



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



**Produção de uvas-passas variedade Crimson: modelagem matemática e
estudo experimental**

Marielle Cristine Cano Francisquetti

Uberlândia

2017



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



**PRODUÇÃO DE UVAS-PASSAS VARIEDADE CRIMSON: MODELAGEM
MATEMÁTICA E ESTUDO EXPERIMENTAL**

Marielle Cristine Cano Francisquetti

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

Uberlândia - MG

2017

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

F819p
2017 Francisquetti, Marielle Cristine Cano, 1991-
Produção de uvas-passas variedade Crimson: modelagem matemática e estudo experimental / Marielle Cristine Cano Francisquetti. - 2017.

154 f. : il.

Orientador: Valéria Viana Murata.

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

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.218>

Inclui bibliografia.

I. Engenharia química - Teses. 2. Uva - Cultivo - Teses. 3. Uva - Secagem - Teses. 4. Modelos matemáticos - Teses. I. Murata, Valéria Viana. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. III. Título.

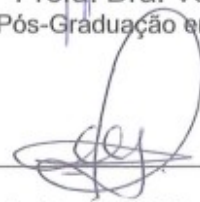
CDU: 66.0

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 31 DE MAIO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Valéria Viana Murata
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Orientadora



Prof. Dr. Luis Claudio Oliveira Lopes
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Orientador



Prof. Dr. Jader Conceição da Silva
Faculdade de Engenharia Química da UFU



Prof. Dra. Vivian Consuelo Reolon Schmidt
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia Química da UFU



Prof. Dr. Daniel Ângelo Longhi
Universidade Federal do Paraná

Dedico aos meus pais, Mauricio e Beatriz,
e à minha irmã, Marina, pois sem eles eu
nada seria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força para caminhar durante os dois anos do mestrado e por sempre estar presente em minha vida.

Agradeço aos meus pais, que compreenderam a importância dessa etapa em minha vida e sempre estiveram ao meu lado para que eu pudesse chegar até aqui. À minha irmã, que sempre foi fonte de inspiração acadêmica para mim.

Ao meu namorado, que teve que conviver com a distância e não mediu esforços para continuar ao meu lado.

À Prof. Valéria, minha orientadora, por ter me aceitado e me acompanhado no caminho até eu me tornar Mestre em Engenharia Química.

Ao Prof. Luís Cláudio, que foi fundamental nas etapas deste trabalho, e sem sua ajuda esse projeto não teria sido finalizado.

Aos professores Sérgio, Rubens e Humberto, que durante as reuniões de sexta, com seus questionamentos garantiram a melhoria e desenvolvimento da minha pesquisa.

Agradeço a todos os estudantes, técnicos de laboratório e professores do curso de graduação em Engenharia de Alimentos da Faculdade de Engenharia Química da UFU campus Patos de Minas, por me receberem e me ajudarem na parte experimental desse projeto. Laís, Betânia, Ana Luiza, Mariana, Lucas e às professoras Michelle Andriati Sentanin e Vivian Consuelo Reolon Schmidt, meu muito obrigada.

Agradeço aos companheiros e colegas do Laboratório de Modelagem e Otimização, Cleuton, Délio, Diovanina, Jeniffer, Michel, Monique e Raiana, que estiveram sempre disponíveis aos questionamentos e dúvidas e prontos para me ajudar.

E finalmente, aos meus amigos, Fernandinha, Marina, Bárbara, Priscilla, Mariana, Fabi, Ana, Fred, Rafael, Thiago, Murilo Ricardo e Bruno, por me distraírem quando eu precisava e por me ensinarem que amigo de faculdade é para sempre.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| Lista de Tabelas | v |
| Lista de Figuras | vii |
| Nomenclatura..... | xi |
| Resumo | xv |
| Abstract..... | xvii |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| | |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 9 |
| 2.1. Secadores utilizados na secagem de uvas..... | 9 |
| 2.2. Parâmetros de caracterização da secagem..... | 18 |
| 2.2.1. Conteúdo de umidade e atividade da água..... | 18 |
| 2.2.2. Umidade de Equilíbrio | 20 |
| 2.2.3. Cinética de Secagem | 23 |
| 2.2.4. Modelos de cinética de secagem..... | 24 |
| 2.2.5. Análise sensorial | 26 |
| 2.3. Técnicas de pré-processamento de uvas para a secagem | 28 |
| 2.4. Transferência simultânea de calor e massa – Modelagem matemática da secagem .. | 30 |
| 2.4.1. Modelo de Luikov..... | 31 |
| 2.5. O encolhimento de materiais submetidos à secagem | 36 |
| | |
| 3. AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DE UVAS E DO AR: INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA TEMPERATURA..... | 47 |
| 3.1. Estimativa do calor específico de uvas..... | 47 |
| 3.1.1. Dependência com a umidade | 48 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.2. Dependência com a temperatura..... | 49 |
| 3.1.3. Dependência com a umidade e a temperatura..... | 51 |
| 3.2. Estimativa da condutividade térmica de uvas | 52 |
| 3.2.1. Dependência com a umidade | 53 |
| 3.2.2. Dependência com a umidade e a temperatura..... | 54 |
| 3.3. Calor de vaporização da água..... | 55 |
| 3.4. Difusividade efetiva da umidade contida no interior da uva..... | 57 |
| 3.5. Atividade da água..... | 58 |
| 3.6. Umidade de equilíbrio | 59 |
| 3.7. Estudo sobre as propriedades do ar de secagem..... | 62 |
| 3.7.1. Concentração mássica do ar..... | 63 |
| 3.7.2. Viscosidade dinâmica | 64 |
| 3.7.3. Condutividade térmica | 65 |
| 3.7.4. Coeficiente de difusão da água no ar | 67 |
| 3.7.5. Estimativa dos números de Reynolds, Prandtl e Schmidt..... | 68 |
| 3.7.6. Coeficiente de transferência de calor..... | 70 |
| 3.7.7. Coeficiente de transferência de massa convectivo..... | 71 |
| | |
| 4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E TERMOFÍSICAS DA UVA CRIMSON | 73 |
| 4.1. Caracterização da matéria prima | 73 |
| 4.2. Cálculo das propriedades físicas da uva a partir da análise centesimal | 78 |
| 4.2.1. Calor específico variando com a temperatura..... | 79 |
| 4.2.2. Condutividade térmica pela variação da temperatura..... | 79 |
| 4.2.3. Densidade pela variação da temperatura..... | 80 |
| 4.3. Cálculo das Isotermas de sorção | 80 |
| 4.4. Secagem em secador de bandeja | 82 |
| 4.4.1. Pré-tratamento químico das uvas | 82 |

| | |
|---|------------|
| 4.4.2. Descrição do equipamento | 82 |
| 4.4.3. Descrição do ensaio da secagem..... | 83 |
| 4.5. Estudo da variação de propriedades físicas durante a secagem | 84 |
| 4.5.1. Densidade..... | 84 |
| 4.5.2. Encolhimento | 85 |
| 4.6. Resultados experimentais para determinação das propriedades da uva Crimson | 86 |
| 4.6.1. Composição da matéria prima | 86 |
| 4.6.2. Cálculo das propriedades físicas da uva a partir da análise centesimal..... | 87 |
| 4.6.3. Isotermas de Equilíbrio | 90 |
| 4.6.4. Secagem em secador de bandeja..... | 92 |
| 4.6.5. Umidade..... | 93 |
| 4.6.6. Encolhimento | 95 |
| 4.6.7. Densidade e coeficiente de encolhimento..... | 99 |
| | |
| 5. MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE UVAS CRIMSON EM BANDEJAS | 101 |
| 5.1. Modelagem matemática da secagem das uvas | 101 |
| 5.2. Metodologia de solução numérica do modelo matemático unidimensional | 111 |
| 5.3. Parâmetros do modelo matemático | 114 |
| 5.4. Resultados simulados e validação experimental | 117 |
| | |
| 6. ANÁLISE SENSORIAL | 127 |
| 6.1. Materiais e métodos..... | 128 |
| 6.1.1. Teste de aceitação | 128 |
| 6.1.2. Check-all-that-apply (CATA)..... | 128 |
| 6.2. Resultados da análise sensorial | 129 |

