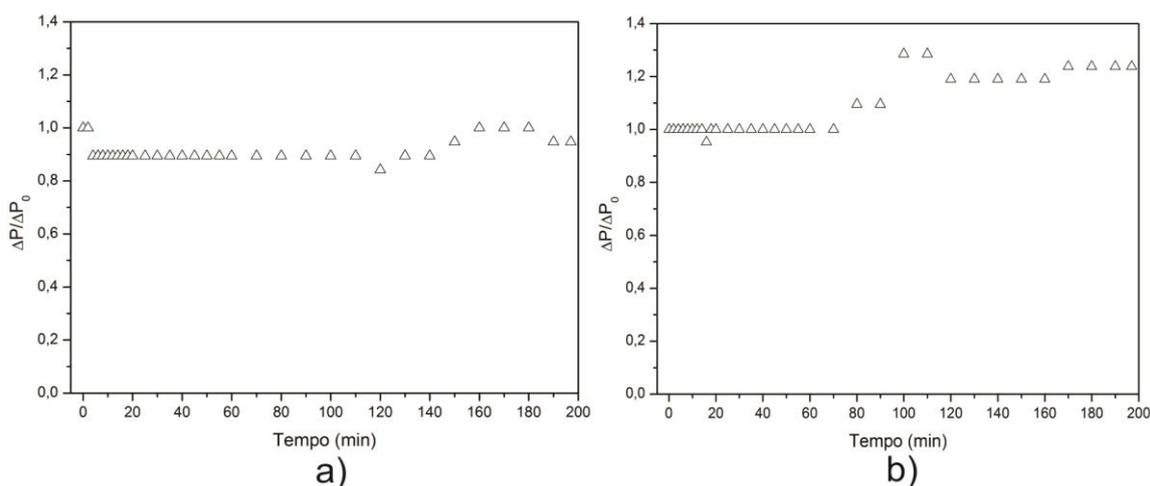


Figura 34 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de T, Ensaio 7 (a) e 8 (b); (a) U 11,25 m s⁻¹; T 52,1 °C e t 3,29 h; (b) U 11,25 m s⁻¹; T 87,9 °C e t 3,29 h. Fonte: Autor (2014).

O aumento da temperatura influencia no início do jorro. No ensaio 7, o jorro foi obtido aos 10 minutos; porém, no ensaio 8 foi aos 3 minutos. O comportamento apresentou uma tendência de que, ao se utilizar temperaturas

mais elevadas, houve um aumento no adimensional, que fica claro na Figura 34 (b), o que não foi observado quando trabalhado com temperaturas menores. Este comportamento pode ser explicado devido a uma rápida redução da umidade superficial e a um maior atrito entre as partículas e as paredes do equipamento. Com isso, as sementes de mamão liberavam um pó fino e também a exotesta, que interrompia o fluxo de ar e, conseqüentemente, ocasionava um aumento no adimensional de Pressão. Este comportamento pode ser observado em todos os experimentos que trabalharam com temperaturas superiores a 70°C e são demonstrados no Apêndice D, Figuras D4, D5 e D6.

3.3.2. Análise da secagem através do adimensional da umidade relativa

Nesta etapa, será analisada a secagem da semente de mamão pelo adimensional de umidade relativa do ar através das mudanças de temperatura e de velocidade do fluido no equipamento.

A Figura 35 demonstra a reprodutibilidade dos ensaios realizados no leito de jorro, nos quais é possível verificar o comportamento do adimensional de umidade relativa no ponto central.

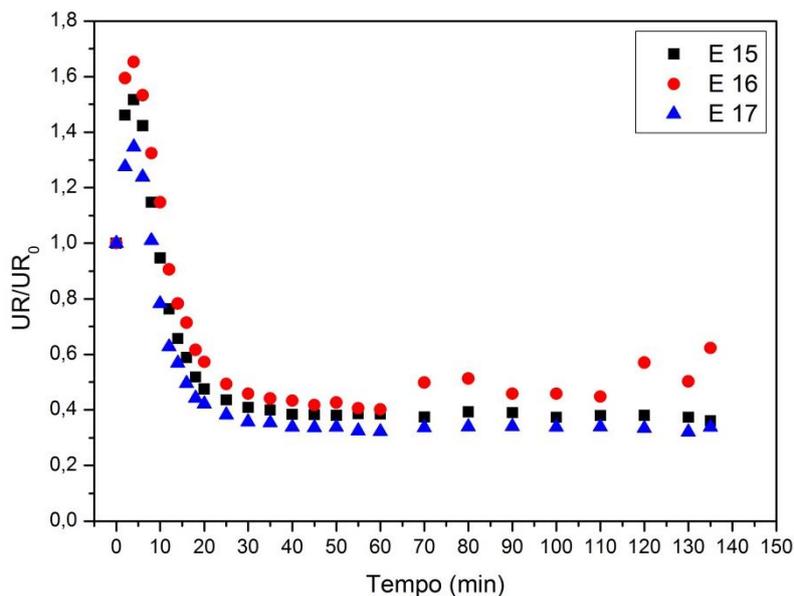


Figura 35 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 15, 16 e 17; U 10,5 m s⁻¹; T 70°C e tempo de 2,25 h. Fonte: Autor (2014)

Ao analisar-se o comportamento da umidade relativa, pode-se identificar como ocorreu a secagem das sementes dentro do leito de jorro. A primeira observação foi que as curvas apresentaram um comportamento semelhante no ponto central. Primeiro, obteve-se um pico do adimensional, no qual esta elevação ocorreu quando o equipamento precisou ser desligado para colocar as sementes dentro do mesmo. Logo, ocorreu a redução das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, mesmo que por um curto período de tempo. Após colocar as sementes e o equipamento ser religado, o fluxo de ar, devido ao aquecimento, alterou as condições psicrométricas e começou o processo de secagem. As sementes foram pré-secas a 40% (b.u.) para permitir o movimento do jorro. Porém, mesmo estando com esta umidade, o valor ainda foi considerado alto e com grande percentual de umidade na sua superfície. Assim, ocorreu a elevação do pico até que toda a água da superfície fosse retirada das sementes. Neste período, o processo de transferência de massa e calor, foi regido somente pela capacidade do fluido de absorver a umidade do produto, observado até o período de 20 minutos.

Após os 5 minutos, pode-se observar que o adimensional atinge um comportamento decrescente até obter-se um comportamento constante. Nesta

etapa, foi verificado que a secagem está regida pelo processo convectivo da umidade da superfície para o fluido.

Na Figura 36, foi analisada a influência da temperatura no comportamento do adimensional de umidade relativa.

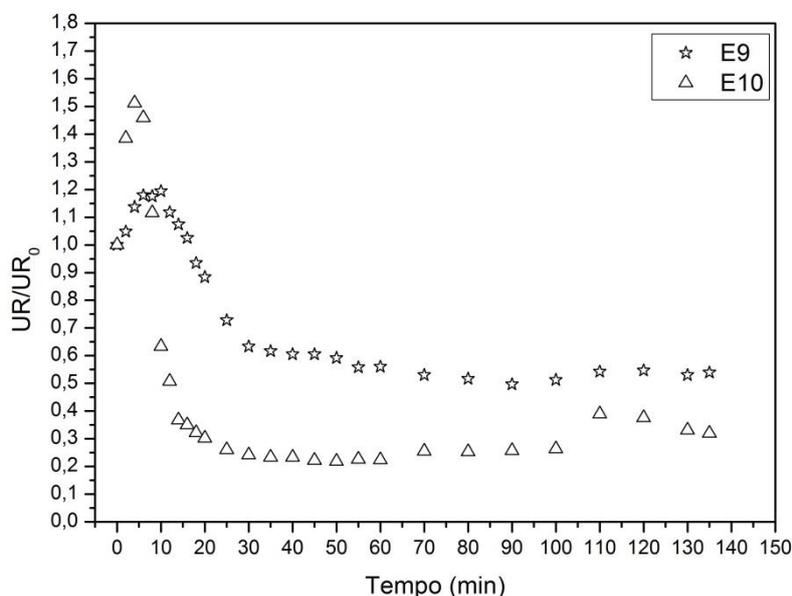


Figura 36 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 9: U $10,5 \text{ m s}^{-1}$; T 40°C e tempo de 2,25 h. Ensaio 10: U $10,5 \text{ m s}^{-1}$; T 100°C e tempo de 2,25 h. Fonte: autor (2014).

A temperatura apresentou uma grande influência no comportamento do adimensional de umidade. Foi observado que existe um pico sempre mais acentuado quando se utilizam temperaturas mais elevadas. Este comportamento foi atribuído ao fato do maior gradiente de temperatura aumentar o potencial do ar de secagem de absorver umidade, permitindo com isso que o ar armazene maior quantidade de vapor. Assim, houve uma maior distância do ponto inicial do adimensional de umidade relativa, que ficou de fácil visualização no ensaio 10. Também pode ser observado que a adimensional tendeu a atingir um comportamento constante ao utilizar temperaturas superiores, no qual o processo de transferência de massa foi controlado pelo processo difusivo. Outro fator importante que pode ser analisado foi que, ao se trabalhar com temperaturas maiores, a umidade final do produto foi menor para baixas temperaturas. O ensaio 10, que trabalhou com 100°C , apresentou a umidade final do produto de 3,3% (b.u.) e no ensaio 9, que utilizou a temperatura de 40°C , teve a umidade final do produto de

9,10% (b.u.). Este comportamento referente à influência da temperatura foi observado nos demais ensaios realizados e apresentados no Apêndice E Figuras E1, E2 e E3.

Na Figura 37 é apresentada a influência da velocidade do ar no comportamento do adimensional de umidade relativa.

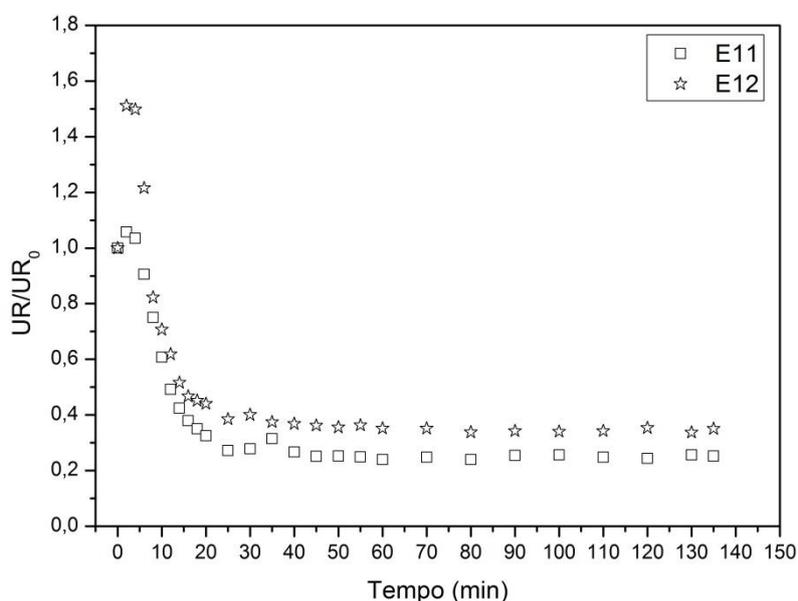


Figura 37 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 11: U 9,24 m s⁻¹; T 70°C e tempo de 2,25 h. Ensaio 12: U 11,76 m s⁻¹; T 70 °C e tempo de 2,25 h. Fonte: Autor (2014).

A velocidade do ar apresentou influência bem menor no comportamento do adimensional de umidade relativa. Para fazer a análise, compararam-se os extremos das velocidades, verificando que no ensaio 11 foi de 9,24 m s⁻¹ e no ensaio 12 foi de 11,76 m s⁻¹. Quanto maior a velocidade do ar, melhor foi o contato entre as partículas e o fluido, favorecendo assim o fenômeno de transferência de massa e calor. Conforme observado na Figura 37, o ensaio 12 apresentou um maior pico inicial, demonstrando que o mesmo tendeu a apresentar uma maior retenção de umidade em relação ao Ensaio 11 (menor velocidade). Porém, comparando os tempos, observou-se que os dois ensaios tenderam a apresentar praticamente o mesmo tempo para o adimensional de umidade. Outra análise realizada referente à velocidade foi a umidade final do produto. No ensaio 11, a umidade final foi de 5,10% (b.u.) e no ensaio 12 foi de 4,5% (b.u.). A variação entre as umidades finais não apresentou valores com

expressiva diferença, porém demonstrou que o ar exerce influência nos fenômenos de transferências de massa e calor. Nos demais ensaios com a comparação das velocidades, foram observados os mesmos comportamentos demonstrados no Apêndice E, Figura E4, E5 e E6.

3.3.3. Análise da umidade final do produto através do DCCR

Nesta etapa, foi realizada a análise estatística do Delineamento Composto Central Rotacional, avaliando a influência da temperatura, da velocidade do ar de secagem e do tempo de permanência dentro do equipamento. Na Tabela 15, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos realizados.

Na Tabela 16, são apresentados os valores dos coeficientes/efeitos dos resultados do DCCR, utilizando o software Statistica 9.1. Foram analisadas a influência dos termos lineares (L) e quadráticos (Q) e a interação entre as variáveis, com um intervalo de confiança de 90%.

As variáveis em vermelho foram as que apresentaram efeito significativo ($p < 0,1$) sobre a umidade final das sementes. A significância de cada variável fica mais fácil de ser visualizada no gráfico de pareto, demonstrado na Figura 38.

Tabela 15 – Resultados da umidade final das sementes (b.u.) obtidas no DCCR.

Ensaio	T (°C)	U (m s ⁻¹)	tempo (horas)	Umidade (%)
1	52,1	9,75	1,21	7,40%
2	87,9	9,75	1,21	4,50%
3	52,1	11,25	1,21	10,20%
4	87,9	11,25	1,21	6,40%
5	52,1	9,75	3,29	7,30%
6	87,9	-9,75	3,29	3,00%
7	52,1	11,25	3,29	6,00%
8	87,9	11,25	3,29	2,40%
9	40	10,5	2,25	9,10%
10	100	10,5	2,25	3,30%
11	70	9,24	2,25	5,10%
12	70	11,76	2,25	4,50%
13	70	10,5	0,5	9,00%
14	70	10,5	4	3,70%
15	70	10,5	2,25	5,20%
16	70	10,5	2,25	5,40%
17	70	10,5	2,25	4,25%

Fonte: Autor (2014)

Tabela 16 – Coeficientes de regressão para umidade final das sementes de mamão (b.u.).

	Coeficiente de regressão	Erro Padrão	t(7)	p
Média	4,94572	0,341267	14,4922	0,000002
Temperatura (°C)(L)	-1,78412	0,160356	-11,1260	0,000011
Temperatura (°C)(Q)	0,45722	0,176660	2,5881	0,036044
Velocidade (m s ⁻¹)(L)	0,13133	0,160356	0,8190	0,439773
Velocidade (m.s ⁻¹)(Q)	-0,03882	0,176660	-0,2197	0,832361
Tempo (h)(L)	-1,37078	0,160356	-8,5484	0,000060
Tempo (h)(Q)	0,51036	0,176660	2,8889	0,023351
1L by 2L	-0,02500	0,209422	-0,1194	0,908331
1L by 3L	-0,15000	0,209422	-0,7163	0,497027
2L by 3L	-0,82500	0,209422	-3,9394	0,005608

Fonte: Autor (2014).

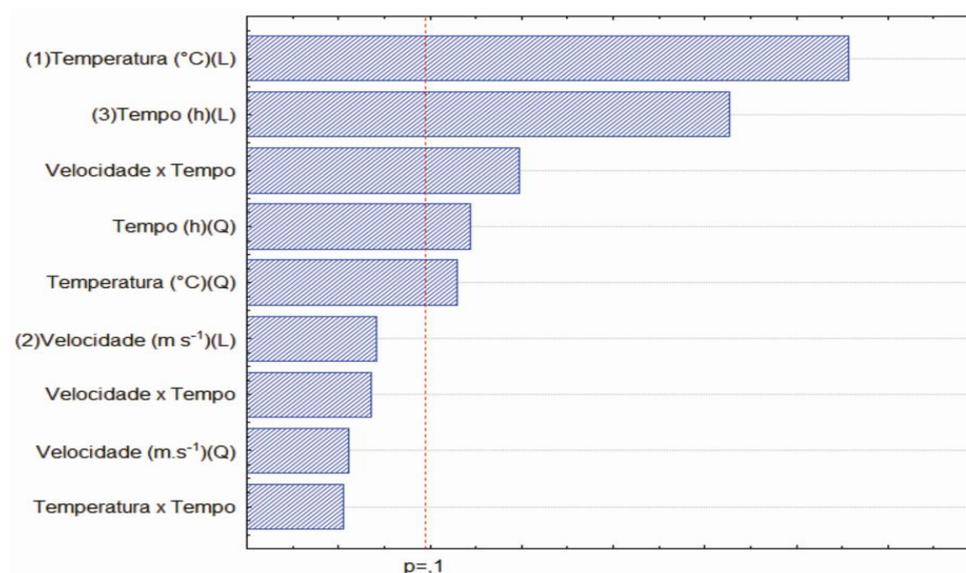


Figura 38 – Gráfico de pareto para a variável umidade final das sementes.

Fonte: Autor (2014)

Como pode ser observado, a variável que tem maior significância para os valores de umidade final é a temperatura. Conforme discutido anteriormente, sobre a adimensional de umidade, pode-se notar que a temperatura possui maior influência sobre as condições de secagem do ar. Segundo Almeida et al. (2009), existe sempre uma quantidade máxima de água que pode ser retirada pelo ar de secagem para uma determinada temperatura, independentemente da grandeza da vazão de ar de secagem alimentada. A segunda variável que mais apresentou valor significativo foi o tempo de permanência dentro do leito de jorro. Esta variável pode ser facilmente explicável, pois após a retirada da água livre dos produtos o processo difusivo do interior do produto para a superfície leva tempo para acontecer e este depende da temperatura e do tempo. Com isso, ao se retirar um produto com alguns minutos de permanência dentro de qualquer equipamento de secagem, tem-se sempre uma umidade alta e quanto maior o tempo de permanência dentro do equipamento mais o produto tenderá perder umidade para o ar de secagem. A temperatura também favorece os fenômenos de transferência de massa e calor.

Após esta análise, os dados foram reparametrizados, utilizando a ANOVA somente para as variáveis que foram significativas. A Equação 15 mostra o modelo previsto para as variáveis significativas demonstrado na Tabela 17, utilizando os valores codificados.

Na Tabela 18, são apresentados os resultados da ANOVA referente ao modelo obtido para a umidade final das sementes secas em leito de jorro.

Tabela 17 – Coeficientes de regressão reparametrizados para umidade final das sementes de mamão (b.u.).

Fator	Coeficiente de regressão	Erro Padrão	t(7)	p
Média	4,89622	0,221961	22,0590	0,000000
Temperatura (°C)(L)	-1,78412	0,138841	-12,8501	0,000000
Temperatura (°C)(Q)	0,46864	0,146182	3,2059	0,008367
tempo (h)(L)	-1,37078	0,138841	-9,8730	0,000001
tempo (h)(Q)	0,52179	0,146182	3,5694	0,004399
2L by 3L	-0,82500	0,181325	-4,5499	0,000830

Fonte: Autor (2014).

$$Y (\%) = 4,89622 - 1,78412 T + 0,46864 T^2 - 1,37078 t + 0,52179 t^2 - 0,82500 U t \quad (15)$$

onde: T= temperatura; t = tempo; U = velocidade; *Valores codificados.

Tabela 18 – Tabela ANOVA para umidade final em % (b.u.).

Fator	SQR	GL	EQM	F	p
Temperatura (°C)(L)	80,5713	5	16,11426	61,2639	0,000000
Resíduos	2,89332	11	0,26303		
Total	83,4646	16			

$$R^2=96,49; F_{\text{tab}}=2,45$$

Fonte: Autor (2014).

Na análise de variância demonstrada na Tabela 18, avaliou-se a qualidade do modelo gerado, sendo este considerado com um bom ajuste. O valor de R^2 apresentou um valor de 96,49. Este valor de R^2 foi muito satisfatório quando analisado em relação aos dados experimentais que não possuem todas as variáveis causalizadas. Para complementar a análise do modelo, foi verificado o teste F. O modelo apresentou um valor de F calculado de 61,2639, e o valor de F tabelado é de 2,45. Conforme descrito anteriormente, o modelo apresentou uma excelente predição dos valores, devido ao fato de o valor de F calculado ser 25 vezes maior que o tabelado. A hipótese era de que o valor do F calculado teria de ser no mínimo quatro vezes maior do que o valor de F tabelado. Sendo assim, este modelo cumpriu perfeitamente esta hipótese.

Para verificar o erro de predição do modelo, foram identificados os erros absolutos e os erros relativos demonstrados na Tabela 19. Os erros absolutos obtidos pelo modelo foram extremamente baixos, pois não chegam a 1%. Os erros relativos também apresentaram valores satisfatórios.

Após a realização destas análises, comprovando que o modelo possui um bom ajuste, foi construída a superfície de resposta para verificar o comportamento da umidade final do produto. Assim, identificou-se a região de maior interesse e as melhores condições experimentais. Foi construída a superfície de resposta fixando a velocidade no ponto central, conforme demonstrado na Figura 39.

Ao analisarem-se os dados experimentais e a superfície de resposta, pode ser observado que quanto maior a temperatura do ar de secagem e maior o tempo de permanência das sementes dentro do equipamento, há a tendência de que a umidade seja menor. Porém, não se pode afirmar um ponto ótimo e sim um ponto de maior ou menor umidade. Ao se utilizar o secador com as características citadas, o modelo pode prever um bom ajuste na umidade final das sementes de mamão, operando a temperatura e o tempo de permanência no equipamento adequado na operação. Para a construção das demais superfícies de resposta, variando os valores de velocidade do ar de entrada, foram observados os mesmos comportamentos.

Tabela 19 – Erro Absoluto e Erro relativo do modelo para previsão da umidade final.

Ensaio	Umidade observada (%)	Umidade prevista (%)	Erro Absoluto	Erro Relativo
1	7,4	8,22	-0,82	-11,03
2	4,5	4,65	-0,15	-3,30
3	10,2	9,87	0,33	3,27
4	6,4	6,30	0,10	1,59
5	7,3	7,12	0,18	2,40
6	3	3,56	-0,56	-18,56
7	6	5,47	0,53	8,75
8	2,4	1,91	0,49	20,55
9	9,1	9,22	-0,12	-1,28
10	3,3	3,22	0,08	2,38
11	5,1	4,90	0,20	4,00
12	4,5	4,90	-0,40	-8,80
13	9	8,67	0,33	3,65
14	3,7	4,07	-0,37	-9,89
15	5,2	4,90	0,30	5,84
16	5,4	4,90	0,50	9,33
17	4,25	4,90	-0,65	-15,21

Fonte: Autor (2014)

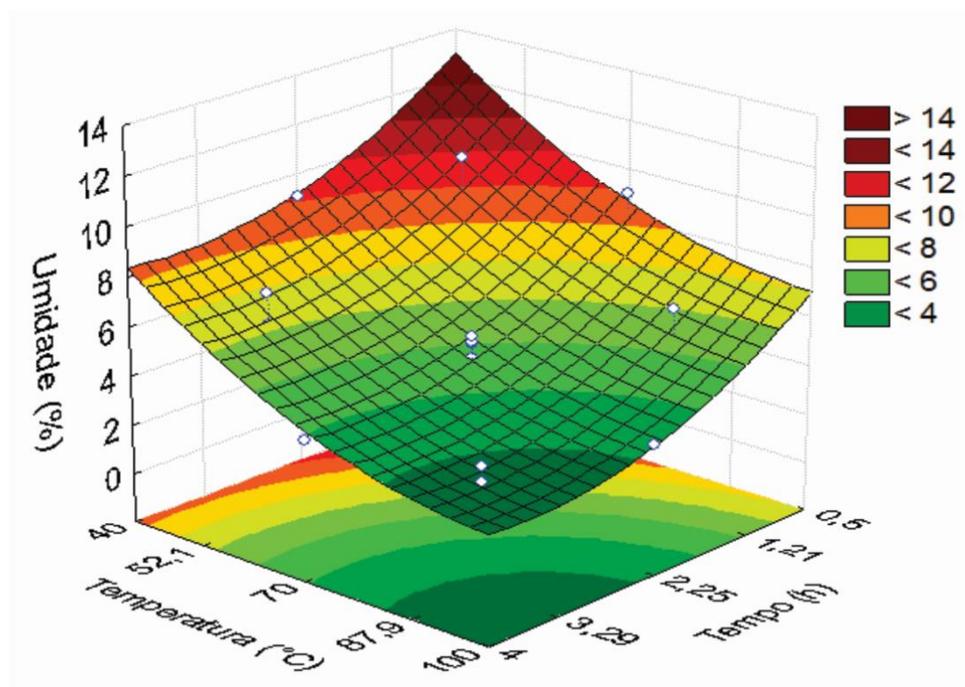


Figura 39 – Superfície de resposta para a umidade (b.u.) obtida nas faixas experimentais de temperatura e tempo, com a velocidade fixada no ponto central. Fonte: Autor (2014).

3.3.4. Análise do rendimento de óleo das sementes através do DCCR

Nesta etapa, foi feita a análise estatística do DCCR para avaliar a influência da temperatura, da velocidade do ar de secagem e do tempo de permanência dentro do equipamento no rendimento de óleo de sementes de mamão secas em leito de jorro. Na Tabela 20, são apresentados os resultados obtidos nos experimentos.

Tabela 20 – Valores experimentais obtidos no DCCR para o Rendimento de óleo extraído das sementes.

T (°C)	U (m s ⁻¹)	t (h)	Rendimento (%)
52,1	9,75	1,21	20,00
87,9	9,75	1,21	22,02
52,1	11,25	1,21	21,09
87,9	11,25	1,21	23,91
52,1	9,75	3,29	24,60
87,9	9,75	3,29	21,39
52,1	11,25	3,29	25,26
87,9	11,25	3,29	23,38
40	10,5	2,25	21,42
100	10,5	2,25	23,31
70	9,24	2,25	22,78
70	11,76	2,25	25,97
70	10,5	0,5	21,88
70	10,5	4	26,50
70	10,5	2,25	26,03
70	10,5	2,25	22,34
70	10,5	2,25	23,83

Fonte: Autor (2014)

Na Tabela 21, são apresentados os valores do efeito/coeficiente de regressão dos resultados do DCCR, utilizando o software Statistica 9.1. Foram

analisadas a influência dos termos lineares (L) e quadráticos (Q) e a interação entre as variáveis, com um intervalo de confiança de 90%.