| | |
|--|------------|
| 7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 133 |
| 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 135 |
| Apêndice A – Gráficos de resíduos: Modelos de isoterma de equilíbrio | 143 |
| Apêndice B – Gráficos de resíduos: Modelos de cinética de secagem | 147 |
| Apêndice C – Termo de consentimento livre e esclarecido | 151 |
| Apêndice D – Ficha de coleta de dados: teste de aceitação..... | 153 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1.1 – Produção de frutas no Brasil em 2015 e 2016 (CARVALHO <i>et al.</i> , 2017) | 1 |
| Tabela 1.2 – Produção de uvas no Brasil no período de 2014 a 2016 (CARVALHO <i>et al.</i> , 2017) | 3 |
| Tabela 1.3 – Países exportadores de uvas-passas para o Brasil em 2013 (SOUZA <i>et al.</i> , 2015) | 4 |
| Tabela 2.1 – Tipos de microrganismos e limites de atividade de água para o crescimento (MELO FILHO E VASCONCELOS, 2011) | 19 |
| Tabela 2.2 – Modelo de isotermas de equilíbrio | 22 |
| Tabela 2.3 – Modelos matemáticos para a cinética de secagem | 25 |
| Tabela 2.4 – Modelos para o cálculo do encolhimento durante a secagem de diferentes materiais (RAHMAN, 2009)..... | 38 |
| Tabela 3.1 – Composição da uva produzido em território americano e da uva europeia (ASHRAE, 2006) | 50 |
| Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo GAB para a uva Itália (GABAS, 1998)..... | 62 |
| Tabela 4.1 – Umidade relativa de equilíbrio para 70 °C (GABAS, 1998) | 81 |
| Tabela 4.2 – Caracterização química da uva Crimson utilizada nos experimentos. | 86 |
| Tabela 4.3 – Frações mássicas dos componentes da uva Crimson..... | 87 |
| Tabela 4.4 – Coeficiente de correlações para os modelos de isotermas de equilíbrio | 90 |
| Tabela 4.5 – Coeficiente de correlação para os modelos de cinética de secagem..... | 94 |
| Tabela 5.1 – Condições iniciais e de contorno adimensionais do modelo matemático para a secagem de uvas | 111 |
| Tabela 5.2 – Fórmulas de Diferenças Finitas para derivadas de primeira e segunda ordem.. | 112 |
| Tabela 5.3 – Condições iniciais e de contorno discretizadas do modelo matemático para a secagem de uvas | 113 |
| Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados para a simulação da secagem da uva Crimson | 116 |
| Tabela 6.1 – Porcentagem das notas dos atributos referentes a uva-passa nos intervalos da escala | 129 |
| Tabela 6.2 – Número de citações de atributos sensoriais | 131 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Contribuição dos principais países produtores de produtos agrícolas no ano de 2012 (ANDRADE, 2012)..... | 1 |
| Figura 1.2 – Tipos de uvas produzidas no Brasil | 2 |
| Figura 1.3 – Evolução da importação de uvas-passas pelo Brasil no período 2005 – 2012 (SOUZA <i>et al.</i> , 2015) | 4 |
| Figura 1.4 – Variedades de uvas sem sementes: a) Superior Seedless (Festival); b) Crimson Seedless; c) Thompson Seedless; d) Catalunha; e) Perlette e f) Vênus (LEÃO, 2006). | 6 |
| Figura 2.1 – Características da qualidade de alimentos (adaptado de BARRET <i>et al.</i> , 2004)... | 9 |
| Figura 2.2 – Esquema dos quatro tipos mais comuns de leito convectivo (SFREDO, 2002 <i>apud</i> REZENDE, 2011)..... | 11 |
| Figura 2.3 – Principais secadores utilizados na secagem de frutas (BARRET <i>et al.</i> , 2004).... | 12 |
| Figura 2.4 – Secador solar do tipo gabinete (BARRET <i>et al.</i> , 2004)..... | 13 |
| Figura 2.5 – Representação de um secador de esteira (PUHL E NITZKE, 2016) | 14 |
| Figura 2.6 – Cabine do secador de bandeja utilizado na secagem de uvas (SOUZA <i>et al.</i> , 2015) | 16 |
| Figura 2.7 – Detalhe do secador de bandejas usado na secagem de uvas: (a) bandeja com tela perfurada e (b) uvas acondicionadas na bandeja (SOUZA <i>et al.</i> , 2015) | 16 |
| Figura 2.8 – Representação do secador tipo túnel com configuração concorrente com 10 carrinhos com 20 bandejas cada proposto por Vagenas <i>et al.</i> (1990b) e Vagenas e Marinos-Kouris (1991)..... | 17 |
| Figura 2.9 – Os cinco tipos de isotermas (RAO E RIZVI, 1996)..... | 20 |
| Figura 2.10 – Representação de potes para teste estático de umidade de equilíbrio (NOGUEIRA, 2016)..... | 21 |
| Figura 2.11 – Comportamento típico da curva de umidade, cinética de secagem e temperatura do produto durante a secagem (PARK <i>et al.</i> , 2014)..... | 23 |
| Figura 2.12 – Esquema da disposição geométrica da amostra de uvas segundo Vagenas e Marinos-Kouris (1991)..... | 42 |
| Figura 3.1 – Comportamento do calor específico com a variação da umidade em base seca para uvas Sultanas (VAGENAS <i>et al.</i> , 1990a); alimentos ricos em água (LIMA, 2013); uvas-passas do tipo Itália (CÁCERES-HUAMBO, 2002) e uva <i>in natura</i> (RIBEIRO <i>et al.</i> , 2002)..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.2 – Comportamento do calor específico da uva americana calculado pela somatória dos calores específicos de seus componentes segundo Choi e Okos (1986)..... | 51 |
| Figura 3.3 –Variação do calor específico da uva do tipo Rasa com a umidade e a temperatura segundo Akhijahani e Khodaei (2013) | 52 |
| Figura 3.4 – Comportamento da condutividade térmica em função da umidade da uva em base seca segundo Vagenas <i>et al.</i> (1990a), Sweat (1974) e para a uva-passa predita por Mabrouk <i>et al.</i> (2006) | 53 |
| Figura 3.5 – Variação da condutividade térmica da uva Rasa com a umidade e a temperatura segundo Akhijahani e Khodaei (2013) | 55 |
| Figura 3.6 – Comportamento do calor de vaporização com a variação da temperatura em 5 diferentes umidades: 4,5; 2; 1; 0,5 e 0,3 kg/kg em base seca, dado pelo modelo apresentado por Vagenas <i>et al.</i> (1990b)..... | 56 |
| Figura 3.7 – Comportamento da difusividade efetiva calculada pela equação (3.15) Arrhenius citada em Vagenas <i>et al.</i> (1990b) em função da temperatura da uva | 58 |
| Figura 3.8 – Comportamento da atividade de água como função da umidade da uva Sultana segundo Iglesias e Chirife (1982)..... | 59 |
| Figura 3.9 – Comportamento da umidade de equilíbrio em função da atividade da água para as temperaturas 300 K, 310 K, 320 K, 330 K e 340 K segundo o modelo de Vagenas <i>et al.</i> (1990b) | 61 |
| Figura 3.10 – Comportamento da umidade de equilíbrio variando com a atividade de equilíbrio pelo modelo GAB (GABAS, 1998)..... | 62 |
| Figura 3.11 – Comportamento da densidade do ar em função da temperatura (PFEIFER, 2011) | 64 |
| Figura 3.12 – Comportamento da viscosidade dinâmica do ar com a temperatura (PERRY E GREEN, 1997) | 65 |
| Figura 3.13 – Comportamento da condutividade térmica do ar em função da temperatura..... | 66 |
| Figura 3.14 – Variação do coeficiente de difusão da água no ar descrito pela Equação (3.24) | 67 |
| Figura 3.15 – Dependência do número de Schmidt com a temperatura..... | 70 |
| Figura 3.16 – Comportamento do coeficiente de transferência de calor com a variação da velocidade do ar de secagem e do comprimento característico segundo Vagenas <i>et al.</i> (1990b) | 71 |
| Figura 3.17 – Comportamento do coeficiente de transferência de massa do ar com a variação das condições do ar de secagem segundo Vagenas <i>et al.</i> (1990b) | 72 |
| Figura 4.1 – Potes para teste estático de umidade de equilíbrio..... | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.2 – Estufa de secagem com saída de ar (1) e circulação de ar (2)..... | 83 |
| Figura 4.3 – Configuração geométrica das uvas Crimson na bandeja de secagem da estufa com recirculação de ar..... | 84 |
| Figura 4.4 – Dimensões características da uva..... | 85 |
| Figura 4.5 – Variação do calor específico da uva Crimson..... | 88 |
| Figura 4.6 – Variação da condutividade térmica da uva Crimson..... | 89 |
| Figura 4.7 – Variação da densidade da uva Crimson calculada pela sua composição centesimal | 90 |
| Figura 4.8 – Distribuição de resíduos do modelo GAB | 91 |
| Figura 4.9 – Correlações para estimativa da umidade de equilíbrio | 91 |
| Figura 4.10 – Comparação entre uma baga de uva submetida ao pré-tratamento e uma baga <i>in natura</i> | 92 |
| Figura 4.11 – Teor de umidade das uvas Crimson obtidos experimentalmente..... | 93 |
| Figura 4.12 – Distribuição de resíduos do modelo Verna | 94 |
| Figura 4.13 – Curva de secagem da uva Crimson para temperatura do ar a 70°C em estufa de circulação..... | 95 |
| Figura 4.14 – Uvas-passas após cinco horas de secagem..... | 96 |
| Figura 4.15 – Comparação das dimensões características de bagas de uva <i>in natura</i> e seca... | 96 |
| Figura 4.16 – Variação da altura da uva Crimson ao longo da secagem..... | 97 |
| Figura 4.17 – Variação do volume adimensional obtido a partir da remoção da umidade da uva Crimson | 98 |
| Figura 4.18 – Comportamento da densidade da uva Crimson com a variação da umidade..... | 99 |
| Figura 5.1 – Esquema de disposição das uvas <i>in natura</i> dispostas na bandeja perfurada de secagem | 102 |
| Figura 5.2 – Disposição das uvas-passas ao final da secagem na bandeja perfurada..... | 102 |
| Figura 5.3 – Variação da umidade do material ao longo de sua altura adimensional, para diferentes tempos de secagem | 117 |
| Figura 5.4 – Variação da umidade do material com o tempo de secagem para diferentes alturas | 118 |
| Figura 5.5 – Perfil da umidade média simulada e obtida experimentalmente..... | 119 |
| Figura 5.6 – Variação da temperatura do material ao longo de sua altura adimensional, para diferentes tempos de secagem | 120 |
| Figura 5.7 – Perfis de temperatura simulados ao longo do leito para 16 horas de secagem .. | 121 |
| Figura 5.8 – Perfis de temperatura em diferentes pontos do leito em 0,18 horas de secagem | 122 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.9 – Variação da altura do leito com o tempo de secagem..... | 122 |
| Figura 5.10 – Perfil da velocidade de encolhimento ao longo do domínio adimensional em diferentes tempos..... | 123 |
| Figura 5.11 – Perfil da velocidade de encolhimento ao longo do tempo de secagem em (a) $y/L=0; 1/5; 1/3; 1/2$ e $2/3$ e (b) $y/L=1$ para 16 horas de secagem | 124 |
| Figura 6.1 – Histogramas das uvas-passas com distribuição de notas dos atributos: a) aparência, b) textura, c) aroma, d) sabor e e) impressão geral..... | 130 |

NOMENCLATURA

| | | |
|--------------------------|--|------------|
| A | Constante da equação da difusividade efetiva | m^2/s |
| A, B, C, D | Parâmetros da equação (4.5) | g |
| A_1, A_2 | Parâmetros da equação (2.47) | m |
| a_{11}, a_{12}, a_{13} | Parâmetros da equação (5.39) | [-] |
| a_{21}, a_{22}, a_{23} | Parâmetros da equação (5.40) | [-] |
| a_w | Atividade de água | [-] |
| b | Largura da bandeja ao longo da dimensão x | m |
| C | Concentração de umidade | mol/m^3 |
| c | Calor específico do material | $J/kg/K$ |
| d' | Parâmetro da equação (2.32) | [-] |
| D_{ar} | Coefficiente de difusão da água no ar | m^2/s |
| D_e | Difusividade efetiva | m^2/s |
| d_e | Comprimento característico | m |
| D_f | Coefficiente de difusão livre | m^2/s |
| d_{fc} | Diâmetro médio do fruto do café (Eq. (2.34)) | m |
| E_a | Energia de ativação | kJ/mol |
| f | Fator de correção | [-] |
| h | Entalpia específica | W/kg |
| h_m | Coefficiente de transferência de massa | m/s |
| h_q | Coefficiente de transferência de calor | m/s |
| I | Fonte ou sumidouro de massa | kg/m^3 |
| i | Pontos da malha de simulação | [-] |
| j | Fluxo mássico | $kg/m^2/s$ |
| L | Largura de uma baga de uva | m |
| l | Comprimento da bandeja | m |
| l_{in} | Espessura da bandeja | m |
| Lw | Calor diferencial de adsorção | J/kg |
| M | Diâmetro médio de uma baga de uva | m |
| m | Massa | kg |
| N | Massa (Eq. (4.3)); Normalidade (4.7) | g ; [-] |
| p | Pressão | $[M/LT^2]$ |

| | | |
|-----------------|--|-----------------------|
| P | Massa da amostra | g |
| p_0 | Parâmetro da Equação (2.26) | [-] |
| PE | Peso equivalente do ácido tartárico | g |
| Pr | Número de Prandtl | [-] |
| q | Fluxo de calor | W/m^2 |
| R | Constante dos gases ideais | $kJ/mol/K$ |
| r | Calor de vaporização | J/kg |
| Re | Número de Reynolds | [-] |
| Sc | Número de Schmidt | [-] |
| T | Temperatura | K |
| t | Tempo | s |
| ton | Tonelada | |
| U | Umidade em base úmida | $kg_{H_2O}/kg_{b.u.}$ |
| V | Volume da amostra | m^3 |
| v | Volume específico | m^3 |
| w | Velocidade de encolhimento | m/s |
| w_{ref} | Velocidade de encolhimento de referência | m/s |
| X | Umidade em base seca | $kg_{H_2O}/kg_{b.s.}$ |
| x | Fração mássica | [-] |
| x', y', z' | Parâmetros da equação (2.29) | [-] |
| X_m, c_r, k_r | Parâmetros da equação (3.17) | [-] |
| z_l | Comprimento da bandeja ao longo de z | m |

SÍMBOLOS

| | | |
|----------------------|---------------------------------------|-------|
| α_1, α_2 | Coefficientes da condição de contorno | [-] |
| β | Coefficiente de encolhimento | [-] |
| γ_1, γ_2 | Coefficientes da condição de contorno | [-] |
| δ | Gradiente do coeficiente térmico | $1/K$ |
| ε | Critério de mudança de fase | [-] |
| ζ | Variável adimensional da dimensão y | [-] |
| θ | Fração de volume | [-] |

| | | |
|------------------|---|----------|
| θ_i | Variáveis adimensionais de: 1 Temperatura; 2 Umidade e velocidade de encolhimento | [-] |
| λ | Condutividade térmica efetiva | $W/m/K$ |
| ρ | Densidade | kg/m^3 |
| τ | Fator de tortuosidade | [-] |
| φ_1 | Coefficiente da condição de contorno | [-] |
| ϕ | Porosidade | [-] |
| ϕ_1, ϕ_2 | Coefficientes da condição de contorno | [-] |
| ω_s | Concentração de sólido seco | kg/m^3 |

SUBSCRITOS

| | |
|-------------|--------------|
| 0 | Inicial |
| <i>a</i> | Água |
| <i>ar</i> | Ar |
| <i>b</i> | Bulk |
| <i>diff</i> | Difusivo |
| <i>e</i> | Equilíbrio |
| <i>f</i> | Fluido |
| <i>in</i> | Inicial |
| <i>L</i> | Líquido |
| <i>p</i> | Produto |
| <i>s</i> | Sólido seco |
| <i>shr</i> | Encolhimento |
| α | Aparente |

SOBRESCRITOS

| | |
|-----|------------------|
| v | Fração de volume |
|-----|------------------|

RESUMO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de frutas, dentre as quais destaca-se a uva - rica em carboidratos e fonte de ferro, vitaminas e minerais. A produção brasileira de uvas se concentra no Rio Grande do Sul e na região do Vale do São Francisco. A uva Crimson, objeto dessa dissertação, é produzida principalmente nos municípios de Juazeiro do Norte (Bahia) e Petrolina (Pernambuco). Ela é considerada do tipo uvas finas de mesa, é apirênica e tem coloração avermelhada. A uva-passa é obtida através da secagem, que reduz a quantidade de água e aumenta o seu tempo de prateleira. Não há registro de uvas-passas produzidas no Brasil em escala comercial e o aumento da produção registrada nos últimos anos justifica a produção de uvas-passas nacionais. A secagem pode ser realizada através de estufas solares ou utilizando secadores de bandejas. A produção de uvas-passas nestes secadores permite um maior monitoramento da operação, que não fica sujeita a variações climáticas e propicia um melhor controle da qualidade do produto. A otimização da secagem e o aprimoramento do projeto dos secadores utilizando modelos matemáticos é eficiente, permite avaliar cenários diferentes que considerem as propriedades do alimento, a temperatura e a velocidade do ar de secagem, o tipo de recirculação deste ar e definir os fatores que mais influenciam o processo e garantam a melhoria da qualidade do produto obtido. Nesta dissertação um modelo matemático fenomenológico, unidimensional e transiente representativo da secagem de um leito com propriedades constantes e equivalentes às das uvas Crimson, é desenvolvido e validado com resultados experimentais obtidos em uma estufa de recirculação. O fenômeno do encolhimento da superfície desse leito é considerado no desenvolvimento do modelo. O calor específico, a condutividade térmica, a densidade do sólido seco e o coeficiente de encolhimento das uvas Crimson foram obtidas experimentalmente, e comparados com valores reportados na literatura para outros produtos. Os demais parâmetros foram estimados através de correlações. O modelo matemático formado por equações diferenciais parciais foi resolvido utilizando o método das linhas com discretização por diferenças finitas. Os resultados simulados de umidade, de temperatura e de encolhimento de um leito unidimensional são consistentes e representam qualitativamente a secagem de um conjunto de uvas-passas com geometria oblato-esferoidal. A qualidade do produto obtido foi avaliada por técnicas de análise sensorial. Os atributos sensoriais das uvas-passas variedade Crimson são considerados bons, indicando uma avaliação positiva do consumidor.

Palavras-chave: Uvas crimson; Uvas-passas; Modelagem matemática; Secagem; Encolhimento; Análise sensorial.

ABSTRACT

Brazil is the third largest producer of fruits in the world, among which the grapes rich in carbohydrates and source of iron, vitamins and minerals. The Brazilian production of grapes is concentrated in Rio Grande do Sul and in the region of the São Francisco Valley. The Crimson grape, object of this dissertation, is produced mainly in the city of Juazeiro do Norte (Bahia) and Petrolina (Pernambuco). It is considered a kind of table grapes, is apirénica and has reddish coloration. The raisins is obtained by drying, which reduces the amount of water and increases its shelf life. There is no record of raisins produced in Brazil on a commercial scale but the increase in the production recorded in recent years justifies the production of Brazilians raisins. Drying used to be produced through solar dryer or by using tray dryers. The production of raisins in these dryers allows a greater monitoring of the operation, which is not subject to climatic variations and allows a better control of the quality of the product. The optimization of the drying and improvement of the design of the dryers using mathematical models is efficient because allows to evaluate different scenarios that consider those properties of the food, the temperature and the velocity of drying air, the type of recirculation of this air. Which define the factors that more influence the process and ensure the improvement of the product quality. In this dissertation a phenomenological, unidimensional and transient mathematical model representative of the bed drying with constant and equivalent properties to the Crimson grapes, is developed and validated with experimental results obtained in a recirculation dryer. The phenomenon of shrinkage of the surface of this bed is considered in the development of the model. The specific heat, thermal conductivity, dry solid density and shrinkage coefficient of Crimson grapes were obtained experimentally and was compared with values reported in the literature. The other parameters were estimated through correlations. The mathematical model use partial differential equations that is solved using the discrete finite difference method. The simulate moisture, temperature and shrinkage results of a one-dimensional bed are consistent and qualitatively represent the drying of a set of raisins with oblato-spheroidal geometry. The quality of the product obtained was evaluated by sensory analysis techniques. The sensory attributes of Crimson variety raisins are considered to be good, indicating a positive consumer assessment.

Key words: Crimson Grapes; Raisins; Mathematical Modeling; Drying; Shrinkage; Sensory Analysis.

1. INTRODUÇÃO

Em 2012 o Brasil foi o terceiro maior produtor de produtos agrícolas, que são destinados principalmente ao mercado interno. A produção da China, Índia e Brasil corresponde a 44,2% do total mundial, como mostrado na Figura 1.1 (ANDRADE, 2012).

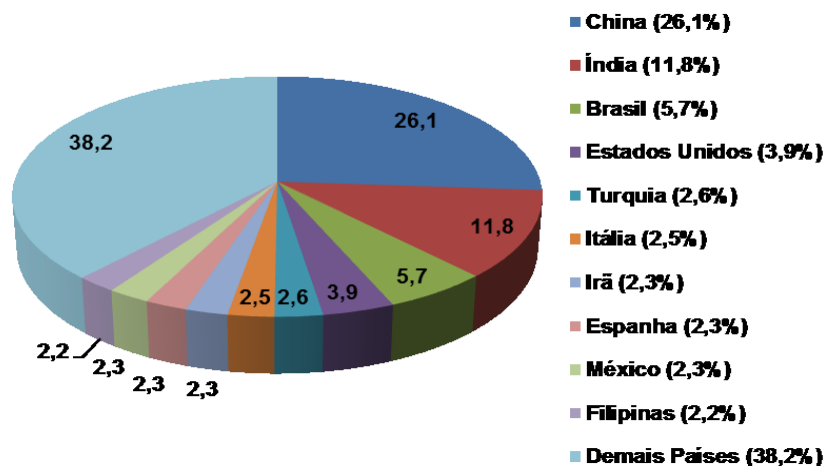


Figura 1.1 – Contribuição dos principais países produtores de produtos agrícolas no ano de 2012 (ANDRADE, 2012)

A Tabela 1.1 apresenta a produção de frutas no Brasil em 2015 e 2016 (CARVALHO *et al.*, 2017). As perdas das frutas produzidas são significativas, da ordem de 25% para a laranja, o abacaxi e a manga, 32% para o mamão e 42% para a banana. Estas perdas decorrem principalmente da deterioração das frutas por fungos e do transporte e armazenamento inadequados (REETZ *et al.*, 2015).

Tabela 1.1 – Produção de frutas no Brasil em 2015 e 2016 (CARVALHO *et al.*, 2017)

| Fruta | Quantidade (ton) | Quantidade (ton) |
|---------|------------------|------------------|
| | 2015 | 2016* |
| Laranja | 16.746.247 | 15.983.273 |
| Banana | 6.844.491 | 6.962.134 |
| Abacaxi | 3.621.100 | 3.532.689 |
| Mamão | 1.463.770 | 1.463.770 |
| Uva | 1.497.302 | 987.059 |
| Maçã | 1.264.651 | 1.064.7081 |
| Manga | 976.815 | 976.815 |
| Pêra | 21.160 | 21.160 |

*Estimativa

A uva é uma fruta rica em carboidratos e fonte de ferro, vitaminas e minerais, que pode ser consumida *in natura*, e é utilizada na fabricação de vinhos, sucos, destilados, vinagre, geleia e passas.

A produção de uvas de mesa no Brasil pode ser dividida em dois grandes grupos: uvas rústicas e uvas finas. O primeiro grupo é composto pelas uvas rústicas (*Vitis labrusca*) como a Isabel e a Niágara. As uvas finas (*Vitis vinifera*) são representadas principalmente por cultivares como Itália e suas mutações Rubi, Benitaka e Brasil, além da Red Globe e alguns cultivares sem semente como a Crimson (TELIS *et al.*, 2006) (ver Figura 1.2).

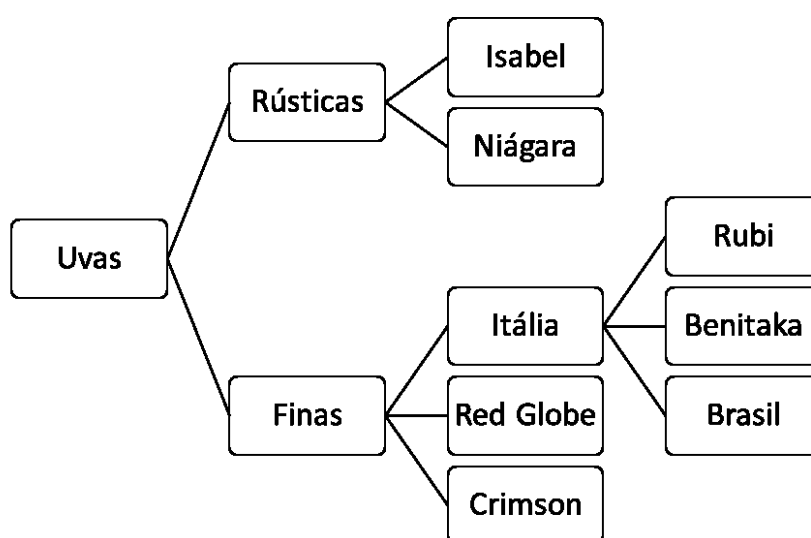


Figura 1.2 – Tipos de uvas produzidas no Brasil

A produção de uvas finas para mesa está concentrada nas regiões sudoeste e noroeste de São Paulo, no Vale do São Francisco entre Pernambuco e Bahia e em Pirapora, Minas Gerais (MELLO, 2004 *apud* FELDBERG *et al.*, 2007). A uva Crimson é uma uva avermelhada sem semente produzida nas regiões irrigadas do Vale do São Francisco, em especial nos municípios de Juazeiro do Norte (BA) e Petrolina (PE).

Na Tabela 1.2, pode-se observar a produção de uvas no Brasil nos anos 2014 até 2016 em cada estado produtor. Esta produção tem diminuído ao longo dos anos nos estados da Bahia, Minas Gerais, São Paulo e Paraná. O Rio Grande do Sul é o estado com maior produção de uvas no Brasil e detém 60% da área vinícola nacional. Em 2016 foram produzidas 413.640 toneladas, 52,79% abaixo da produção de 2015 nesse estado. Essa retração ocorreu por diversos fatores climáticos. Em 2014, a produção de uvas no Brasil foi de 1.454.183 toneladas, em 2015 foi de 1.497.302, enquanto que em 2016 foi de 987.059, 34,08% abaixo da marca do ano anterior (CARVALHO *et al.*, 2017).

Tabela 1.2 – Produção de uvas no Brasil no período de 2014 a 2016 (CARVALHO *et al.*, 2017)

| Estado | Quantidade (ton/ano) | | |
|-------------------|----------------------|------------------|----------------|
| | 2014 | 2015 | 2016* |
| Rio Grande do Sul | 812.517 | 876.215 | 413.640 |
| Pernambuco | 236.719 | 273.367 | 242.967 |
| São Paulo | 153.822 | 142.631 | 144.110 |
| Paraná | 78.979 | 69.035 | 66.000 |
| Bahia | 77.504 | 77.408 | 62.740 |
| Santa Catarina | 68.743 | 69.118 | 33.849 |
| Minas Gerais | 11.557 | 12.615 | 11.224 |
| Paraíba | 4.036 | 2.196 | 2.636 |
| Goiás | 3.524 | 4.008 | 2.566 |
| Espírito Santo | 2.226 | 2.327 | 2.469 |
| Outros | 4.556 | 4.382 | 4.858 |
| Brasil | 1.454.183 | 1.497.302 | 987.059 |

*Estimativa

A cultivar Itália é a principal uva produzida no Brasil, ocupando 63,2% do total de área plantada. O Polo de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA) é o maior exportador de uvas do País. As uvas finas de mesa englobam variedades da espécie *Vitis vinífera* L. de origem europeia, sensíveis às doenças provocadas por fungos e exigem tratamentos culturais. Todas as variedades exportadas estão incluídas nesse grupo ou são híbridas entre elas e alguma outra espécie de *Vitis* (LEÃO, 2006).

As passas são fontes de hidratos de carbono e contêm grandes quantidade de ferro, vitaminas A, B1, B2, B3, B6 e minerais. Ela geralmente é incluída nos cereais, panificação, laticínios e produtos de confeitaria (ALMEIDA, 2013a).

Toda uva-passa consumida no Brasil é importada, mas com o aumento da produção de uva de mesas nacionais há um grande potencial para usar a produção excedente ou frutas fora do padrão para a produção de passas (GABAS, 1998; SOUZA *et al.*, 2015). Segundo Souza *et al.* (2015), não há registro de empreendimento comercial específico no Brasil para a produção de uvas-passas. Além disso, devido às condições climáticas nas principais regiões produtoras como a região do submédio do São Francisco, a secagem deve ser artificial com consequente aumento dos custos de produção. Os autores também informam que a produção de 1 tonelada de uvas-passas exige 3,5 toneladas de uvas *in natura* com um custo estimado de R\$ 4.200,00 (Quatro mil e duzentos reais) por tonelada de passas (R\$ 3.500,00 da produção de uvas *in natura* somados à R\$700,00 gastos com o processamento). O investimento para o plantio de um parreiral que tem vida útil aproximada de 20 anos é da ordem de R\$ 60.000,00 (Sessenta mil reais) por hectare e os custos anuais de manutenção são da ordem de R\$ 40.000,00 (Quarenta

mil reais). Há que se considerar ainda os custos de embalagem, estocagem, mão-de-obra, instalações, transporte, etc., e o fato do preço de referência da uva importada ser definido em dólares americanos.

A uva-passa é muito consumida mundialmente. Os principais países exportadores de uvas-passas para o Brasil são a Argentina, seguida por Irã e Estados Unidos (SOUZA *et al.*, 2015). Dados sobre quantidades importadas e os principais países exportadores são listados na Tabela 1.3.

Tabela 1.3 – Países exportadores de uvas-passas para o Brasil em 2013 (SOUZA *et al.*, 2015)

| Países | Quantidade (kg) | Valor (US\$) |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| Argentina | 20.571.302 | 47.105.230 |
| Irã | 1.415.828 | 2.617.493 |
| Estados Unidos | 538.319 | 1.622.047 |
| Chile | 453.310 | 1.123.963 |
| Emirados Árabes | 240.800 | 442.625 |
| China Continental | 100.027 | 193.223 |
| Cingapura | 40.000 | 77.213 |
| Índia | 36.000 | 64.213 |
| Afeganistão | 18.000 | 32.600 |
| França | 720 | 6.016 |
| Total | 23.414.306 | 53.284.623 |

Na Figura 1.3, pode ser observado o comportamento da importação de uvas-passas no âmbito nacional durante o período de 2005 a 2012, no qual houve um crescimento em 36% no volume de passas importadas, enquanto, para o valor de divisas evadidas nessa operação comercial o incremento foi de 67% (SOUZA *et al.*, 2015).