Os valores em vermelho demonstram as variáveis que foram significativas para o rendimento de óleo obtido. O gráfico de pareto, apresentado na Figura 40, foi construído para observar as variáveis que mais influenciaram nos resultados obtidos de rendimento de óleo, dentro dos parâmetros estatísticos estudados.

Tabela 21 – Coeficientes de regressão para rendimento de óleo extraído das sementes de mamão secas.

	Coeficiente de regressão	Erro Padrão	t(7)	p
Média	24,13389	0,7392	32,644	0,00000
Temperatura (°C)(L)	0,21396	0,3473	0,6159	0,55743
Temperatura (°C)(Q)	-0,80674	0,3827	-2,108	0,07300
Velocidade (m s ⁻¹)(L)	0,80514	0,3473	2,317	0,05357
Velocidade (m.s ⁻¹)(Q)	-0,09518	0,3827	-0,248	0,81072
Tempo (h)(L)	1,12598	0,3473	3,241	0,01422
Tempo (h)(Q)	-0,15944	0,3827	-0,416	0,68944
1L by 2L	0,26560	0,4536	0,585	0,57663
1L by 3L	-1,24241	0,4536	-2,738	0,02897
2L by 3L	-0,04186	0,4536	-0,092	0,92907

Fonte: Autor (2014)

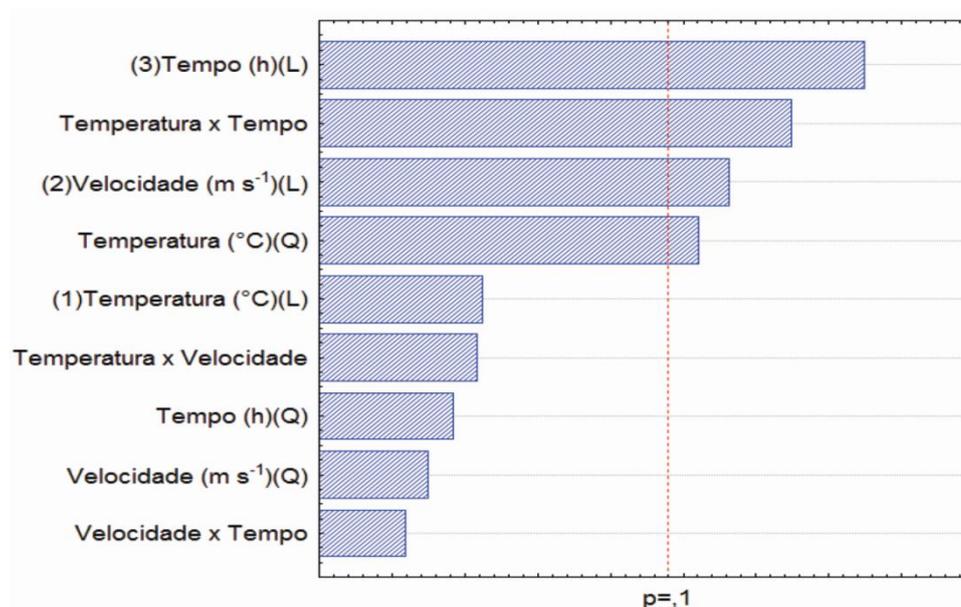


Figura 40 – Gráfico de pareto referente a rendimento de óleo obtido em leito de jorro. Fonte: Autor (2014)

No gráfico de pareto, observou-se que a variável que obtêm maior significância, conforme os parâmetros estatísticos estabelecidos, foi o tempo em âmbito linear. A análise que pode ser realizada foi a grande influência deste parâmetro sobre o rendimento final e a relação da umidade final com o volume de óleo extraído. O rendimento de óleo é inversamente proporcional à umidade do produto, pois quanto maior o teor de água dentro das sementes precisará de maior massa de sementes para atingir o mesmo rendimento. Esta análise também pode ser realizada para a interação tempo e temperatura, pois estes dois parâmetros influenciaram diretamente na umidade final do produto. Outra análise que pode ser relacionada para o aumento do rendimento seria a retirada de impurezas das sementes. Quanto maior tempo dentro do equipamento, maior foi o atrito entre as partículas e parede. Com isso, retirou-se a sarcotesta das sementes de mamão e também as sementes com injúrias, que tiveram sua qualidade inferida.

Para a velocidade, pode-se refazer a mesma análise. Ao se trabalhar com maiores velocidades, tem-se um maior contato entre as partículas e um maior atrito entre elas. Além disso, pode-se retirar as sementes que apresentaram baixa qualidade ao se utilizar maiores velocidades por diferença de densidade, melhorando a qualidade das sementes utilizadas para a extração do óleo.

Após análise da significância de cada parâmetro, na Tabela 22 são apresentados os coeficientes de regressão reparametrizados e o modelo ajustado para o rendimento de óleo com os parâmetros codificados pela Equação 16.

Tabela 22– Coeficientes de regressão para rendimento de óleo extraído das sementes de mamão secas.

	Coeficiente de regressão	Erro Padrão	t(7)	p
Média	23,88305	0,343346	69,559	0,000000
Temperatura (°C)(Q)	-0,74883	0,289380	-2,587	0,023757
Velocidade (m s ⁻¹)(L)	0,80514	0,282243	2,8526	0,014551
Tempo (h)(L)	1,12598	0,282243	3,9893	0,001796
1L by 3L	-1,24241	0,368605	-3,3705	0,005564

Fonte: Autor (2014)

$$Y (\%) = 23,88305 - 0,74883 T^2 + 0,80514 U + 1,12598 t - 1,24241 T t \quad (16)$$

onde: T = temperatura; U = velocidade; t = tempo; * variáveis codificadas.

A Tabela 23 apresenta os resultados da ANOVA referente ao modelo obtido para o rendimento de óleo.

Tabela 23 – Tabela ANOVA para rendimento.

Fator	SS	df	MS	F	p
Regressão	45,77180	4	11,44295	10,5274	0,000674
Resíduos	13,04352	12	1,08696		
Total	59,12047	16			

$$R^2=77,823; F_{\text{tab}}=2,48$$

Fonte: Autor (2014)

Na análise de variância demonstrada na Tabela 23, observou-se que R^2 apresentou um valor de 77,823. Este valor de R^2 foi satisfatório quando se analisou um modelo obtido com produtos com características não padronizadas ou causalizadas, ou seja, as sementes eram secas e o processo de extração era realizado sob condições controladas. Porém, as sementes eram obtidas de produtos que seriam descartados, sendo difícil, desta maneira, manter uma homogeneização das sementes em suas características físico-químicas. A análise do modelo foi verificada pelo teste F. O modelo apresentou um valor de F calculado de 10,5274 e o valor de F tabelado é de 2,48. Conforme descrito anteriormente, o modelo apresenta uma excelente predição dos valores, devido ao fato de o valor de F calculado ser 4,2 vezes maior que o tabelado. A hipótese era de que o valor do F calculado teria de ser no mínimo quatro vezes maior do que o valor de F tabelado. Assim o modelo atendeu esta hipótese.

Para verificar o erro de predição do modelo, foram identificados os erros absolutos e os erros relativos demonstrados na Tabela 24. Os erros absolutos obtidos pelo modelo foram extremamente baixos, pois não chegam a 2,1%. Os erros relativos também apresentaram valores baixos, demonstrando, assim, que mesmo o R^2 não sendo um valor considerado bom, este modelo apresentou uma boa predição com os valores baixos de erros.

Após a verificação dos erros do ajuste do modelo e tendo a sinalização de que o mesmo apresentou um bom ajuste, foram construídas as superfícies de resposta para as variáveis significativas. Na Figura 41, é demonstrada a superfície de resposta referente à velocidade e ao tempo, fixando a temperatura no ponto central. Pode se observar um comportamento linear das variáveis velocidade e tempo. Verificou-se também que quanto maior o tempo de permanência e maior a velocidade, melhores foram os resultados para o rendimento de extração de óleo de sementes de mamão.

Na Figura 42 está demonstrada a superfície de resposta referente à temperatura e ao tempo, fixando a velocidade no ponto central.

Tabela 24 - Erro Absoluto e Erro relativo do modelo para previsão do rendimento de óleo das sementes secas em leito de jorro.

Ensaio	Rendimento observado (%)	Rendimento previsto (%)	Erro do ajuste	Erro Relativo
1	20,00	19,96	0,04	0,21
2	22,02	22,45	-0,42	-1,91
3	21,09	21,57	-0,48	-2,26
4	23,91	24,06	-0,14	-0,57
5	24,60	24,70	-0,09	-0,38
6	21,39	22,21	-0,82	-3,82
7	25,26	26,31	-1,04	-4,12
8	23,38	23,82	-0,44	-1,89
9	21,42	21,77	-0,34	-1,60
10	23,31	21,77	1,54	6,62
11	22,78	22,53	0,25	1,12
12	25,97	25,24	0,73	2,83
13	21,88	21,99	-0,10	-0,47
14	26,50	25,77	0,73	2,75
15	26,03	23,88	2,16	8,28
16	22,34	23,88	-1,54	-6,89
17	23,83	23,88	-0,04	-0,19

Fonte: Autor (2014)

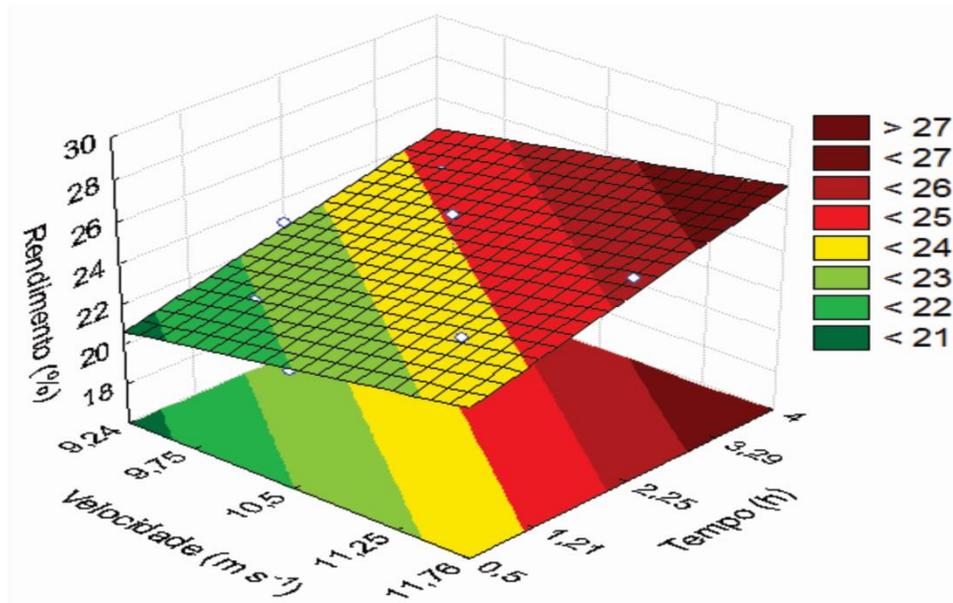


Figura 41 – Superfície de resposta para rendimento (%) obtido nas faixas experimentais de velocidade e tempo, com a temperatura fixada no ponto central. Fonte: Autor (2014)

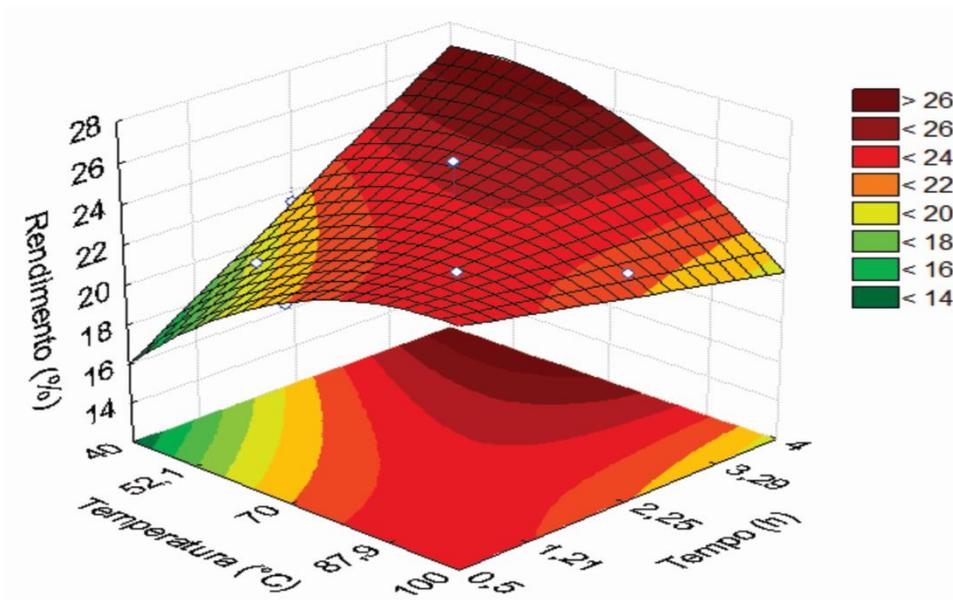


Figura 42 – Superfície de resposta para rendimento (%) obtido nas faixas experimentais de temperatura e tempo, com a velocidade fixada no ponto central. Fonte: Autor (2014).