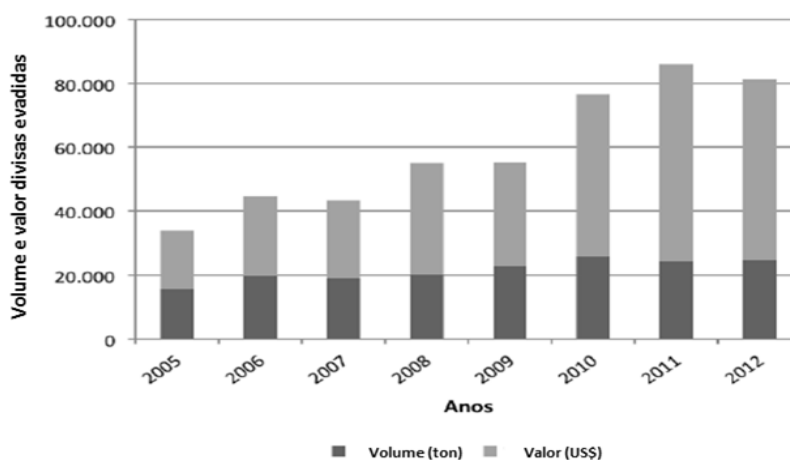


Figura 1.3 – Evolução da importação de uvas-passas pelo Brasil no período 2005 – 2012 (SOUZA *et al.*, 2015)

A produção de uvas-passas no Brasil tem sido apontada como uma alternativa de negócio sustentável em regiões tradicionalmente produtoras de uvas, como o Vale do São Francisco e Santa Catarina (FREITAS *et al.*, 2013). Assim, com novas espécies de uvas e desenvolvimento de tecnologia adequada, o Brasil pode buscar seu espaço no mercado mundial de passas.

As passas podem ser obtidas por secagem solar ou por secagem em diferentes tipos de secadores industriais. Geralmente, a secagem de frutas é realizada pelo método natural, que consiste em expor o produto à luz solar por um longo período de tempo. Entretanto, o produto fica suscetível à variação climática e é exposto a microrganismos presentes no ar, prejudicando a qualidade final. Além disso, o volume de processamento pode ser bastante baixo (BARRET *et al.*, 2004).

A secagem artificial permite eliminar os problemas decorrentes da secagem natural e pode ser realizada em secadores industriais, que requerem uma grande quantidade de energia, além de cuidados com a temperatura do ar, para preservar a qualidade final do produto. Um tipo específico de secador industrial tradicional utilizado na produção de uvas-passas é o secador convectivo de bandejas que consiste de uma cabine com várias bandejas perfuradas onde as frutas são acomodadas e a circulação do ar é feita na parte superior e inferior da bandeja.

Um tipo específico de uva para a produção de passas deve necessitar do mínimo de intervenções de manejo para produção de grandes volumes, ou seja, em torno de 30 ton/hectare por ano, apresentando boa estabilidade de produção. A uva deve apresentar, também, uniformidade de tamanho e cor, textura carnosa e macia, facilidade de degrana, película fina, alto conteúdo de sólidos solúveis e sabor agradável (SOUZA *et al.*, 2015). Noventa por cento da produção de uvas-passas no mundo é elaborada com o cultivar ‘*Thompson Seedless*’, uma uva branca, apirênica (sem sementes), com película fina, bagas pequenas e ovais, com alto conteúdo de açúcares. Na Índia, são, também, utilizadas mutações somáticas de ‘*Thompson Seedless*’, como ‘*Sonaka*’, ‘*Tas-A-Ganesh*’ e ‘*Manik Chaman*’ (SOUZA *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, houve aumento considerável no plantio de cultivares apirênicas, isto é, sem sementes, principalmente em regiões de clima tropical, em razão da crescente demanda do mercado externo e dos melhores rendimentos com a comercialização deste produto (MELLO, 2004 *apud* FELDBERG *et al.*, 2007). A ausência de sementes é uma característica desejada para o consumo *in natura*. Os principais tipos de uvas apirênicas produzidas em território nacional são: *Superior Seedless*, *Crimson Seedless*, *Thompson Seedless*, *Catalunha*, *Perlette* e *Vênus* (ver Figura 1.4).

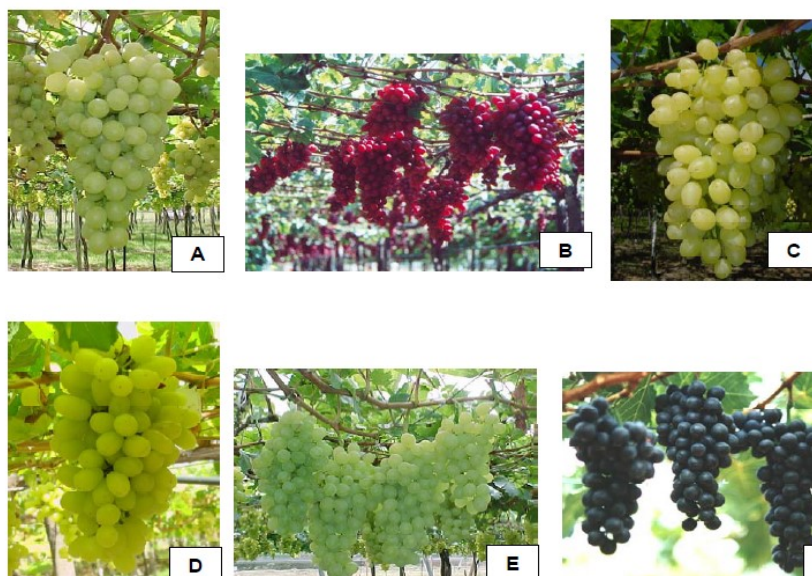


Figura 1.4 – Variedades de uvas sem sementes: a) Superior Seedless (Festival); b) Crimson Seedless; c) Thompson Seedless; d) Catalunha; e) Perlette e f) Vênus (LEÃO, 2006).

Apesar da produção de uvas-passas ser objeto de pesquisas de caráter experimental e de desenvolvimento de modelos matemáticos, os dados disponíveis na literatura não podem ser simplesmente aplicados para outras variedades ou para secadores com configurações diferentes, uma vez que fatores como o pré-tratamento, a variedade, a origem do produto, a safra, a configuração do secador, as condições climáticas e os parâmetros operacionais influenciam os parâmetros da secagem e afetam a qualidade do produto obtido. As diversas variedades de uva contêm uma cutícula cerosa de natureza hidrofóbica cobrindo a epiderme que estabelece uma barreira contra a perda de água por parte do fruto. Essa película deve ser retirada ou modificada para torná-la hidrofílica através pré-tratamentos químicos geralmente realizados com azeite de oliva e um sal básico, constituindo-se em outro fator importante de avaliação para estudos com variedade específica de uvas.

Desta forma, considerando que o País é grande consumidor de uvas-passas; que grande parte destas uvas-passas são importadas; que a produção nacional de uvas apirênicas tem crescido gerando potencial para a produção de uvas-passas nacionais de grande qualidade; que o controle do processo de secagem deve ser rigoroso afim de garantir as condições ótimas de secagem que garantam o sabor, a textura, a maciez, a umidade adequados ao produto, esta dissertação tem como objetivo principal estudar a produção de uvas-passas através de experimentos conduzidos em secador de bandejas e através da simulação computacional de modelos matemáticos fenomenológicos.

Nessa dissertação a uva da variedade Crimson produzida no Vale do São Francisco foi escolhida para a produção de uvas-passas. Essa variedade é apirênica, isto é, sem sementes, apresenta textura agradável, alto teor de carboidratos e grau Brix compatíveis com as características desejadas para o produto obtido.

No capítulo de Revisão Bibliográfica são apresentados conceitos gerais sobre secagem, análise de estudos anteriores sobre a secagem de uvas, incluindo tipos de secadores, modelagem matemática e técnicas de pré-tratamento utilizadas para a produção de uvas-passas.

O Capítulo 3 apresenta um estudo abrangente sobre correlações disponíveis na literatura para a estimativa das propriedades termofísicas de uvas diversas e do ar de secagem. São avaliados modelos para estimativa da difusividade efetiva, umidade de equilíbrio, atividade da água, calor de vaporização da água, densidade, viscosidade dinâmica, condutividade térmica, coeficiente de difusão da água e coeficientes de transferência de calor e de massa do ar de secagem. Este estudo permitiu fazer uma avaliação inicial da dependência de propriedades, como calor específico e condutividade térmica de uvas em função da umidade e a temperatura e definir a metodologia adotada na estimativa de propriedades específicas para as uvas Crimson, objeto de estudo desta dissertação.

As propriedades calor específico, condutividade térmica e densidade específica das uvas Crimson foram determinadas experimentalmente a partir da análise centesimal das uvas. Elas foram submetidas à secagem em secador de bandeja para avaliação da variação da densidade e do encolhimento. A metodologia experimental está descrita em detalhes no Capítulo 4, juntamente com os resultados de caracterização da matéria prima.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação do modelo matemático de uma bandeja de secagem, equivalente à utilizada na obtenção das propriedades da uva Crimson e parte do secador de tipo túnel com carrinhos com bandejas múltiplas indicado na literatura como adequado à secagem de uvas. O modelo matemático desenvolvido considera a variação da umidade e da temperatura das uvas, consideradas como uma única fase, ao longo da altura e do comprimento coincidente com as dimensões da bandeja. O modelo transiente e unidimensional é formado pelas equações de conservação de massa e energia e pela equação representativa do encolhimento do material. A simulação do modelo foi realizada no software Scilab 5.5.2, em um computador com sistemas operacional Windows 10, processador Inter Core i3 64 bits, CPU de 1,80 GHz.

A análise sensorial realizada com as uvas-passas obtidas pela secagem descrita no Capítulo 4 foi realizada de acordo com as normas brasileiras e os resultados foram avaliados e são apresentados no Capítulo 6 dessa Dissertação.

De modo geral, os resultados obtidos tanto para a caracterização da matéria-prima, qualidade do produto obtido, valores das propriedades termofísicas das uvas Crimson e do ar de secagem, perfis simulados de temperatura e de umidade e avaliação do produto a partir da análise sensorial são consistentes e promissores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A opção pelo consumo de alimentos como frutas, vegetais, grãos e cereais preferencialmente orgânicos, por pessoas que zelam pela saúde, pelo bem-estar e pela longevidade, exige que as empresas invistam na produção de alimentos funcionais, balanceados e ricos em nutrientes. As frutas e os vegetais desidratados são uma alternativa prática e viável para atender à demanda deste público exigente por produtos saudáveis e naturais.

As frutas que podem ser encontradas com mais facilidade na forma desidratada são: uvas, banana, figo, maçã, laranja, damasco, ameixa e abacaxi. Após a secagem, o açúcar natural e outros nutrientes como antioxidantes e vitaminas das frutas ficam mais concentrados. Além da característica funcional, o consumidor exige que esses alimentos tenham cores e texturas perfeitas e excelente sabor - o que torna o processo de desidratação por secagem complexo e sujeito a várias restrições operacionais (ver Figura 2.1).

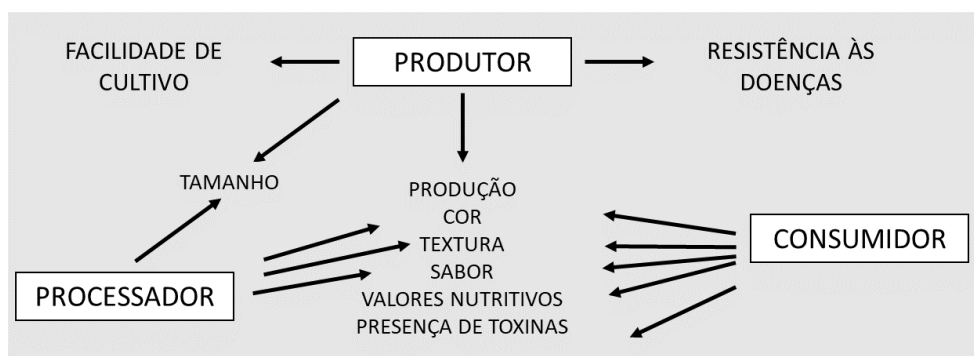


Figura 2.1 – Características da qualidade de alimentos (adaptado de BARRET *et al.*, 2004).

A desidratação de alimentos é realizada por meio de secadores. A escolha do secador ideal depende das características da qualidade final desejada para cada alimento. A uva, passa pelo processo de secagem na sua forma inteira, ou seja, ela não é descascada e nem fatiada. Assim, pode-se utilizar secadores solar, de esteira, de micro-ondas e, principalmente, o de bandeja na produção de uvas-passas. Tais secadores são descritos na seção 2.1.

2.1. Secadores utilizados na secagem de uvas

Os secadores industriais são utilizados para a secagem artificial de materiais, pois podem fornecer uma qualidade final aos alimentos superior à secagem natural. Existem mais

de 200 tipos de secadores disponíveis comercialmente e estes são classificados de acordo com as seguintes características (BARRET *et al.*, 2004):

- Modo de operação (batelada, contínuo ou semi-batelada);
- Pressão operacional (vácuo, atmosférica e alta pressão);
- Modo de transferência de calor (condução, convecção, radiação, dielétrico e a combinação de diferentes modos);
- Adiabático ou não adiabático;
- Forma física da amostra (granular, pasta, contínua, etc);
- Estado físico do produto durante a secagem (estacionário, deslizante, fluidizado, carregado, dispersão, jorro, vibrado, atomizado, agitado, revestidos em superfície inerte).

Esse esquema de classificação indica o grande número de configurações possíveis para secadores. A seleção do secador para uma tarefa específica, no entanto, é governada por um conjunto de critérios que limitam significativamente o número de candidatos. São critérios importantes a serem considerados (BARRET *et al.*, 2004):

- Forma física da semente ou do produto;
- Qualidade final do produto desejável;
- Sensibilidade do produto ao calor, isto é, sensibilidade às altas temperaturas;
- Eficiência energética;
- Taxa de produção.