Ao se analisar a superfície (Figura 42), observou-se um comportamento quadrático da temperatura, em que fica nítida (demonstrada) a tendência de que os extremos reduzem o rendimento. A variável tempo, conforme discutido anteriormente, apresentou o comportamento proporcional, sendo que quanto maior o tempo maior o rendimento. Porém, existe uma interação entre a temperatura linear e o tempo linear. Ao observar-se esta interação, pode-se notar que existiu uma região que delimita a questão de temperatura e tempo para obter os melhores resultados. Sendo assim, demonstrou-se a necessidade de reduzir os limites utilizados neste trabalho, a fim de obter informações mais precisas sobre esta interação.

Na Figura 43 está demonstrada a superfície de resposta referente à temperatura e a velocidade, fixando o tempo no ponto central.

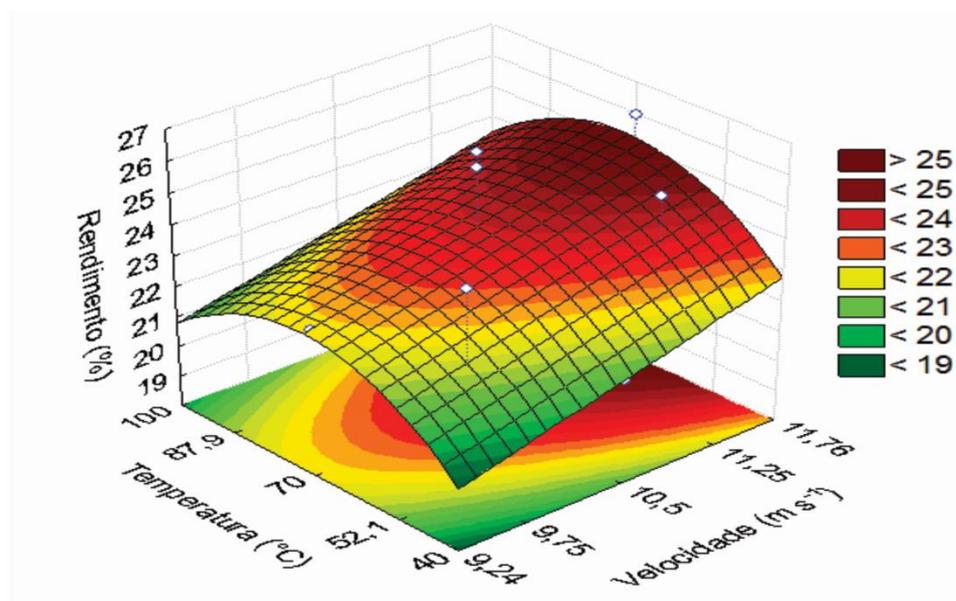


Figura 43 – Superfície de resposta para rendimento (%) obtido nas faixas experimentais de temperatura e velocidade, com tempo fixado no ponto central.

Autor (2014).

Esta superfície de resposta demonstrou que a temperatura e velocidade tem uma região de trabalho na qual se obtém valores mais elevados de rendimento. Temperaturas e velocidades baixas tenderam a reduzir o rendimento de óleo extraído, assim como temperaturas e velocidades elevadas tenderam a reduzir o rendimento. Logo, a região com os melhores resultados

foram aquela nas quais se tem altas velocidades e faixas médias de temperaturas utilizadas para estes experimentos.

O melhor resultado dentre todos os ensaios realizado foi no ensaio 14, com temperatura de 70°C, velocidade de 10,5 m s⁻¹ e tempo de permanência no equipamento de 4 horas. Para este caso, o rendimento obtido foi de 26,5% e a umidade final das sementes foi de 3,7% (b.u.). Após a identificação deste ponto, foi feita a análise da composição de ácidos graxos demonstrados na Tabela 25. Os demais resultados estão apresentados no Apêndice C, Tabela C2

Tabela 25 – Composição de ácidos graxos das sementes secas a 70°C, velocidade de 10,5 m s⁻¹ e tempo de 4 horas.

Ácido Graxo	Quantidade (%)	Média dos Ensaios	Desvio Padrão
Ácido Mirístico C(14:0)	0,15	0,17	±0,043188
Ácido Palmítico C(16:0)	16,32	16,47	±0,492659
Ácido Palmitoléico C(16:1)	-	0,23	±0,077044
Ácido Esteárico C(18:0)	4,28	4,61	±0,330234
Ácido Oleico C(18:1)	71,52	70,62	±1,031794
NI*	2,08	2,10	±0,554908
Ácido Linoleico C(18:2)	5,06	5,03	±0,350656
Ácido Araquidônico C(20:0)	0,27	0,31	±0,048254
Ácido Eicosênico C(20:1)	0,21	0,30	±0,052328
Ácido Linolênico C(18:3)	-	0,30	±0,400082
Ácido Docosadienoico C(22:2)	0,11	0,20	±0,051154

*NI- não identificado

Fonte: Autor (2014)

A composição dos ácidos graxos apresentou a tendência de ter uma proximidade novamente com os dados obtidos na literatura, nos quais o ácido que possui maior expressão é o ácido oleico que, no caso do melhor rendimento, obteve-se o valor de 71,52% da composição dos ácidos graxos. Observa-se que, pela média obtida em todos os experimentos, as variáveis de secagem não tiveram influência significativa sobre a composição dos ácidos graxos.

A mesma discussão realizada anteriormente sobre a qualidade do óleo deve ser repetida neste experimento, pois para se ter um resultado mais conclusivo sobre a qualidade do óleo final seriam necessários maiores estudos físico-químicos dos óleos extraídos para, assim, obter informações mais específicas sobre qual a qualidade deste óleo extraído.

4. CONCLUSÃO

4.1. Secador Convectivo Horizontal

- A temperatura reduz significativamente o tempo para as sementes atingirem o ponto de equilíbrio em secador convectivo horizontal.
- Maiores velocidade do ar, associadas à temperatura superior a 70°C, necessitaram de maior tempo para atingirem a umidade de equilíbrio das sementes.
- O melhor ajuste para a cinética de secagem de sementes de mamão foi por meio da equação de Overhults.
- Somente a temperatura foi significativa na secagem em secador convectivo horizontal. Porém, o modelo estatístico não apresentou bom ajuste, não sendo recomendado.
- A menor umidade final das sementes (6% b.u.) foi obtida à temperatura de 91°C e velocidade do ar de 1,29 m s⁻¹ no secador convectivo horizontal.
- O melhor rendimento de óleo foi obtido ao utilizar-se 60g de sementes de mamão moídas e 300mL de solvente.
- Temperatura e velocidade do ar tiveram efeitos significativos na obtenção do óleo.
- O melhor rendimento de óleo (19,23%) no secador convectivo horizontal foi obtido ao trabalhar-se com Temperatura de 70°C e velocidade 2 m s⁻¹.
- A temperatura e a velocidade do ar não apresentaram alteração significativa na composição dos ácidos graxos do óleo extraído no secador convectivo horizontal, no qual o ácido oleico possui maior teor, 89,83%±2,13 e o ácido linoleico o menor, com 5,04%±0,67.

4.2. Secador Leito de Jorro

- A velocidade mínima de jorro obtida foi de 8,4 m s⁻¹.

- Para a secagem de sementes de mamão em leito de jorro foi necessária a pré-secagem das sementes, devido à ocorrência de um colapso do jorro com as sementes próximas a 80% de umidade (b.u.)
- A distribuição das sementes dentro do leito de jorro alterou o comportamento fluidodinâmico, modificando o tempo necessário para iniciar o jorro.
- Após iniciar o jorro, a pressão tendeu a atingir um comportamento estável em todas as condições estudadas para o secador leito de jorro.
- O adimensional de pressão no leito de jorro estabilizou-se mais rapidamente ao se utilizar velocidades maiores.
- Temperaturas elevadas proporcionaram um aumento no adimensional de pressão, devido ao fato de as impurezas das sementes dificultarem o fluxo de ar no interior do equipamento.
- O adimensional de umidade atingiu comportamento constante mais rápido ao se utilizarem temperaturas maiores.
- O aumento da velocidade no leito de jorro não teve influência significativa no comportamento do adimensional de umidade.
- Temperatura, tempo de permanência e a interação entre a velocidade e o tempo foram as variáveis significativas na umidade final do produto no secador leito de jorro. A temperatura foi a variável mais significativa e o modelo estatístico apresentou um bom ajuste.
- A menor umidade (2,4% b.u.) das sementes foi obtida à temperatura de 87,9°C, velocidade de 11,25 m s⁻¹ e tempo de permanência de 3,29 horas.
- Temperatura, velocidade e tempo de permanência das sementes no leito de jorro foram significativos para o rendimento de óleo extraído das sementes, em que a variável com maior influência foi o tempo de permanência. O modelo estatístico apresentou bom ajuste.
- O melhor rendimento (26,50%) de óleo foi obtido nas condições experimentais, com temperatura a 70°C, velocidade de 10,5 m s⁻¹ e tempo de permanência de 4 horas.
- As variáveis estudadas para a secagem das sementes em leito de jorro também não apresentaram influência no perfil dos ácidos graxos, em

que as composições dos principais ácidos são Oleico ($71,52 \pm 1,03\%$), Palmítico ($16,32 \pm 0,49\%$) e Linoleico ($5,06 \pm 0,35\%$).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRIANUAL 2012. **Anuário da Agricultura Brasileira**. Fundação Nacional de Pesquisa. 2012.

ALMEIDA, A. R. F. de (2009) *Análise da secagem de pasta em leito de jorro*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – São Carlos – SP, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 165p.

ALVES FILHO, O; MASSARANI, G., *Secagem de produtos agrícolas – coletânea de trabalhos 2*. Rio de Janeiro, UFRJ, 1987. p. 77-89.

ALVES, S. M. **Secagem de tomates via processo combinando convecção osmótica, convecção e desidratação osmótica-vácuo**. 2002. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2002.

AVERSA, M.; CURCIO, S.; CALABRÒ, V.; IORIO, G. *An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process*. Journal of Food Engineering, v. 78, p. 922-932, 2007.

BALBINOT, E. (2004) *Importância do manejo dos frutos na secagem e armazenamento de sementes de mamão (Carica papaya L.)* Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF, 52p.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos- Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. Ed. Unicamp, Campinas, 2001, 401 p.

BARROZO, M.A.S. **Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamento cruzado**. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 163p. 1995.

BENASSI, A.C. **A economia do mamão**. Toda Fruta, edição: 24/11/2006. Disponível em: <[http:// www.todafruta.com.br](http://www.todafruta.com.br)>. Acesso em: 30 de dezembro de 2013.

BONES, A. M.; ROSSITER, B. (1996). *Physiol. Plant.* 97, 194.

BOX, G. E. P., HUNTER, W, G. e HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction to designs, data analysis and model building.** Wiley. New York, 1978.

BRUCE, D. M. 1985. Exposed-layer barley drying, three models fitted to new data up to 150_C. *Journal of Agricultural Engineering* 32:337–347.

BRUNELLO, G.; PECK, R.E.; DELLA NINA, G., The drying of barley malt in the spouted bed dryer, *Can. J. Chem. Eng.*, v.52, p.201-205, 1974.

CANESIN, J. M.; MASSARANI, G., Secagem de arroz em leito de jorro. In: ANAIS DO 3º ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE SECAGEM, 3, 1984, Viçosa.

CARLESSO, V. O. **Secagem e armazenamento de sementes de mamão (Carica papaya L.).** 2009. 132 f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2009.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, 29, 2007. 28-37.]

CASTRO, I. M.; ANJOS, M. R.; OLIVEIRA, E.S. (2008). Determinação de isotiocianato de benzila em Carica papaya utilizando cromatografia gasosa com detectores seletivos. *Quim. Nova*, Vol. 31, No. 8, 1953-1959.

CHIRIFE, J. **Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods.** In: MUJUNDAR, A. *Advances in drying.* Washington/New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p. 73-102, 1983.

CORRÊA, R. M.; BERTOLUCCI, S. K. V.; PINTO, J. E. B. P.; REIS, E. S.; ALVES, T. L. (2004). **Rendimento de óleo essencial e caracterização organoléptica de folhas de assa-peixe submetidas a diferentes métodos de secagem.** *Ciênc. Agrotec.*, Lavras, v.28, nº 2, p.341- 346.

CORREA, R.M.; BERTOLUCCI, S.K. V; PINTO, J.E.B.P.; REIS, E.S.; ALVES, T.L. Rendimento de óleo essencial e caracterização organolépticas de folhas de assa-peixe submetidas a diferentes métodos de secagem. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 28, n. 2, p. 339-344, mar./abr. 2004.

COSTA, A. B. S. **Secagem de Folhas de Hortelã da Espécie (*Mentha x vilosa H.*)**. 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)- Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, São Carlos - SP, 2012.

CREMASCO, M. A. **Operações unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo - SP: Ed. Blucher, 2012. 423p.

CREMASCO, M. A.; ROCHA, S. C. S.; MASSARANI, G., Secagem de milho em leito de jorro para arroz III. In: MASSARANI, G. Secagem de produtos agrícolas – coletânea de trabalhos 2. Rio de Janeiro, UFRN, 1987. p.69-76.

D'AGOSTINI, F.; IZZOTTI, A.; BALANSKY, R. M.; BENNICELLI, C.; De Flora, S. (2005); *Mutat. Res.* 591, 173.

D'IMPERIO, M. et al. Statistical analysis on Sicilian olive oils. **Food Chemistry**, v. 102, n. 3, p. 956-965, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.03.003>

DANTAS, J. L. L.; DANTAS, A.C.V.L.; LIMA, J.F. **Melhoramento de fruteiras tropicais**. 2002. Viçosa, UFV. p. 422.

DAR, R. N., GARG, L.C., PATHAK, R.D. **Anthelmintic activity of Carica Papaya seeds**. *The Indian Journal of Pharm.*;27:335–6. 1965.

DESAI, U. T.; WAGH, A. N. Papaya. In: SALUNKHE, D. K.; KADAM, S. S. (Ed.). **Handbook of fruit science and technology**: production, composition, storage and processing. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 297-313.

ERTEKIN, C., O. YALDIZ. 2004. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. *Journal of Food Engineering* 63:349–359.

ETTLINGER, M.G., HODGKINS, J.E. (1956). The mustard oil of papaya seed. *Journal of Organic Chemistry* 21, 204–205. FARIAS, M. R. (2003). Em Avaliação da qualidade de matérias-primas vegetais; Simões, C. M. O.;

Schenkel, E. P.; Gosmann, G.; Mello, J. C. P.; Mentz, L. A.; Petrovick, P. R., eds.; Eds. UFRGS – UFSC: Rio Grande do Sul – Santa Catarina.

FAO. **Produção Mundial de mamão de 2011**. Disponível em: www.cnpmf.embrapa.br/. Atualizado em 16/01/2013. Acesso em 11/03/2014.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories their bases and limitations as applied to food and grains. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.). **Advances in Drying**. Washington: Hemisphere, 1980. p. 119-154.

FREIRE, J. T. (1992). Secagem de Pastas em Leito de Jorro, In: Freire, J. T.; Sartori, D. J. M. Tópicos Especiais em Secagem, Editora da UFSCar, São Carlos – SP, Vol.1, p.41-85.

GEANKOPLIS, C. J. (2003). **Transport processes and separation process principles (includes unit operations)**. 4. ed., Prentice Hall, New Jersey.

HATMAN, L.; LAGO, R.C.A. Rapid preparation of fatty acid methyl esters from lipids. Lab. Prac. V. 22, p. 475-483. 1973.

HENDERSON, S. M. 1974. Progress in developing the thin layer drying equation. Transactions of the ASAE 17:1167–1168.

HENDERSON, S. M., S. PABIS. 1961. Grain drying theory. II. Temperature effects on drying coefficients. Journal of Agricultural 44:1111–1122. *Informe Agropecuário*, 12 (134):14-18. Janeiro: Varela, 1989.

KARIMI, F; RAFIEE, S; TAHERI-GARAVAND; KARIMI, M. Optimization of an air drying process for Artemisia absinthium leaves using response surface and artificial neural network models. **Journal of Taiwan Institute of Chemical Engineers**, Taiwan, v. 43, p. 29-39, 2012.

KERMANSHAI, R.; McCarry, B. E.; Rosenfeld, J.; Summers, P. S.; Weretilnyk, E. A., Sorger, G. J. (2001). Benzyl isothiocyanate is the chief or sole anthelmintic in papaya seed extracts. *Phytochemistry* 57, 427–435.

KRISHNAKUMARI, M. K.; MAJUMDER, S. K. (1960). Studies on the anthelmintic action of seeds of *Carica papaya* Linn.. *Ann. Biochem. Exp. Med.*,2:551–6.

KUANG, Y. F.; CHEN, Y. H. (2004). Food Chem. Toxicol., 42, 1711.

KUDRA, T.; MUJUMDAR, A.S. Advanced Drying Technologies, Marcel Dekker, New York, 2002.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. **Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntia ficus indica*)**. Journal of Food Engineering, v.61, p. 173-179, 2004.

LAL J.; CHANDRA S.; RAVIPRAKASH V.; SABIR M. (1976). In vitro anthelmintic action of some indigenous medicinal plants on Ascaridia galli worms. Indian Journ of Physiol and Pharmacol;20:64–8.

LIMA, A. C.C., Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de forro fluidizado. Campinas, 1995. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas.

LIMA, P. M., Análise da fluidodinâmica e transferência de calor em leito de jorro com alimentação contínua de sólidos pela base. 114p. São Carlos, 2004. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, 2004.

LITZ, R.E. Papaya. In: SHARP, W.R.; EVANS, D.A.; AMMIRATO, V.; YAMADA, Y. eds. **Handbook of plant cell culture**, New York, MacMillan, 1984. v.2, p.349-68.

LUNA, J. V. U; (1986) **Variedades de mamoeiro**. Epamig, Belo Horizonte/MG

MACHADO, A. V.; OLIVEIRA, EDSON, L.; FREITAS, L. M.; OLIVEIRA, A. B. V.; SOUZA, J. S. O.; FREIRE, L. A. C. Cinética de secagem do caju em secador convectivo. In: JORNADA NACIONAL DA AGROINDÚSTRIA, 3., Bananeiras, 2008. Disponível em: http://www.seminagro.com.br/trabalhos_publicados/3jornada/02ciencia_tecnologia_de_alimentos/CTA0254.pdf > Acesso em 01 de janeiro de 2014.

MALACRIDA, C. R., M. KIMURA, et al. **Characterization of a high oleic oil extracted from papaya (*Carica papaya* L.) seeds**. Ciencia E Tecnologia De Alimentos 31(4): 929-934, 2011.

MARFO, E. K.; OKE, O. L.; AFOLABI, O. A. Chemical composition of papaya (*Carica papaya*) seeds. **Food Chemistry**, v. 22, n. 4, p. 259-266, 1986. [http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146\(86\)90084-1](http://dx.doi.org/10.1016/0308-8146(86)90084-1)

MARIN, S.L.D. et al. Recomendações para a cultura do mamoeiro dos grupos Solo e Formosa no Estado do Espírito Santo. 4.ed. Vitória EMCAPA, 1995. 57p. (EMCAPA, Circular Técnica, 3).

MARIN, S.L.D.; GOMES, J.A. **Morfologia e biologia floral do mamoeiro**. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 12, n. 134, p. 10-14, 1986.

MARRETO, R.N.; FREIRE, J.T.; FREITAS, L.A.P. Drying of pharmaceuticals: the applicability in spouted beds, *Drying Technology*, v. 24 (3), p. 327-338, 2006.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. de C. **Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental 2007; 11(3): 301-306.

MASSARANI, G. **“Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”**. 1a. Edição. UFRJ, 1997.

MATHERSON, B. et al. Effect on serum lipids of monoinsaturated oil and margarine in the diet of an Antarctic Expedition. *The American Journal of Clinical Nutrition*, v. 63, p. 993 – 941. 1996.

MATHUR, K.B.; EPSTEIN, N. *Spouted Bed*, Academic Press, New York, 1974.

MATHUR, K.B.; GISHLER, P.E. A technique for contacting gases with coarse solid particles, *AIChE Journal*, v. 1, p. 157-164, 1955.

McCORMICK, P. Y. (1983). **Solids Drying Fundamentals**. In: PERRY, J.; CHILTON, C. H. *Chemical Engineering Handbook*, McGraw Hill Co., sec. 20-24.

MEDEIROS, U. K. L. de. **Estudo da secagem de feijão verde (*Vigna unguiculata* L. Walp) – análise experimental do processo combinado leito**

fixo/leito de jorro. 2004. 128p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2004.

MEDINA, J. C.; BLEINROTH, E. W.; SIGRST, J. M. M.; DE MARTIN, Z. J.; NISIDA, A. L. A. C.; BALDINI, V. L. S.; LEITE, R. S. S. F.; GARCIA, A. E. B. **Mamão: cultura, matéria-prima, processamento e aspectos econômicos.** 2ª. Ed. Campinas, SP: ITAL, 1989. 367p.

MEDINA, J.C. Cultura. In: INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. **Mamão.** 2. ed., Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1989. p.1-177.

MEILI, L. **Contribuições ao estudo da Fluidodinâmica e da Secagem de Pasta em Leito Fluidizado e Vibrofluidizado.** 2009. 260 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

MELO, M. L. S. **Caracterização, estabilidade oxidativa e determinação do potencia energético do biodiesel derivado do mamão (carica papaya L.): uma fonte não convencional.** 2010. 130 f. Tese (Doutorado em Química Orgânica)-Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, 2010.

MIDILLI, A., H. KUCUK, Z. YAPAR. 2002. A new model for single layer drying of some vegetables. *Drying Technology*, 20:1503–1513.

MOCELIN, B., D. L. OLIVEIRA, et al. "Mathematical Modeling of Thin Layer Drying of Papaya Seeds in a Tunnel Dryer Using Particle Swarm Optimization Method." *Particulate Science and Technology* **32**(2): 123-130, 2014.

MOHSENIN, N.N., 1980. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**, 2nd ed. Gordon and Breach Science Publishers, New York.

MONTGOMORY, D. C. **Diseño y análisis de experimentos.** Traduzido por Jaime Delgado Saldivar. México: Iberoamérica, 1991.

MORTON, J. F. **Papaya, In: Fruits of warm climates.** Miami, FL, 1987. p. 336–346.

MUJUMDAR, A. S. **Guide to industrial drying – principles, equipment and new developments**. IWSID2004, Mumbai, India, 2014.

MUJUMDAR, A. S., Handbook of industrial Drying, Marcel Dekker Inc., New York, 1995,742 p.

NAGHETINI, C. C. *Caracterização Físico-química e atividade antifúngica dos óleos essenciais da Cúrcuma*. Dissertação (Mestrado em Ciência de Alimentos) – Minas Gerais – MG, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 61p, 2006.

OLIVEIRA, H. V.A., FREITAS, L.A.P. **The effect of processing factors on the efficiency of hard gelatin capsules coating in a spouted bed**. Proceedings of the 14th International Drying Symposium. v. B, p. 852 - 859, São Paulo: 2004.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Purdue University. 1949.

PAIVA, E. J. **Otimização de Processos de Manufatura com Múltiplas Respostas Baseada em Índices de Capacidades**. 2008. 118 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.

PALLAI, E., SZENTMARJAY, T., & MUJUMDAR, A. S. (1995). Spouted bed drying. In A. S. Mujumdar (Ed.), Handbook of industrial drying (pp. 453–488). New York: Marcel Dekker.

PAQUES, F.W; MACEDO, G.A. **Lipases de látex vegetais: propriedades e aplicações industriais**. Química Nova, 2006, v. 29, n.1, p. 93 - 99.

PARK, K. J; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A. de; PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Centro de Tecnologia e Engenharia Agroindustrial, Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. 121p.

PENTEADO, D.M.R. **Estudo de Otimização do meio de cultura para a microalga *Phaeodactylum tricornutum* para produção de lipídios**.

Dissertação de Mestrado em Bioquímica – Setor de Ciência Biológicas, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

PEREIRA, M. G.; MARIN, S.L.D.; VIANA, A.P., PEREIRA, T. N. S., FERRETTI, G. A., MARTELLETO, L. A. P.; IDE, C. D.; CATTANEO, L. F. et al. **Melhoramento genético do mamoeiro (*Carica papaya* L.): Desenvolvimento e recomendação de híbridos.** In: II Renião de pesquisa do FRUTIMAMÃO. Campos dos Goytacazes: UENF, 2004.

PEREIRA, T. M. **Composição de ácidos graxos de óleo de sementes de duas variedades de mamão (*Carica papaya*, L.).** Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos)-Universidade Federal da Paraíba, 1985.

PEREIRA, T. M. **Composição de ácidos graxos de óleo de sementes de duas variedades de mamão (*Carica papaya*, L.).** João Pessoa, Programa de Pós- graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal da Paraíba, Dissertação de Mestrado, 1985.

PRADO, M. M. (1999). **Secagem de Sementes de Mamão Papaya.** São Carlos, SP, UFSCar (dissertação).

PRADO, M. M., SARTORI, D. J. M. (2000) Avaliação da secagem convectiva de sementes de papaya com e sem mucilagem. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 12, Águas de São Pedro: Sonopress Rimo LTDA, v.1, p. 54801-54810.

PRADO, M.M. **Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem.** Tese de Doutorado em Engenharia Química – Centro de Ciência Exatas e de Tecnológicas, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 162f., 2004.

QUINTAL, S. S. R. **Caracterização e avaliação de um banco de germoplasma de mamoeiro para estudo dos parâmetros genéticos e diversidades genéticas.** 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes-RJ, 2009.

ROBERTS, J. E.; TYLER, V. E. Tyler's Herbs of Herba of Choise. **The Therapeutic Use of Phytomecinals.** The Haworth Press. Inc. New York. 1998.

ROBINSON P. (1958) **Seeds of *Carica papaya* for mass treatment against Ascariasis.** Indian Journ of Child Health;7:815–7.

RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** Campinas-SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 618p.

SANTOS, A. S.; ANDRADE, E. H. A.; ZOGHBI, M. G. B.; LUZ, A. I. R.; MAIA, J. G. S. Sesquiterpenes on Amazonian Piper Species. *Acta Amazonica*, v. 28, n. 2, p. 127-130, 1998.

SANTOS, S. A.; SILVA, R. F.; PEREIRA, M. G.; ALVES, E.; MACHADO, J. C.; BORÉM, F. M.; GUIMARÃES, R. M.; MARQUE, E. R. **Estudos morfo-anatômicos de sementes de dois genótipos de mamão (*Carica papaya* L.).** Revista Brasileira de Sementes, vol. 31, nº 2, p.116-122, 2009.