O tipo de secador mais comum faz uso do escoamento de ar através do leito e é mais utilizado para a secagem de grãos. Esse secador é do tipo convectivo e sua operação pode ser batelada ou contínua. Esse último é usualmente classificado de acordo com as direções relativas do escoamento do ar e do sólido, podendo ser escoamento cruzado, concorrente e contracorrente, como mostra a Figura 2.2 (REZENDE, 2011). No secador de leito fixo, o material fica “preso” em uma superfície, geralmente uma célula de secagem, compreendida por telas e o ar passa através desse leito carregando a umidade contida.

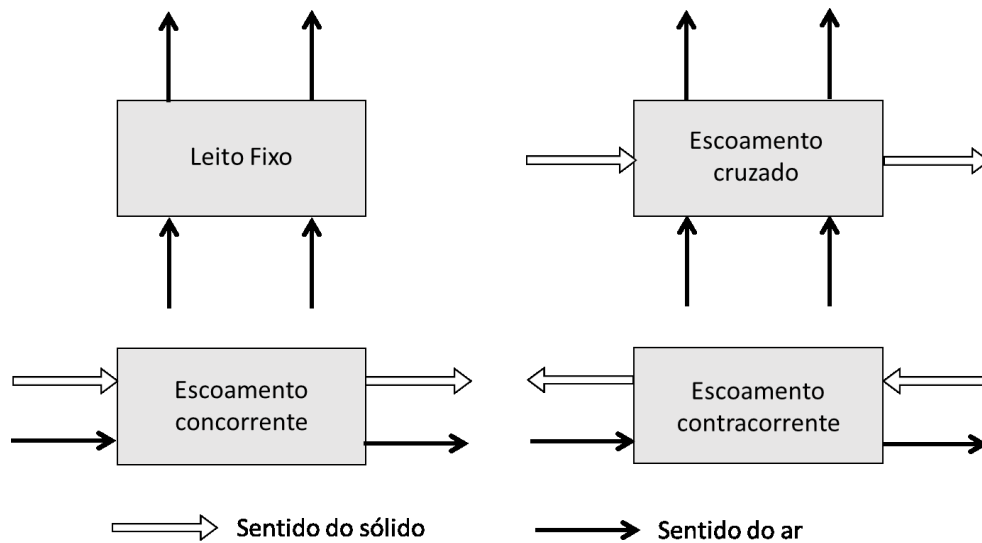


Figura 2.2 – Esquema dos quatro tipos mais comuns de leito convectivo (SFREDO, 2002 *apud* REZENDE, 2011)

No escoamento cruzado, o escoamento de ar é perpendicular ao escoamento dos grãos e, como vantagem, oferece uma menor queda de pressão através do leito (BARROZO, 1995; BARROZO *et al.*, 1999). Nos secadores com fluxo contracorrente, ar e grãos escoam em sentido contrário, o que acarreta numa descarga de sólido com temperatura próxima à temperatura do ar de entrada. Já os secadores de escoamento concorrente são caracterizados pela entrada do ar e do sólido no mesmo ponto do leito e o sólido sai com temperaturas bem elevadas.

Devido às configurações desse tipo de secador, ele não é indicado para a secagem de frutas, que exige um processo lento e com condições de secagem amenas, além de um secador de grandes dimensões e com baixo custo de manutenção (VAGENAS E MARINOS-KOURIS, 1991; BARRET *et al.*, 2004). Na Figura 2.3 são apresentados alguns tipos mais comuns de secadores de frutas.

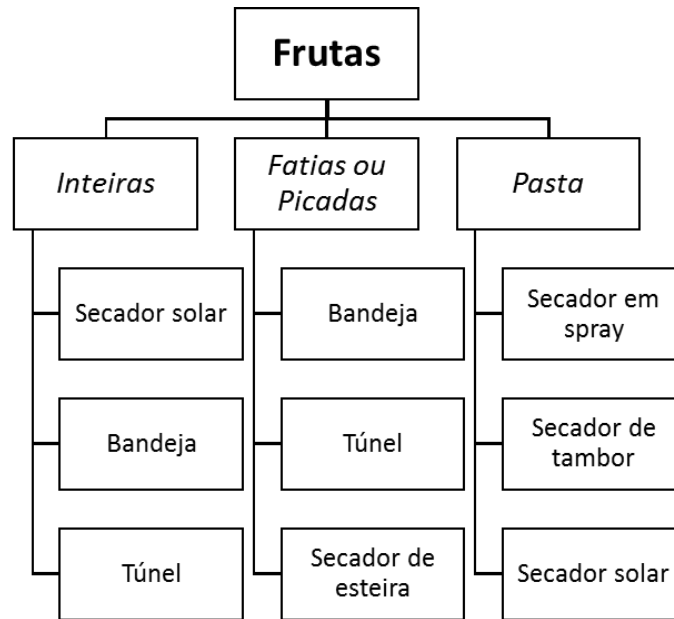


Figura 2.3 – Principais secadores utilizados na secagem de frutas (BARRET *et al.*, 2004)

Diante da Figura 2.3, uma abordagem mais completa sobre o secador solar, o secador de esteira, o secador de micro-ondas e o secador de bandejas é apresentada na sequência.

Secador Solar

A secagem solar é utilizada desde da antiguidade e ainda hoje é bastante popular. Conhecida como secagem natural, consiste em expor a matéria-prima por longos períodos à radiação solar e sob condições climáticas de temperaturas relativamente altas, ventos com intensidade moderada e baixas umidades relativas. Existem dois tipos principais de secagem solar: direta e indireta. Na secagem direta ou *sun-drying*, o produto é colocado em bandejas em campo aberto e recebem incidência solar diretamente. Esse método é muito lento, já que a radiação solar pode estar disponível apenas em parte do dia e requer grandes áreas para secar uma quantidade razoável de produtos (BARRET *et al.*, 2004).

A secagem solar indireta usa energia solar para aquecer o ar de secagem em coletores solares especiais, e o fluxo de ar passa pelo produto por convecção natural ou forçada. Uma ilustração do secador solar indireto do tipo gabinete é mostrada na Figura 2.4. Sua principal vantagem é utilizar energia renovável para aquecer o ar de secagem, porém, só pode ser utilizado em dia com alta radiação solar e climas quentes.

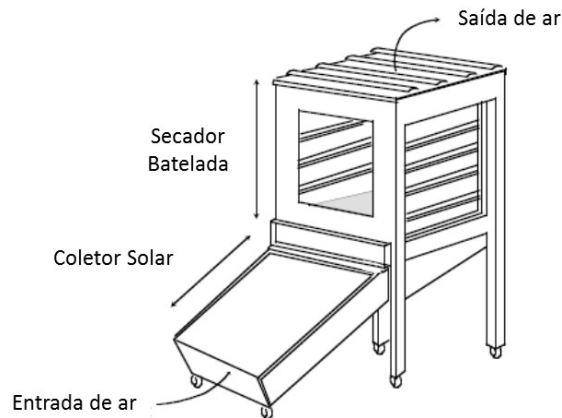


Figura 2.4 – Secador solar do tipo gabinete (BARRET *et al.*, 2004)

Esse tipo de secagem favorece a ocorrência de perdas do produto devido às contaminações por insetos e microrganismos, se cuidados especiais de manipulação e higiene não forem observados (SOUZA *et al.*, 2015).

Secador de Esteira

São secadores construídos para permitir o transporte contínuo de produto a ser desidratado. O transporte é realizado por uma esteira construída de modo a facilitar a passagem de ar quente através da camada de produto. A esteira se movimenta através de um túnel com seções e em cada uma a temperatura, a umidade relativa, a velocidade e a recirculação são independentes e podem ser controladas separadamente, melhorando o desempenho do secador e diminuindo os custos de operações. Um esquema do funcionamento desse secador pode ser observado na Figura 2.5.

Esse é um dos métodos mais comuns pelo qual o ar aquecido passa sobre ou através do sólido, carregando a umidade e transportando-a para fora do secador enquanto o calor sensível é transferido para o material por convecção.

Para materiais com umidade elevada, altas temperaturas do ar de secagem podem ser utilizadas, embora possam comprometer a qualidade final do produto. Dessa forma, com o sistema modular do túnel, as configurações em cada parte do secador podem ser mantidas independentes, melhorando a condição de secagem e mantendo a qualidade final.

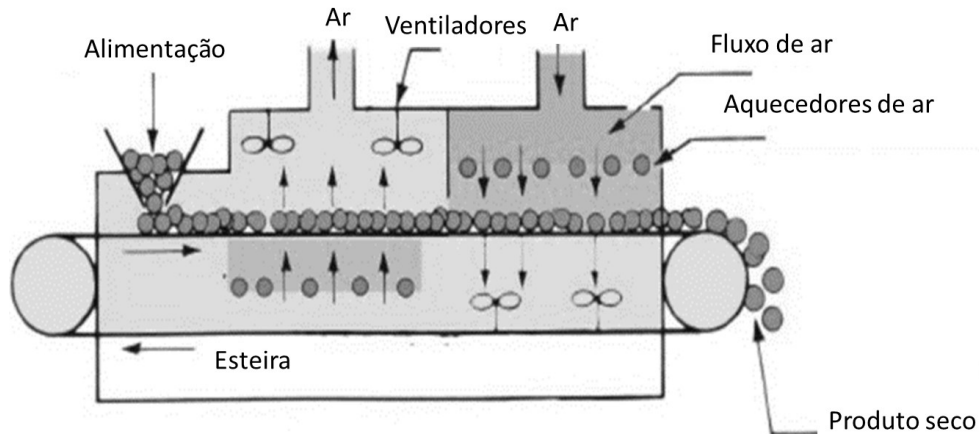


Figura 2.5 – Representação de um secador de esteira (PUHL E NITZKE, 2016)

Secador de Micro-ondas

O aquecimento por micro-ondas aumenta a temperatura interna das partes úmidas do sólido e o transporte de umidade por evaporação na superfície é melhorado devido a um gradiente interno de pressão. Esse secador apresenta como vantagens: a) secagem uniforme do sólido; b) adsorção seletiva pela água, que conduz a um perfil uniforme de umidade dentro da partícula; c) fácil controle devido à rápida resposta ao aquecimento. Porém, este tipo de equipamento é complexo e caro, o que pode dificultar a sua utilização para a secagem em grande escala (BARRET *et al.*, 2004). Na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, têm sido conduzidos estudos de secagem com micro-ondas para resíduos de acerola, e constatou-se que a potência do equipamento interfere na cinética de secagem, fazendo-a ocorrer de forma mais rápida para altas potências além de que níveis seguros para os padrões microbiológicos do resíduo de acerola foram alcançados através da secagem por micro-ondas sem comprometer a qualidade do produto final (NOGUEIRA, 2016).

Secador de Bandejas

Outra família importante de secadores convectivos é a do secador de bandeja, caracterizado pela simplicidade de construção, operação e pelo baixo custo de manutenção. Esse secador é do tipo batelada e as configurações de secagem (tempo, temperatura do ar, velocidade do ar) podem ser ajustadas dentro de um ciclo para atender as especificações do material sujeito à secagem (CELESTINO, 2010).

Os secadores de bandejas mais simples, consistem em um sistema de grelhas ou bandejas, colocadas uma sobre as outras, em uma cabine com ar aquecido circulando entre e através desse sistema. As grelhas são descarregadas manualmente. O ar pode ser aquecido eletricamente ou por um trocador de calor. Para garantir a uniformidade da secagem, o produto deve ser colocado de forma ordenada no sistema de bandejas e as camadas não devem ser superiores a 3 cm. O sistema de ar deve ser ligado antes da introdução do produto, para que seja atingida a temperatura de secagem antes de começar o processo. O aspecto mais importante a ser considerado na configuração desse secador é a recirculação de ar para manutenção da temperatura uniforme e o controle de umidade desejada (CELESTINO, 2010).

O tempo de secagem desse secador depende da matéria-prima e das condições ambientais. Esse tempo pode variar de 18 a 32 horas, e ao final, observa-se o encolhimento natural do produto, indicando a remoção da umidade por transferência de massa. Produtos como maçãs desidratadas, figos secos, tomate seco, banana passa, além de hortaliças e vegetais podem ser obtidos por esse secador. Ele também é muito utilizado na secagem de uvas para obtenção de passa (PENOV *et al.*, 2009; FERREIRA *et al.*, 2012; ALMEIDA, 2013b; SOUZA *et al.*, 2015; MACHADO *et al.*, 2015).

Teles *et al.* (2015) estudaram a modelagem da cinética de secagem por convecção forçada da uva Crimson em secador de bandeja. Os dados experimentais de secagem foram ajustados por meio de modelos de cinética de secagem semiteóricos e assim obteve-se o valor de difusividade efetiva. A secagem foi realizada com ar a 70°C totalizando um tempo de secagem de 24 h até obter peso constante das amostras. As uvas foram acomodadas em bandejas perfuradas que eram pesadas em intervalos de tempo determinados para obtenção dos valores de umidade. O encolhimento foi analisado a partir da amostragem de três frutos ao longo do período tendo suas medidas analisadas com paquímetro. A geometria da uva foi considerada esférica. Os autores concluíram que o elevado tempo de secagem da uva Crimson em secador de bandejas se deve ao fino filme de cera que recobre a sua casca, e por ele ser de natureza hidrofóbica dificulta a perda de água necessitando, assim, de um pré-tratamento químico, o qual não foi realizado nesse estudo. O teor de umidade final encontrado foi de 13,01% e o encolhimento do diâmetro médio foi de 17,02 mm para 3,51 mm.