SCHMILDT, E. R., FRONZA, V., DIAS, J. L. S, UNÊDA, S. H., ALVARENGA, E. M. Comparação de métodos físicos de remoção da sarcotesta e de métodos de secagem de sementes de mamoeiro (*Carica papaya* L.). *Revista Brasileira de Sementes*, Brasília, 15 (2): 147-151. 1993.

SEMEN, E.; HIZIROGLU. **Production, yield and Derivatives of Volatile Oils from Eastern Redcedar (*Jeniperus virginiana* L.),** American Journal Environmental Sciences, 1(2), p. 133-138, 2005.

SERRANO, L. A. L.; CATTANEO, L. F. **O CULTIVO DO MAMOEIRO NO BRASIL.** Revista Brasileira de Fruticultura, v. 32, n. 3 p. 657-959, 2010.

SHARAF-ELDEEN, Y. I., J. L. BLAISDELL, M. Y. HAMDY. Model for ear corn drying. Transactions of the ASAE 23:1261–1265, 1980.

SILVA, F. da. **Avaliação do teor e da composição química do óleo essencial de plantas medicinais submetidas a processos de secagem e armazenamento.** 168p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

SILVA, F.; CASALI, V.W.D. Plantas medicinais e aromáticas: Pós-colheita e óleos essenciais. Viçosa, MG: UFV, 2000. 135p.

SILVA, G.G.; DINIZ, R. G.; SILVA, M. E. **Avaliação química do mamão (Carica papaya L) em diferentes estádios de maturação.** Revista Capixaba de Ciência e Tecnologia, n. 3, p.1-7, 2007.

SIMÕES, C.M.O.; SCHENKEL, E.P.; GOSMANN, G.; MELLO, J.C.P.; MENTZ, L.A.; PETROVICK, P.R. **Farmagnosia da planta ao medicamento.** Porto Alegre: 2. ed. UFRGS, 2000. 821p.

SOGI, D. S., U. S. SHIVHARE, S. K. GARG, A. S. BAWA,. 2003. Water sorption isotherm and drying characteristics of tomato seeds. Biosystems Engineering 84:297–301.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design.** Gordon and Breach Science Publishers, Switzerland, 1986.

TANG, C.S. Benzyl Isothiocyanate of Papaya Fruit. Phytochem; 10:117–21, 1971.

TOGRUL, I. T, PEHLIVAN, D. Mathematical modelling of solar drying of apricots in thin layers. Journal of Food Engineering 55:209–216, 2002.

VAZQUEZ, R. M. Efecto de diversos tratamientos aplicados a la semilla de papaya, sobre su poder germinativo. *Agricultura Técnica en México*, 2 (11):487-491, 1969.

VECCHIO, V., SHIRWA', A. H. Effets des différentes modalités de séchage de graines de papaye sur la germination. *Rivista di Agricoltura Subtropicale e Tropicale*, 81 (1-2): 175-184, 1987.

VENTURINI, T., BENCHIMOL, L. R., BERTUOL, D. A., ROSA, M. B. da, MEILI, L. (2012) Estudo da secagem e extração de sementes de mamão (Carica papaya L.). Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v(5), nº 5, p. 950-959, 2012.

VISWANATHAN, K.; LYALL, M. S.; RAYCHAUDHURI, B. C. Spouted bed drying of agricultural grains, Can. J. Chem. Eng, v.64, p.223-232, 1986.

WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. **Otimização estatística de processos:** como determinar a condição de operação de um processo que

leva ao alcança de uma meta. Belo Horizonte, Fundação Cristiano Ottoni, 1996, 331 p.

YALDIZ, O., C. ERTEKIN. Thin layer solar drying of som different vegetables. *Drying Technology*, 19:583–596, 2001.

ZANOELLO, E.F.; CELSO, G.M di; KASKANTZIS, G. Drying Kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer. ***Biosystems Engineering***. v. 96, p. 487-494, 2007.

APÊNDICE

APÊNDICE A

Tabela A1 – Distribuição granulométrica das sementes *in natura*

Tyler	\emptyset (mm)	Massa peneira	Massa pen. + amostra	Massa amostra	xi	Di (mm)	xi/Di
4	4,75	691,6	736,3	44,7	0,29859	4,375	0,068251
5	4	452,4	504,6	52,2	0,34869	3,4	0,102558
7	2,8	412,3	463,4	51,1	0,34134	2,58	0,132306
8	2,36	647,1	647,9	0,8	0,00534	2,18	0,002451
9	2	359,4	359,8	0,4	0,00267	1	0,002672
Fundo	0	342,5	343	0,5	0,00334	0	0,308238
Total				149,7	1		

Fonte: Autor (2014).

Dimensão (mm)	In natura
x =	5,24
x =	5,2
x =	5,38
x médio =	5,27
y e z =	3,5
y e z =	3,8
y e z =	3,48
y e z médio =	3,59
\emptyset (%) =	77,43

Quadro A1 – Valores obtidos das sementes *in natura* por paquímetro e esfericidade. Fonte: Autor (2014).

<i>mpic</i> =	26,8	26,8	26,8
<i>mpic</i> + amostra =	28,7	29,1	28,4
<i>mpic</i> + amostra + água =	47,9	48	47,6
<i>d água</i> =	0,99622	0,99622	0,99622
<i>mpic</i> + água =	48	48,1	47,7
<i>V pic</i> =	21,280440	21,380819	20,979302
<i>V água</i> =	19,272851	18,971713	19,272851
<i>V amostra</i> =	2,007589	2,409106	1,706450
<i>d amostra (g/mL)</i> =	0,946409	0,95471083	0,9376188
Média	0,94		
Desvio Padrão	0,0085		

Quadro A2 – Dados obtidos através da picnometria líquida para sementes de mamão *in natura*. Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE B

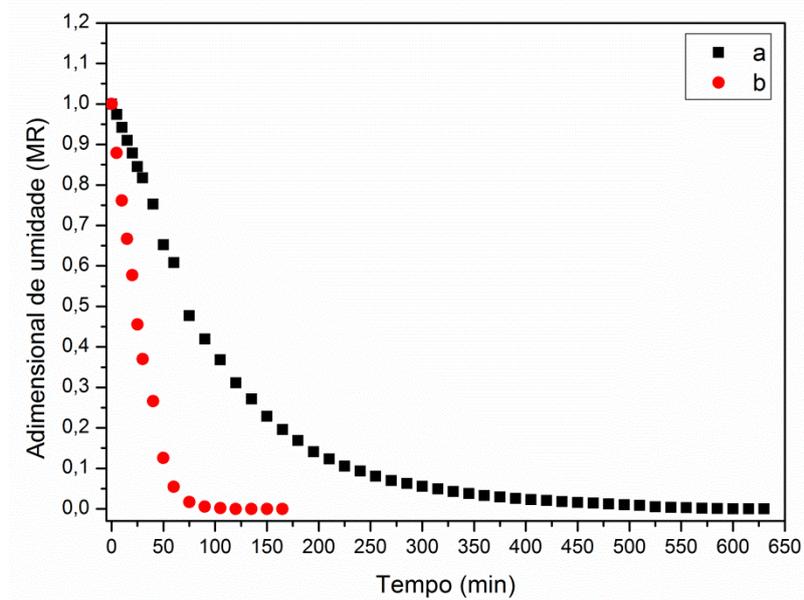


Figura B1 - Adimensional de umidade em função do tempo, temperatura (a) 48 °C (b) 91 °C e velocidade de 1,29 m.s⁻¹. Fonte: Autor (2014)

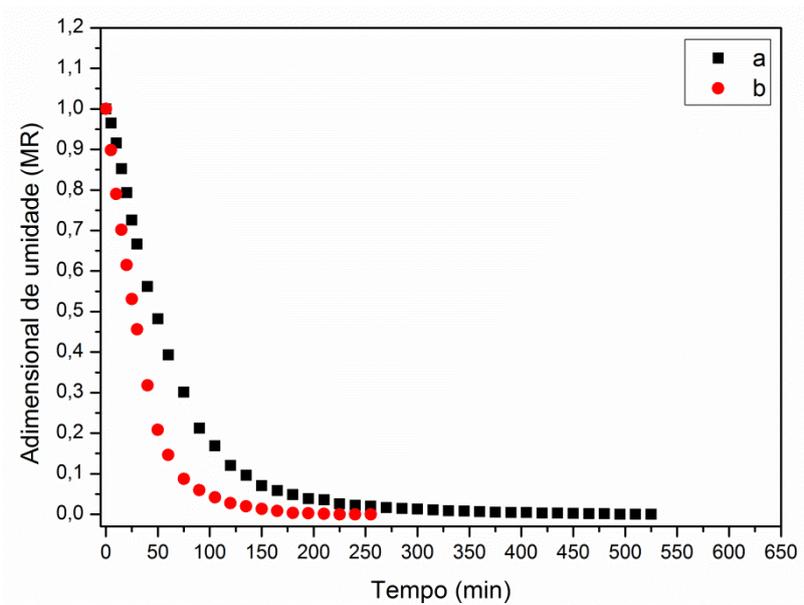


Figura B2 - Adimensional de umidade em função do tempo, temperatura (a) 48 °C (b) 91 °C e velocidade de 2,71 m.s⁻¹. FONTE: Autor (2014)

APÊNDICE C

Tabela C1 - Composição de ácido graxo do óleo extraído das sementes secas em secador convectivo horizontal.

Ácido Graxo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Média	Desvio Padrão
C14:0	0,24	0,24	0,24	0,22	0,25	0,23	0,23	0,22	0,26	0,23	0,25	0,24	0,01
C16:1	0,32	0,34	0,32	0,29	0,37	0,28	0,31	0,32	0,36	0,30	0,35	0,32	0,03
C18:0	5,34	5,83	5,37	5,45	5,46	5,43	5,46	5,39	5,65	-	5,65	5,50	0,16
C18:1n9c	83,52	82,13	84,48	87,18	83,50	84,31	84,74	84,63	83,94	89,83	82,95	84,66	2,14
NI	3,82	3,19	3,18	-	3,40	3,51	3,25	3,37	3,47	3,52	3,57	3,43	0,20
c18:2	5,52	7,08	5,32	5,66	5,63	5,28	5,15	5,11	5,86	5,04	6,81	5,68	0,68
NI	0,47	0,43	0,41	0,44	0,51	0,46	0,41	0,47	0,47	0,42	0,43	0,45	0,03
C20:1	0,51	0,49	0,46	0,48	0,53	0,49	0,46	0,49	-	0,44	-	0,48	0,03
c22:2	0,26	0,26	0,22	0,27	0,35	-	-	-	-	0,21	-	0,26	0,05

Fonte: Autor (2014).

Tabela C2 - Composição de ácido graxo do óleo extraído das sementes secas em secador leito de jorro.

Ácido Graxo	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Ensaio 6	Ensaio 7	Ensaio 8	Ensaio 9	Ensaio 10	Ensaio 11	Ensaio 12	Ensaio 13	Ensaio 14	Ensaio 15	Ensaio 16	Ensaio 17	Média	Desvio Padrão
C14:0	0,14	0,17	0,14	0,13	0,15	0,14	0,18	0,13	0,22	0,30	0,19	0,15	0,18	0,15	0,14	0,19	0,17	0,17	0,04
C16:0	15,34	16,34	16,71	15,67	16,38	16,48	16,65	16,88	16,60	17,21	17,04	16,61	15,73	16,32	16,57	16,86	16,66	16,47	0,49
C16:1	0,18	0,37	0,24	0,15	0,26	0,32	-	-	0,24	0,19	-	-	-	-	0,14	-	-	0,23	0,08
C18:0	4,72	4,50	4,48	5,19	4,85	4,93	4,67	4,28	5,19	4,39	5,12	4,21	4,45	4,28	4,45	4,32	4,36	4,61	0,33
C18:1	71,53	70,07	70,01	73,24	70,85	69,76	69,57	70,84	69,15	69,53	70,22	70,87	71,76	71,52	69,74	71,17	70,74	70,62	1,03
NI	2,28	2,31	2,16	0,00	2,20	2,38	2,37	2,12	2,41	2,24	2,21	2,42	2,04	2,08	2,26	2,04	2,20	2,10	0,55
C18:2	4,92	5,37	5,65	4,58	4,56	5,12	5,71	5,07	5,06	5,17	4,35	4,89	5,00	5,06	5,10	4,83	5,08	5,03	0,35
C20:0	0,31	0,28	0,22	0,39	0,35	0,35	0,33	0,23	0,35	0,35	0,33	0,33	0,35	0,27	0,28	0,27	0,30	0,31	0,05
C20:1	0,37	0,30	0,22	0,39	0,23	0,30	0,38	0,31	0,31	0,33	0,29	0,32	0,26	0,21	0,25	0,32	0,33	0,30	0,05
C18:3	0,07	-	-	0,05	-	-	-	-	0,19	-	-	-	-	-	0,89	-	-	0,30	0,40
C22:2	0,15	0,27	0,17	0,21	0,18	0,22	0,14	0,15	0,27	0,27	0,24	0,20	0,23	0,11	0,18	-	0,16	0,20	0,05

APÊNDICE D

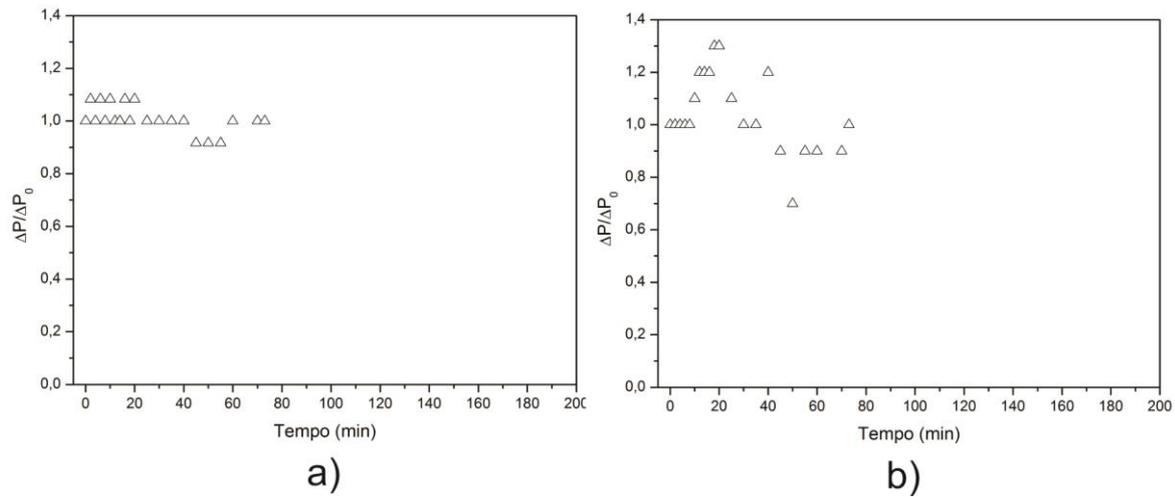


Figura D1 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de U , Ensaio 1 (a) e 3 (b): (b) U 9,75 m s⁻¹; T 52,1 °C e t 1,21 h; (b) U 11,25 m s⁻¹; T 52,1 °C e t 1,21 h. Fonte: Autor (2014).

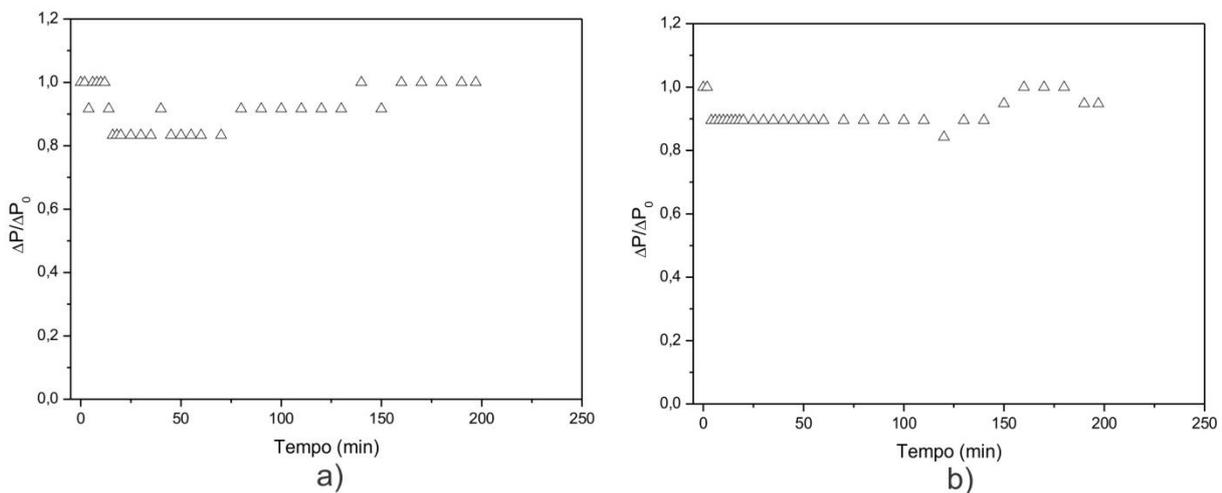


Figura D2 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de U , Ensaio 5 (a) e 7 (b): (b) U 9,75 m s⁻¹; T 52,1 °C e t 3,29 h; (b) U 11,25 m s⁻¹; T 52,1 °C e t 3,29 h. Fonte: Autor (2014).

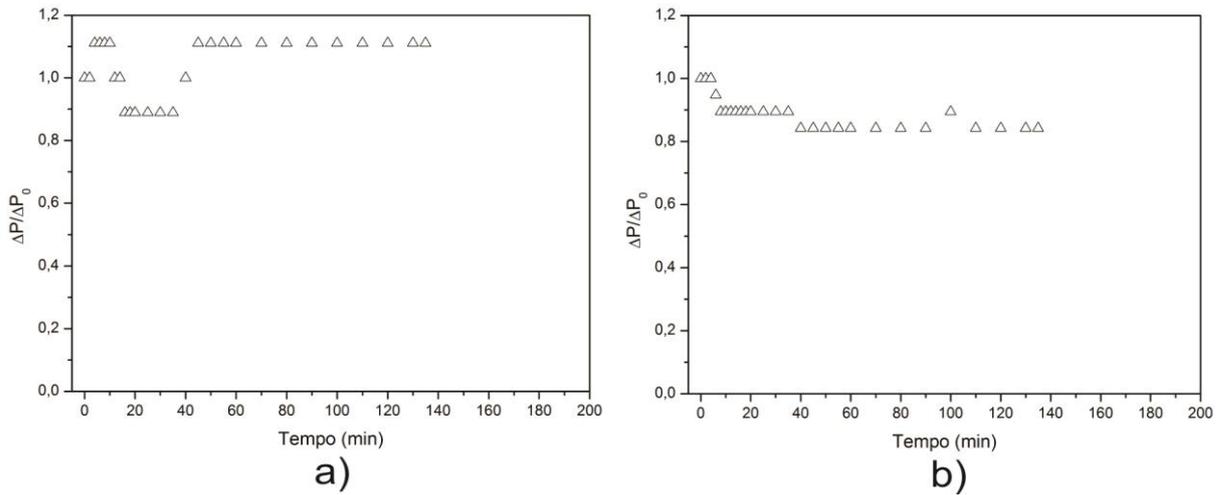


Figura D3 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de U , Ensaio 11 (a) e 12 (b): (a) $U 9,24 \text{ m s}^{-1}$; $T 70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $t 2,25 \text{ h}$; (b) $U 11,76 \text{ m s}^{-1}$; $T 70 \text{ }^\circ\text{C}$ e $t 2,25 \text{ h}$. Fonte: Autor (2014).

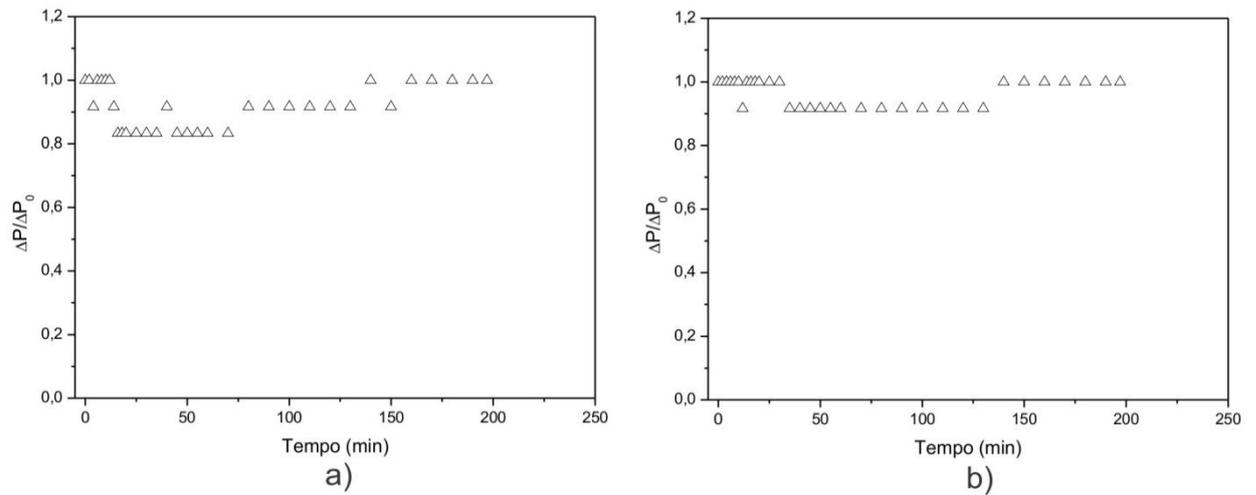


Figura D4 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de T , Ensaio 5 (a) e 6 (b): (a) $U 9,75 \text{ m s}^{-1}$; $T 52,1 \text{ }^\circ\text{C}$ e $t 3,29 \text{ h}$; (b) $U 9,75 \text{ m s}^{-1}$; $T 87,9 \text{ }^\circ\text{C}$ e $t 3,29 \text{ h}$. Fonte: Autor (2014).

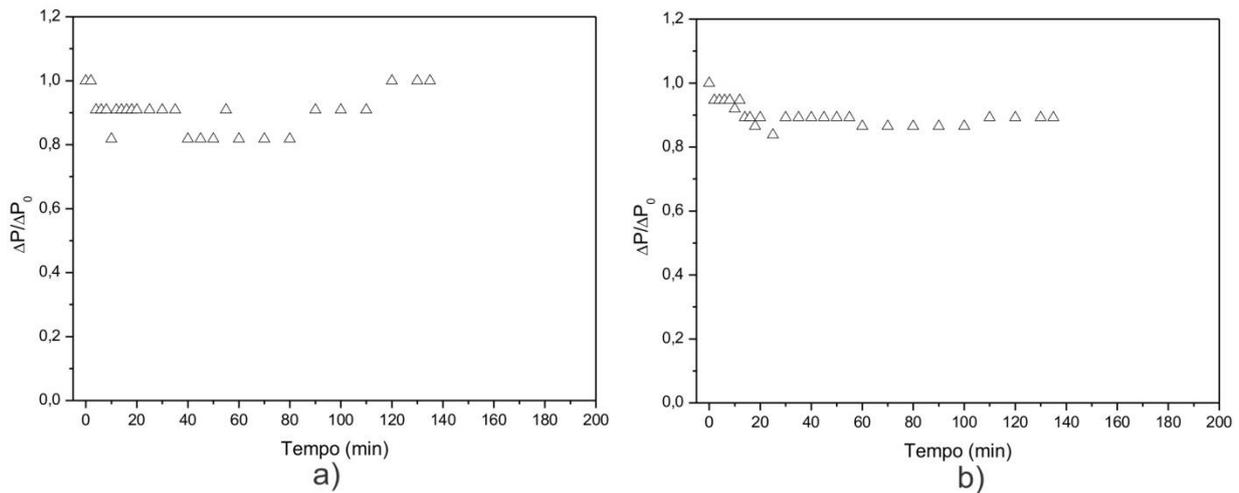


Figura D5 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de T, Ensaio 9 (a) e 10 (b): (a) U 10,5 m s^{-1} ; T 40 $^{\circ}\text{C}$ e t 2,25 h; (b) U 10,5 m s^{-1} ; T 100 $^{\circ}\text{C}$ e t 2,25 h. Fonte: Autor (2014).

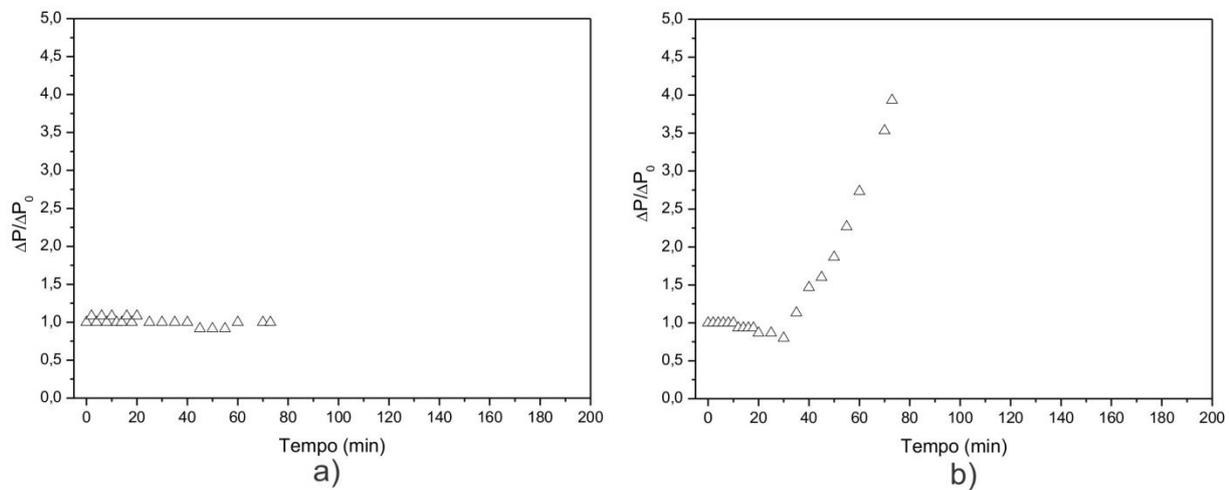


Figura D6 – Adimensional de queda de pressão no leito em função do tempo com a mudança de T, Ensaio 1 (a) e 2 (b): (a) U 9,75 m s^{-1} ; T 52,1 $^{\circ}\text{C}$ e t 1,21 h; (b) U 9,75 m s^{-1} ; T 87,9 $^{\circ}\text{C}$ e t 1,21 h. Fonte: Autor (2014).