Souza *et al.* (2015) desenvolveram um secador de bandejas mostrado nas Figura 2.6 e Figura 2.7, usado na secagem de oito variedades de uvas apirênicas (sem sementes) desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), denominadas *BRS Clara*, *BRS Linda*, *BRS Morena*, *BRS Vitória* e *Seleções 36, 39, 41 e 42*.

As condições nas quais esse secador foi desenvolvido garantiram uma condição mais uniforme de secagem que inclui um conjunto específico de dispositivos que garantem a uniformidade da umidade final do produto, característica não encontrada nos secadores disponíveis no mercado que não proporcionam uma secagem uniforme. Este secador pode ser adaptado para utilizar energia solar, GLP e eólica, e para a secagem de outras frutas como banana, ameixa, pêssego, figo, abacaxi, manga, maçã e tomate.

Os autores realizaram a secagem das uvas com temperaturas do ar quente variando entre 50°C e 70°C, essa última sendo a temperatura máxima para garantir a qualidade do produto final. A qualidade das uvas-passas foi avaliada através de técnicas de Análise Sensorial, que consideram, dentre outros, fatores como aparência, aroma, sabor, suculência e maciez.



Figura 2.6 – Cabine do secador de bandeja utilizado na secagem de uvas (SOUZA *et al.*, 2015)



(a)



(b)

Figura 2.7 – Detalhe do secador de bandejas usado na secagem de uvas: (a) bandeja com tela perfurada e (b) uvas acondicionadas na bandeja (SOUZA *et al.*, 2015)

Além da seleção do melhor secador para o processo é importante conhecer todas as variantes da secagem. A secagem não só afeta a quantidade de água presente no produto, mas também outras características físicas e químicas como atividade de água, isoterma de sorção, crescimento microbológico, reações enzimáticas e não enzimáticas e influência na deterioração de nutrientes e sabor final (CANOVAS E MERCADO, 1996 *apud* CINAR, 2002). O conhecimento dessas características físicas e químicas e o comportamento das mesmas durante o período da secagem é crucial para o bom funcionamento do secador, além de garantir a qualidade final do produto.

O secador de bandejas pode ser estendido à uma configuração de secador chamada de secador tipo túnel que consiste em um túnel longo, cerca de 24 m de comprimento, de seção circular ou retangular, com operação batelada ou semi-batelada. O produto entra nesse túnel em carrinhos, que são secadores de bandeja em uma base móvel, com o produto distribuído ao longo das telas e em cada carrinho, formando um trem. O ar aquecido entra por meio de sopradores e seu escoamento pode ser contracorrente ou concorrente em relação ao deslocamento do trem de carrinhos (CELESTINO, 2010). Uma vantagem da configuração contracorrente é a umidade final do produto ser uniforme.

Os túneis são construídos usando blocos de concreto. Os sopradores são colocados no canal de retorno do ar sobre a câmara de secagem e um queimador, que é utilizado para elevar a temperatura do ar de secagem, é instalada na entrada do ar fresco. A operação do secador acontece de forma quase contínua, pois um novo carrinho com frutas frescas é adicionado ao secador e um carrinho com frutas secas é removido, ao mesmo tempo, após uma hora e meia duas horas de processo (THOMPSON, 2000). Nas Figura 2.8, está representado de forma simplificada um secador tipo túnel com escoamento concorrente.

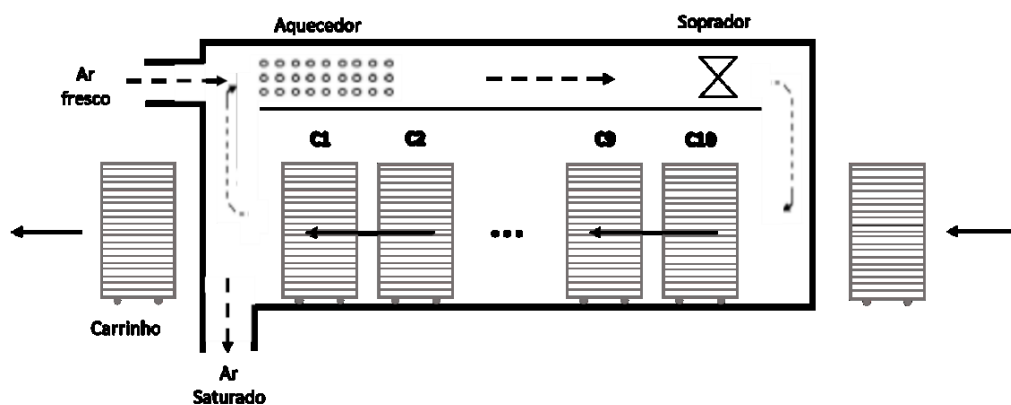


Figura 2.8 – Representação do secador tipo túnel com configuração concorrente com 10 carrinhos com 20 bandejas cada proposto por Vagenas *et al.* (1990b) e Vagenas e Marinos-Kouris (1991)

Kiranoudis *et al.* (1997) apresentam a modelagem e a otimização para um secador tipo túnel com configuração contracorrente para a secagem de uvas e groselhas. O modelo com equações de balanço de massa e energia para o ar e para o produto na bandeja foi aplicado a cada carrinho separadamente e também para o túnel. As variáveis de decisão foram o número ótimo de carrinho e a umidade do ar de secagem, bem como o número total de secadores. Como resultado obtêm-se um secador com 10 carrinhos, com umidade do ar controlada e igual a 0,081kg/kgbs, e o ciclo correspondente entre a saída de um carrinho e entrada de outro é de 4h.

Cáceres-Huambo (2002) apresentou a simulação e otimização de um secador industrial de tipo túnel de configuração contracorrente e concorrente com quatro carrinhos e 10 bandejas em cada para a secagem de uva Isabel. O modelo utilizado foi o mesmo apresentado por Kiranoudis *et al.* (1997), desenvolvido a partir dos balanços simultâneos de calor e massa para a fase sólida e gasosa, tanto para as bandejas (carrinhos) quanto para o túnel. A simulação e a otimização foram realizadas em FORTRAN 90. A otimização teve como restrição a qualidade do produto medida pela degradação do ácido ascórbico durante o processo de secagem, e teve como objetivo minimizar o consumo de energia no processo. O secador contracorrente mostrou-se mais eficiente considerando valores máximos aceitáveis de qualidade.

Na Seção 2.2 são apresentados os parâmetros gerais de caracterização da secagem: umidade, atividade da água e cinética de secagem.

2.2. Parâmetros de caracterização da secagem

2.2.1. Conteúdo de umidade e atividade da água

A água é um dos principais componentes da maioria dos alimentos. Ela atua como solvente para reações químicas, microbiológicas e enzimáticas. Alimentos *in natura* possuem mais de 30% de água, exemplo: leite 87,5%; carnes 47% a 79%; ovos 73,7%; frutas e vegetais 75% a 95% e cereais e leguminosas 11 a 15% (MELO FILHO E VASCONCELOS, 2011).

O conteúdo de umidade do produto é um dos importantes parâmetros do material que será submetido à secagem. Ele é representado pela proporção entre a massa de água presente no material e a massa de matéria, podendo ser expresso de duas maneiras (REZENDE, 2011):

- Base Seca (X) – Em relação à massa seca do produto (kg água/kg sólido seco).

$$X = \frac{m_a}{m_s} \quad (2.1)$$

sendo m_a a massa de água contida no sólido seco e m_s a massa do sólido seco.

- Base Úmida (U) – Em relação à massa total do produto (kg água/kg massa úmida).

$$U = \frac{m_a}{(m_s + m_a)} \quad (2.2)$$

É a atividade de água que fornece informações sobre: crescimento microbiano, migração da água, estabilidade química e bioquímica, propriedades físicas e vida útil. Portanto, quando nos referimos à conservação dos alimentos, a atividade da água é a melhor medida quando comparada ao teor de umidade.

Na Tabela 2.1, são apresentados os limites mínimos da atividade de água a partir dos quais ocorre a proliferação de microrganismos em alimentos.

Tabela 2.1 – Tipos de microrganismos e limites de atividade de água para o crescimento (MELO FILHO E VASCONCELOS, 2011)

| Microrganismos | a_w mínima |
|-----------------------|--------------------------------|
| Bactérias | 0,91 |
| Leveduras | 0,88 |
| Fungos | 0,80 |
| Bactérias halófilas | 0,75 |
| Leveduras osmófilas | 0,60 |

Com a diminuição da atividade da água, aumenta-se a estabilidade e segurança microbiológica dos alimentos. Um dos métodos mais eficientes para reduzir a atividade de água é a desidratação do alimento. Os valores de atividade de água variam de quase zero para alimentos completamente desidratados até valores próximos de um (0,95), característica de alimentos frescos, vegetais, carnes, peixes e leite, nos quais a água é facilmente encontrada (LEWIS, 1996).

2.2.2. Umidade de Equilíbrio

A umidade de equilíbrio (X_e) é o mínimo de umidade que um material apresentará quando ocorrer equilíbrio entre as pressões de vapor de água no material e no ambiente, sendo dependente da temperatura e umidade relativa do ar circundante (BARROZO, 1995).

As condições do ar na secagem com ar ambiente não são constantes, o que torna a determinação das isotermas de equilíbrio indispensável à avaliação da interação do sólido com o vapor d'água presente no ar de secagem (LEHN *et al.*, 2004).

O estudo da atividade de água pode ser feito através das isotermas de sorção. Uma isoterma é uma curva que descreve, em uma umidade específica, a relação de equilíbrio de uma quantidade de água sorvida por componentes do material biológico e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura. Esta relação depende da composição química dos alimentos (ALMEIDA, 2013b).

A temperatura constante, a relação entre o conteúdo de umidade total sobre uma gama de valores de atividade de água correspondente, produz uma isoterma de sorção de umidade, expressa graficamente. Brunauer *et al.* (1940) classificou o comportamento das isotermas em cinco diferentes tipos. Tipo I é a isoterma Langmuir e o tipo II é chamado sigmoide ou *S-shaped*. Os outros três tipos não apresentam nenhum nome especial. Os cinco tipos característicos de isotermas podem ser observados na Figura 2.9.

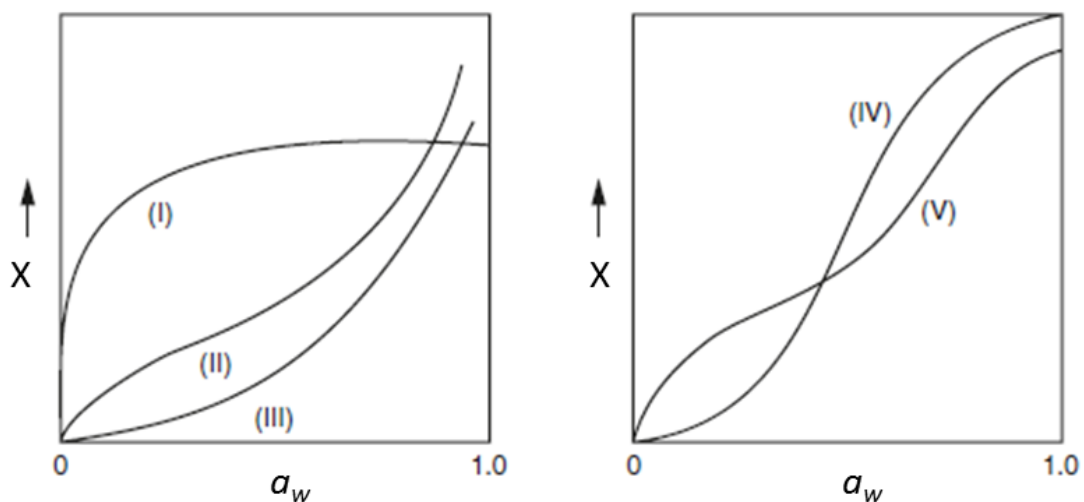


Figura 2.9 – Os cinco tipos de isotermas (RAO E RIZVI, 1996).

Para se determinar a umidade de equilíbrio há duas formas mais utilizadas: o método dinâmico e o estático. A diferença entre os métodos se dá pelo fato de haver movimentação do ar ou do material até que o equilíbrio seja atingido no método dinâmico. Já no método estático o equilíbrio se dá sem movimentação do ar ou da amostra do material (CORRÊA *et al.*, 1998).

No método dinâmico uma quantidade do material que se deseja levantar a isoterma da umidade de equilíbrio, com umidade inicial já determinada, entra em equilíbrio com o ar através da recirculação de ar em uma unidade em temperatura constante. A umidade relativa do ar recirculante é monitorada até que ela se torna constante, momento em que se considera que houve o equilíbrio e a umidade apresentada pelo sólido é a chamada umidade de equilíbrio. Então, pode-se medir novamente a umidade da amostra (MUJUMDAR, 2006).

No método estático, a amostra atinge o equilíbrio com ar estático que circunda a mesma. A atmosfera de umidade relativa constante é obtida através soluções ácidas ou soluções salinas saturadas, as quais conferem uma umidade relativa característica. Geralmente, há uma preferência pelas soluções salinas devido à segurança para o manuseio. Este método tem como vantagem a maior facilidade de se obter condições termodinâmicas constantes e utiliza aparatos semelhantes ao ilustrado na Figura 2.10 (BARROZO, 1995; MAJUMDAR, 2006).

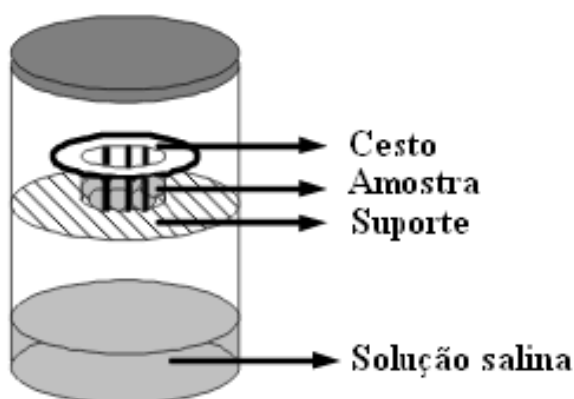


Figura 2.10 – Representação de potes para teste estático de umidade de equilíbrio (NOGUEIRA, 2016)

Diversos modelos para descrever o comportamento das isotermas de sorção de umidade podem ser encontrados na literatura. Suas equações são funções de constantes que podem ser encontrados para cada tipo de alimento (GABAS, 1998).

Um determinado modelo de isoterma pode ser considerado mais adequado do que outro principalmente quando descreve com maior precisão o fenômeno de adsorção ou

dessorção para uma ampla faixa de atividade de água. Na Tabela 2.2 são apresentadas equações que descrevem o comportamento das curvas das isotermas de equilíbrio.

Tabela 2.2 – Modelo de isotermas de equilíbrio

| Modelo | Equação | |
|----------------------|---|-------|
| GAB | $X_e = \frac{X_m c_r k_r a_w}{(1 - k_r a_w)(1 - k_r a_w + c_r k_r a_w)}$ | (2.3) |
| Henderson | $X_e = m \left[\frac{1}{T} \ln \left(\frac{1}{1 - a_w} \right) \right]^n$ | (2.4) |
| Halsey Modificada | $X_e = \left(\frac{k}{\ln(m/a_w)} \right)^{1/n}$ | (2.5) |
| Oswin | $X_e = m \left(\frac{a_w}{1 - a_w} \right)^n$ | (2.6) |
| Henderson Modificada | $X_e = \left[\frac{-\ln(1 - a_w)}{m(T + n)} \right]^{1/k}$ | (2.7) |

O modelo GAB (Guggenheim-Anderson-deBoer) é um modelo de três parâmetros, fisicamente significativos, que tem sido sugerido como modelo matemático mais versátil para a sorção de alimentos (RAO E RIZVI, 1996). As vantagens encontradas para esta equação são: viabilidade de conhecimentos teóricos, a descrição da isoterma de equilíbrio abrangendo uma faixa de atividade de água entre 0 e 0,9, forma matemática simples com parâmetros que possuem significado físico e a capacidade de descrever alguns efeitos da temperatura (GABAS, 1998).

A equação de Halsey Modificada (1978) foi desenvolvida supondo-se que a condensação ocorre em multicamadas, assumindo que o potencial de energia da molécula varia inversamente com a distância radial da superfície (RAO E RIZVI, 1996).

O modelo de Henderson pode ser aplicado para diferentes tipos de alimentos, mas quando comparado aos resultados obtidos pela equação de Halsey modificada sua aplicação torna-se menos versátil. Já a equação de Oswin, é um modelo baseado na série de Pearson para curvas sigmodais aplicadas à isotermas do tipo II. Luikov (1975) aplica a equação de Oswin para estudar as isotermas de vários alimentos e biomateriais (RAO E RIZVI, 1996).

2.2.3. Cinética de Secagem

A fim de desenvolver projetos de novos secadores e otimização das operações de secagem é necessário conhecer a cinética de secagem de cada material (NOGUEIRA, 2016). A cinética de secagem pode ser definida como a rapidez com que o material perde umidade quando submetido à uma certa temperatura e velocidade do ar. Ela é controlada pelas características da matriz deste material e pelas variáveis: temperatura, velocidade do ar e umidade relativa do ar.

A cinética de secagem de um determinado material pode ocorrer em dois ou mais períodos distintos. A variação da umidade e sua temperatura do produto com o tempo durante um processo de secagem típico é mostrada na Figura 2.11 (CELESTINO, 2010).

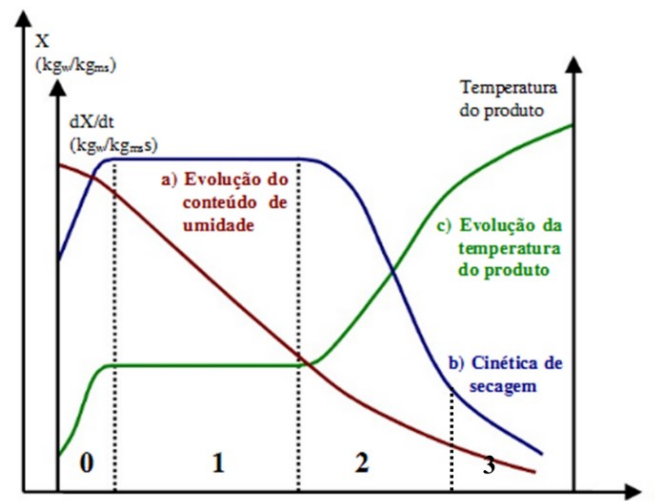


Figura 2.11 – Comportamento típico da curva de umidade, cinética de secagem e temperatura do produto durante a secagem (PARK *et al.*, 2014)

A região indicada por (0) é o período inicial ou transitório e representa a primeira fase da secagem que ocorre à uma taxa constante. Este período pode ser observado em condições onde a resistência interna ao transporte de umidade é muito menor do que a resistência externa de remoção do vapor d'água da superfície. É de curta duração e há variação na temperatura do sólido até que se atinja o equilíbrio térmico, ou seja, a temperatura atinge um valor constante e igual à temperatura de bulbo úmido do ar, enquanto a água livre estiver sendo evaporada. Ele corresponde ao período em que o alimento se adapta às condições de secagem (BARROZO, 1995; PARK *et al.*, 2014).

A região (1) é o período de taxa de secagem constante. Nesta fase é formado um filme líquido contínuo de umidade que envolve a superfície do sólido, a qual está saturada. À medida que a água é retirada da superfície do sólido, ocorre a migração da água existente nos interstícios da matéria sólida de uma forma rápida, mantendo a existência do filme constante. Esse mecanismo funciona como se não existisse sólido, ou seja, a água do alimento não tem nenhuma resistência para sair dele. A duração desse período varia de acordo com a porosidade do material: curto para sólidos não porosos e mais longos para materiais com poros, portanto, esse período é mais pronunciado em materiais com umidade elevada (PARK *et al.*, 2014).

A região (2) é o primeiro período de taxa decrescente. Nele a umidade torna-se mais escassa no material e os seus poros não apresentam um fluxo capaz de suprir a evaporação do filme externo, ou seja, a superfície do material vai se tornando pobre em líquido, caracterizando um aumento na resistência interna. Dessa forma, a região (3) corresponde ao fim do período de secagem constante e a umidade nesse ponto é conhecida como umidade crítica. Como há cada vez menos líquido na superfície do material, ou seja, sua superfície está cada vez mais seca, o sólido pode apresentar rachaduras em sua superfície (PARK *et al.*, 2014).

Através das curvas do teor de umidade e da taxa de secagem os materiais podem ser classificados como higroscópicos ou não higroscópicos (hidrofóbicos). Os materiais higroscópicos apresentam afinidade pela água e a possuem como parte de sua estrutura ou retida no interior de seus poros. Nesses materiais as curvas de secagem apresentam como características um período de taxa constante muito curto, um período de taxa decrescente reduzido e valores elevados de umidade de equilíbrio (PARK *et al.*, 2014).

2.2.4. Modelos de cinética de secagem

Na literatura, podem-se encontrar modelos matemáticos utilizados para representar a cinética de secagem que são classificados em três classes: empíricos, semi-empíricos e teóricos.

Os modelos empíricos trazem como vantagem sobre os modelos teóricos um bom ajuste dos dados para uma modelagem matemática pouco complexa e uma completa flexibilidade da abordagem, mas apresentam como desvantagem o fato de não apresentar credibilidade fora da faixa medida, não se basear em princípios físicos fundamentais e ser utilizados apenas em problemas bem particulares (BARROZO, 1995; BORTOLOTTI, 2012; NOGUEIRA, 2016).

Os modelos semi-empíricos apresentam como vantagem sobre os modelos empíricos o fato de serem mais fundamentados em teoria, a dependência que a secagem apresenta pela

temperatura, pressão e umidade relativa pode ser incorporada nas condições de contorno e possuem solução analítica em alguns casos. Mas apresentam como desvantagem o fato de serem ruins para dados de materiais mais espessos e de apresentarem muitas considerações teóricas que podem ser questionáveis (BARROZO, 1995).

Os modelos teóricos apresentam como vantagem o fato de serem mais próximos dos princípios teóricos, que os modelos empíricos ou semi-empíricos, de terem mais credibilidade para extrapolação e de terem melhor reconhecimento das inter-relações entre as variáveis, mas apresentam como desvantagem uma matemática muito complexa, parâmetros desconhecidos e um maior tempo de desenvolvimento, necessitando de computadores velozes e programas sofisticados (NOGUEIRA, 2016).

Devido a diversidade de mecanismos envolvidos na transferência de massa, alguns pesquisadores procuram propor equações semi-empíricas para prever a cinética de secagem. Esses modelos são fundamentados em fenômenos teóricos derivados do modelo difusivo. Entretanto não refletem toda a complexidade do processo e por isso, geralmente, apresentam uma maior adequação aos dados experimentais (NOGUEIRA, 2016).

Na Tabela 2.3 são apresentados alguns dos modelos mais comuns encontrados na literatura.

Tabela 2.3 – Modelos matemáticos para a cinética de secagem

| Modelo | Equação | Referência |
|-------------------|---|---------------------------------------|
| Newton | $X_{ad} = \exp(-Kt)$ | (2.8) Lewis (1921) |
| Page | $X_{ad} = \exp(-Kt^n)$ | (2.9) Page (1949) |
| Henderson e Pabis | $X_{ad} = a \exp(-Kt)$ | (2.10) Henderson e Pabis (1961) |
| Overhults | $X_{ad} = \exp(-(Kt)^n)$ | (2.11) Overhults <i>et al.</i> (1973) |
| Verna | $X_{ad} = a \exp(-Kt) + (1 - a) \exp(-K_1 t)$ | (2.12) Johann <i>et al.</i> (2016) |
| Dois termos | $X_{ad} = a \exp(-K_0 t) + b \exp(-K_1 t)$ | (2.13) Henderson (1974) |

Nas quais:

$$X_{ad} = \frac{X - X_e}{X_{in} - X_e} \quad (2.14)$$

sendo:

X = umidade, kgH₂O/kgss

X_e = umidade de equilíbrio, kgH₂O/kgss

X_{in} = umidade inicial, kgH₂O/kgss

O parâmetro K , apresentado nestas equações, é conhecido como constante de secagem que são oriundas da equação do modelo difusivo, é comum encontrar a seguinte relação de K com a difusividade efetiva (BARROZO,1995; NOGUEIRA, 2016):

$$K = \frac{D_{ef}\pi^2}{R^2} \quad (2.15)$$

na qual:

K = constante de secagem, s⁻¹

D_{ef} = difusividade efetiva, m².s⁻¹

R = raio, m

A utilização das equações empíricas frequentemente fornece bons resultados na previsão do comportamento de secagem de alimentos. Entretanto, os parâmetros destas equações têm validade restrita à faixa de condições experimentais em que foram estimados.

Para saber qual modelo se ajusta bem aos dados experimentais, testes estatísticos devem ser realizados e avaliar alguns parâmetros obtidos por esses testes, tais como: R^2 e variância de uma amostra.

Para aumentar a taxa de secagem de uva, algumas barreiras físicas presentes na uva devem ser superadas. Como é o caso da casca da uva que possui uma fina camada de cera que previne contra a desidratação e deterioração da textura do fruto, além de dificultar o ataque de microrganismos. Essa camada cerosa pode ser rompida com o auxílio de pré-tratamentos realizados antes da secagem, apresentados na sequência.

2.2.5. Análise sensorial

A Análise Sensorial foi definida como disciplina científica em 1975 pelo IFT (*Institute of Food Technology*). Ela pode ser entendida como a disciplina que interpreta, evoca, avalia e mede reações às características de um produto, após estímulos ao ser humano em relação à

visão, ao tato, ao odor e ao sabor e como esses estímulos são percebidos pelos órgãos do sentido (STONE E SIDEL, 1992) e os métodos experimentais e estatísticos utilizados nessa análise são muito similares aos utilizados em experiências psicológicas (ALMEIDA, 2013a).

As informações obtidas através da avaliação sensorial de um produto são utilizadas por empresa como suporte técnico e controle de qualidade, bem como para a industrialização e *marketing* (DUTCOSKY, 2011). De acordo com este autor, há muitas aplicações da análise sensorial na indústria de alimentos e nas instituições de pesquisa, como o controle das etapas de desenvolvimento de um novo produto; avaliação do efeito das alterações nas matérias-primas ou no processamento tecnológico sobre o produto final; redução de custos; controle de efeito da embalagem sobre os produtos acabados; controle de qualidade e estabilidade durante o armazenamento (vida de prateleira).

Assim, os testes sensoriais possuem importantes vantagens, como: ser capaz de mensurar quanto julgadores gostam ou desgostam de um determinado produto, identificar a presença ou ausência de diferenças sensoriais perceptíveis, definir características sensoriais importantes de um produto e ser capaz de detectar particularidades que não podem ser detectadas por procedimentos analíticos (MUÑOZ *et al.*, 1993).