APÊNDICE E

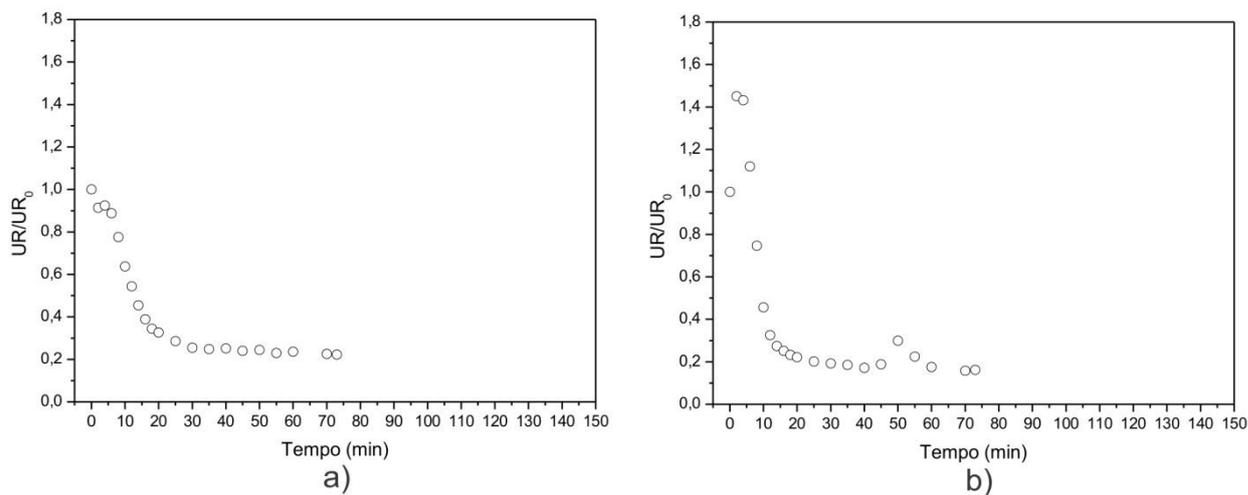


Figura E1 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 1 (a): U $9,75 \text{ m s}^{-1}$; T $52,1^\circ\text{C}$ e tempo de 1,21 h. Ensaio 2 (b): U $9,75 \text{ m s}^{-1}$; T $87,9^\circ\text{C}$ e tempo de 1,21 h. Fonte: Autor (2014).

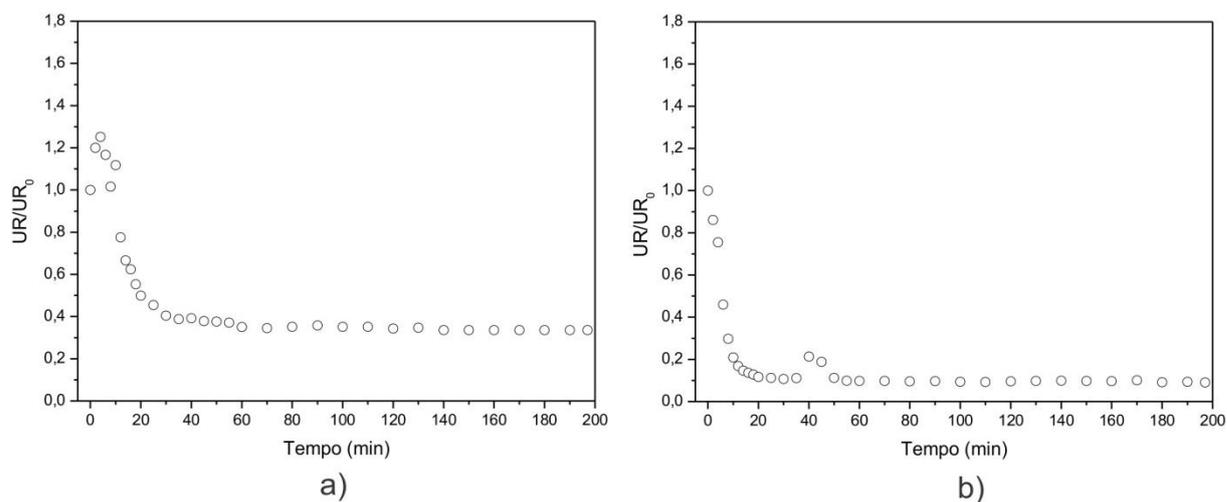


Figura E2 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 5 (a): U $9,75 \text{ m s}^{-1}$; T $52,1^\circ\text{C}$ e tempo de 3,29 h. Ensaio 6 (b): U $9,75 \text{ m s}^{-1}$; T $87,9^\circ\text{C}$ e tempo de 3,29 h. Fonte: Autor (2014).

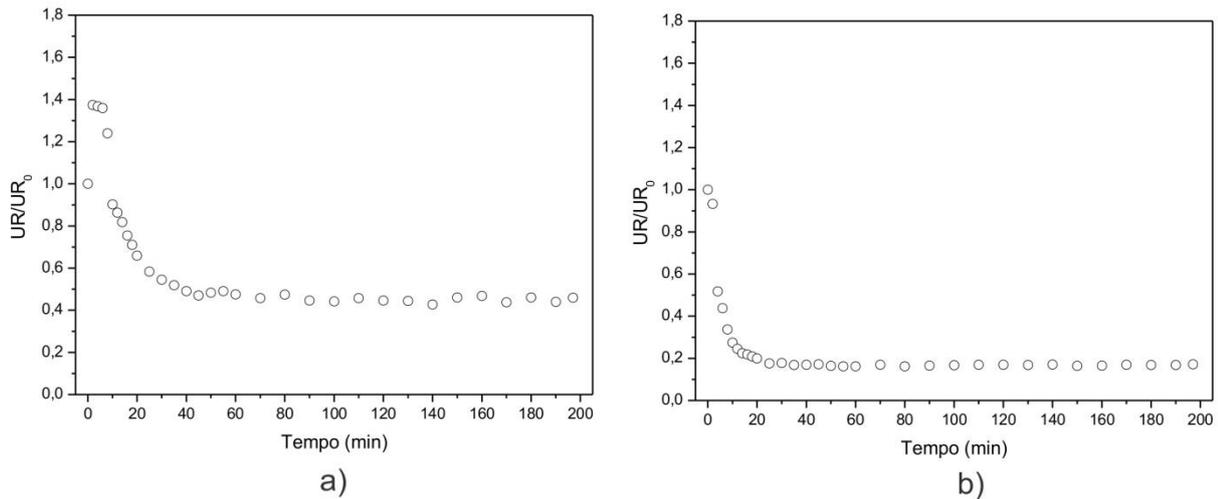


Figura E3 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 7 (a): U 11,25 $m\ s^{-1}$; T 52,1°C e tempo de 3,29 h. Ensaio 8 (b): U 11,25 $m\ s^{-1}$; T 87,9 °C e tempo de 3,29 h. Fonte: Autor (2014).

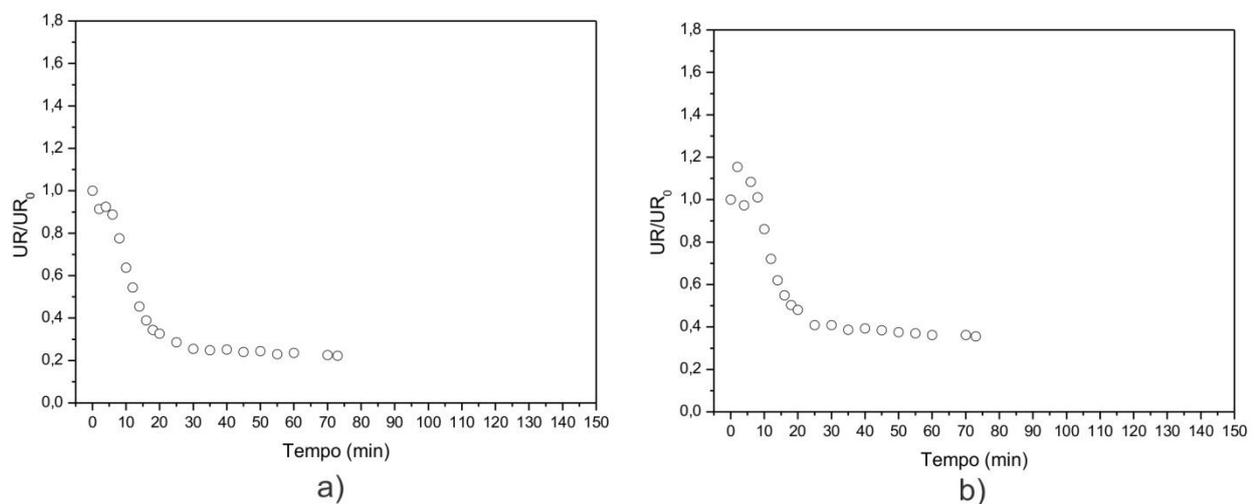


Figura E4 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 1 (a): U 9,75 $m\ s^{-1}$; T 52,1°C e tempo de 1,21 h. Ensaio 3 (b): U 11,25 $m\ s^{-1}$; T 52,1 °C e tempo de 1,21 h. Fonte: Autor (2014).

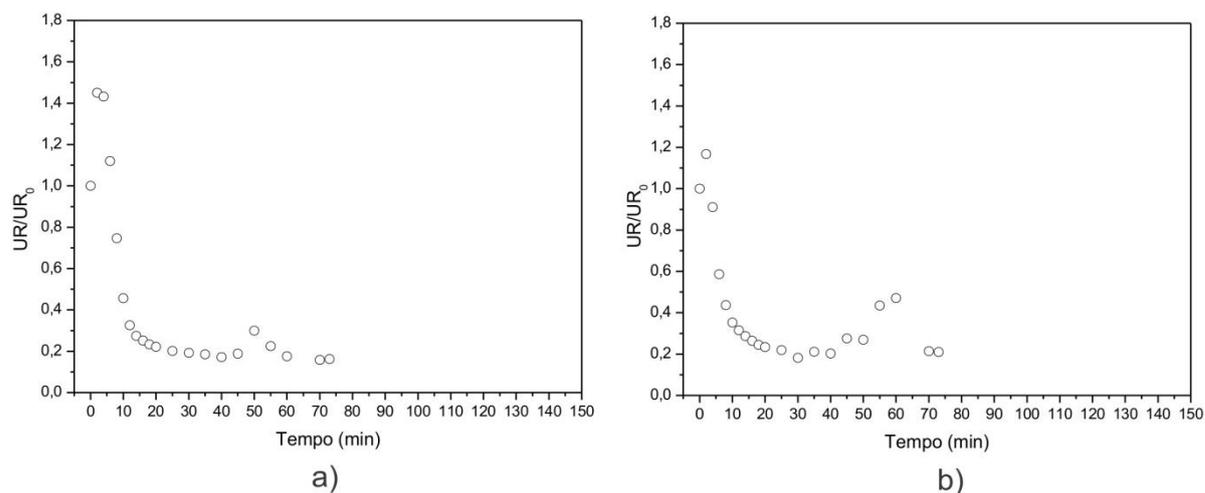


Figura E5 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 2 (a): U 9,75 $m\ s^{-1}$; T 87,9°C e tempo de 1,21 h. Ensaio 4 (b): U 11,25 $m\ s^{-1}$; T 87,9 °C e tempo de 1,21 h. Fonte: Autor (2014).

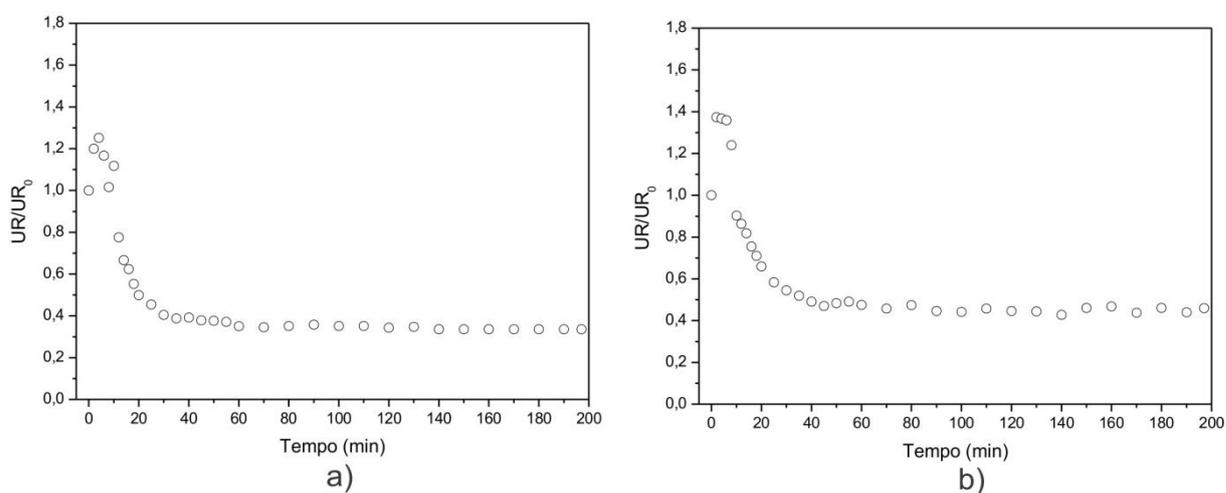


Figura E6 – Adimensional de umidade relativa do ar em função do tempo, Ensaio 5 (a): U 9,75 $m\ s^{-1}$; T 52,1°C e tempo de 3,29 h. Ensaio 7 (b): U 11,25 $m\ s^{-1}$; T 52,1 °C e tempo de 3,29 h. Fonte: Autor (2014).