Para alcançar o objetivo específico de cada análise, são elaborados métodos de avaliação diferenciados, visando à obtenção de respostas mais adequadas ao perfil pesquisado do produto. Esses métodos apresentam características que se moldam com o objetivo da análise. O resultado que deve ser expresso de forma específica conforme o teste aplicado estudado estatisticamente concluindo assim a viabilidade do produto (TEIXEIRA, 2009).

O teste de aceitação é um teste afetivo, e em geral, são utilizados quando se necessita conhecer o “status afetivo” dos consumidores com relação ao (s) produto (s). Desta forma, se utiliza das escalas hedônicas, que são aquelas que expressam o gostar ou desgostar. As melhores escalas são as que apresentam igual número de categorias positivas e negativas (BRASIL, 2005).

O objetivo deste teste é avaliar o grau com que consumidores gostam ou desgostam de um produto. Então podemos definir a aceitabilidade como a expressão do grau de gostar; uma experiência caracterizada por uma atitude positiva e pela utilização atual do produto (hábito de comprar ou consumir um alimento) (TEIXEIRA, 2009).

O grupo de pessoas para participar dos testes de aceitação deve ser selecionado como amostragem representativa de uma população, no caso o mercado consumidor estudado. Esse grupo deve ser composto por consumidores ou consumidores em potencial do produto a ser testado, uma vez que os bens de consumo e serviços são direcionados para atingir populações

alvo, mercados selecionados ou segmentados da população cuidadosamente selecionados (DUTCOSKY, 2011).

Nas provas de aceitação ou afinidade os provadores classificam as amostras em relação à preferência que sente por ela ou ao seu nível de satisfação. Estas provas podem se distinguir em provas de preferência ou em provas de medição do grau de satisfação (hedônicas, verbais ou gráficas). Normalmente as provas devem ser feitas em ambientes mais aproximados da realidade, mas em alguns casos podem ser realizadas em laboratório com condições mais controladas (ALMEIDA, 2013a).

No teste Check-all-that-apply (CATA), são utilizados testes descritivos, onde é necessário o desenvolvimento de metodologias rápidas e que levem em consideração a opinião de quem vai consumir o produto. Assim, os consumidores são submetidos a uma lista de palavras ou frases ou atributos sensoriais, que devem ser selecionados de acordo com o mais apropriado ao produto analisado.

Freitas *et al.* (2013) e Souza *et al.* (2015) fizeram a análise sensorial para oito tipos de uvas desenvolvidas pela EMBRAPA. A análise sensorial foi realizada com 75 participantes de ambos os sexos com idades entre 18 e 60 anos. A ficha de avaliação foi composta por 26 descritores sendo eles: cor típica, cor atípica, pequena, grande, aparência boa, aparência ruim, aroma característico, aroma ruim, aroma doce, aroma refrescante, aroma alcoólico, aroma fermentado, deliciosa, saborosa, sabor ruim, sabor característico, sabor fermentado, sabor alcoólico, suculenta, ressecada, macia, dura, doce, ácida, amarga e adstringente.

O teste foi realizado por escala hedônica híbrida e como resultado para o teste de aceitação a cultivar *BRS Clara* obteve a maior média (6,6), as cultivares *BRS Linda*, *BRS Morena*, *BRS Vitória* e *Seleções 42, 41 e 36* obtiveram médias que variam de 5,8 a 5,4 e não foram diferentes estaticamente. Já a *Seleção 39* obteve a menor média de aceitação e seus resultados foram diferentes estatisticamente de outros materiais. Assim, a *BRS Clara*, por obter maior número de aceitação é mais recomendada para a produção de uvas-passas, e foi concluído que o secador utilizado é suficiente para garantir a qualidade final dos produtos.

2.3. Técnicas de pré-processamento de uvas para a secagem

A casca da uva fresca é coberta por uma fina camada de cera. A camada cerosa é uma barreira natural contra a deterioração da textura e desidratação precoce das bagas de uva, controlando a difusão da umidade através da casca. Essa barreira da parte externa das uvas é um problema para obtenção de produtos desidratados. Isto posto, observa-se que um pré-

tratamento para remoção ou redução da barreira se faz necessário em uvas antes do processo de secagem (GABAS, 1998; TELIS *et al.*, 2006).

Essa camada de cera é composta por ésteres de ácidos graxos de alta massa molar e álcoois, hidrocarbonetos, ácidos graxos livres, álcoois livres, cetonas e aldeídos, formando, assim, uma estrutura polar que ao ser mantida em contato com uma solução básica, terá sua estrutura modificada, tornando-se apolar devido à reação de saponificação que ocorre (GABAS, 1998).

O pré-tratamento comumente utilizado é um processo químico que consiste em mergulhar as frutas em emulsões alcalinas com óleo com o objetivo de remover a cera presente na casca da uva e aumentar a taxa de secagem. Após o tratamento observou-se que o tempo de secagem é diminuído em quatro vezes (GABAS, 1998).

Na literatura, o primeiro pré-tratamento consistia de uma mistura de azeite de oliva com cinzas de madeira e posteriormente o mesmo foi substituído por uma emulsão constituída de 2,5% de carbonato de potássio e 1,5 a 2% de óleo de uva, isto é, óleo em solução alcalinas conhecida como “dipping oils”. Esta composição, provavelmente foi encontrada por tentativa e erro, bem como a prática utilizando o carbonato de potássio. A fase oleosa é formada por ésteres etílicos de ácidos graxos saturados, ésteres de ácido oleico livre, sendo o éster etílico de ácido oleico um dos componentes mais ativos. Os componentes ativos dessa emulsão neutralizam os componentes da camada cerosa da uva através da reação de saponificação (GABAS, 1998; TELIS *et al.*, 2006).

Gabas (1998) em seu estudo sobre a secagem de uvas Itália utilizou uma emulsão de oleato de etila, como agente ático, nas concentrações de 0, 1, 2 e 3% com carbonato de cálcio com concentração fixa de 2%. As uvas foram imersas por 30s na emulsão mantida a 50°C. Assim, foi concluído que, para níveis industriais, o pré-tratamento químico com oleato é mais efetivo do que a secagem em altas temperaturas.

Telis *et al.* (2006) utilizou o pré-tratamento realizado com carbonato de potássio nas concentrações de 2, 4 e 6% e azeite de oliva nas seguintes concentrações 0,5, 1,5 e 2,5%. Constatou-se que a concentração da emulsão mais efetiva foi a de 6% de carbonato de potássio com 0,5% de azeite de oliva. O pré-tratamento consistiu na imersão por 2 min na emulsão a 50°C.

Após a escolha do secador ideal, do conhecimento geral da secagem e da escolha do melhor pré-tratamento para frutas, observa-se que a qualidade final do produto e o bom funcionamento dos equipamentos de secagem estão correlacionados às características do fluido de secagem, como temperatura e umidade. E para saber qual é a melhor condição operacional

durante a secagem bem como os perfis de umidade e temperatura, modelos matemáticos são utilizados, os quais são apresentados na seção 2.4.

2.4. Transferência simultânea de calor e massa – Modelagem matemática da secagem

Quando um sólido é submetido ao processo de secagem ocorrem dois fenômenos simultaneamente (Park *et al.*, 2014):

- Transferência de calor entre o material e o ambiente para remover a umidade superficial que depende de condições externas tais como: temperatura e umidade do ar, fluxo e direção do ar, superfície de contato do sólido e pressão;
- Transferência de massa (umidade) do interior do material para sua superfície, local onde se dá a evaporação devido ao primeiro processo. A transferência de massa depende da natureza física do sólido, de sua temperatura e do conteúdo de umidade.

As formas mais comuns de transferência de calor, que podem ocorrer simultaneamente, são:

- Por convecção de um gás quente em contato com o material;
- Condução de uma superfície quente, sólida em contato com o material;
- Radiação a partir de um gás quente ou superfície.

Os mecanismos de transferência de massa no interior dos sólidos indicam a dificuldade de secagem nos materiais. A água deve ser transportada do interior do sólido até a superfície e os mecanismos mais importantes que ocorrem no interior do sólido são (Park *et al.*, 2014):

- Difusão líquida, devido ao gradiente de concentração;
- Difusão de vapor, devido ao gradiente da pressão de vapor ocasionado pelo gradiente de temperatura;
- Escoamento de líquido e vapor, devido à diferença de pressão externa, concentração, capilaridade e alta temperatura. Também influenciam o conteúdo inicial de umidade, o conteúdo final de umidade que o material pode atingir (umidade de equilíbrio), como

a água se encontra na estrutura do sólido e o modo pelo qual é feito seu transporte até a superfície do sólido.

Quando a convecção de um gás quente é usada e a umidade está presente na superfície do sólido ou migra rapidamente do interior para a superfície do sólido, a taxa de evaporação é independente das propriedades do sólido e é governada pela taxa de transferência de calor convectivo do gás para a superfície (Barrozo, 1995; Park *et al.*, 2014).

Na literatura podem ser encontrados vários modelos matemáticos para representar a transferência de calor e de massa durante a secagem de alimentos. Esses modelos podem ser divididos em três tipos (BARROZO, 1995; SILVA, 2010):

- Modelos empíricos e semi-empíricos;
- Modelos difusivos.

Os modelos empíricos consistem em uma correlação entre o teor de umidade e o tempo de secagem enquanto os modelos semi-empíricos têm como base a hipótese da validade da lei de Newton do resfriamento, na qual é assumido que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de umidade do material e seu respectivo teor de umidade de equilíbrio, para as condições de secagem específicas.

Os modelos difusivos baseiam-se na difusão de líquido e/ou vapor no interior do produto. As taxas de transferência de massa podem ser descritas como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem e levam em consideração as resistências ao fluxo de massa externo e interno.

Um exemplo de modelo difusivo é o modelo baseado na termodinâmica dos processos irreversíveis, mais conhecido como modelo de Luikov, que assume a existência de equilíbrio termodinâmico local no interior do produto. Como esse modelo considera a transferência simultânea de calor e massa, torna-se mais próximo da realidade do processo de secagem. Dessa forma, ele é mais apropriado para ser aplicado no estudo de secagem de alimentos e seu equacionamento é mostrado no subitem 2.4.1.

2.4.1. Modelo de Luikov

Na literatura, o modelo matemático de Luikov para a secagem de alimentos é recorrente. Esse modelo descreve a relação entre a transferência de massa e calor em um corpo

poroso e foi proposto por Luikov (1975) usando o princípio da termodinâmica irreversível que leva em consideração o efeito cruzado entre as forças motrizes. Essa relação pode ser descrita por um sistema acoplado de equações diferenciais parciais (LUIKOV, 1975). O autor propôs uma relação direta entre a transferência de massa e de calor, desde que haja transferência de entropia juntamente com os fenômenos de transporte. Essa inter-relação se torna mais evidente quando líquido evapora do interior da matriz porosa (IRUDAYARAJ e WU, 1996; CINAR, 2002).

O modelo de Luikov, representado pelas Equações (2.16) e (2.17), é baseado nas suposições de que o transporte de ar e de água é simultâneo, que não ocorrem encolhimento ou deformações e que as propriedades em todas as direções são constantes (LUIKOV, 1975; GUIGON, 1995; CINAR, 2002; SILVA, 2010):

$$\rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot q + \sum_{i=1}^2 h_i I_i \quad (2.16)$$

$$\rho_s \frac{\partial X_i}{\partial t} = -\nabla \cdot J_i + I_i \quad i = 1, 2 \quad (2.17)$$

no qual:

c = calor específico à pressão constante do meio definido pela equação (2.18).

$$c = c_s + \sum_{i=1}^2 c_i X_i \quad (2.18)$$

c_s = calor específico à pressão constante do meio seco, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

c_i = calor específico à pressão constante, para água no estado de vapor ($i=1$) e no estado líquido ($i=2$), $J.kg^{-1}.K^{-1}$

I_i = fonte ou sumidouro de massa devido à transição de fase, $kg.m^{-3}$

h_i = entalpia específica da substância, $J.kg^{-1}.s^{-1}$

J_i = vetor fluxo de massa, $kg m^{-2}.s^{-1}$

q = vetor fluxo de calor, $W. m^{-2}$

T = temperatura, $^{\circ}C$

t = tempo, s

X_1 = umidade na forma de vapor

X_2 = umidade na forma líquida

ρ_s = densidade do sólido seco, kg.m^{-3}

Os subscritos de 1 e 2 são utilizados para identificar os componentes de água no estado vapor e de água no estado líquido, respectivamente.

O sistema de equações de Luikov descrito pelas equações (2.16), (2.17) e (2.18) levam em consideração as seguintes hipóteses:

- As temperaturas do líquido, do vapor e do meio seco são iguais em um elemento diferencial volumétrico;
- As mudanças de fases correspondem à transição de líquido em vapor e vice-versa, de modo que, $I_2 = -I_1$;
- A massa de vapor é desprezível quando comparada com a massa de líquido. Portanto o conteúdo de massa líquido pode ser considerado igual ao teor de umidade total, isto é, $X = X_2$;
- As reações químicas associadas com a perda de água não são levadas em consideração;
- As variações na porosidade e no volume do meio devido à variação no teor de umidade são consideradas desprezíveis.

O modelo de Luikov desconsidera os efeitos convectivos dentro do meio poroso, dessa forma, o vetor fluxo de calor pode ser descrito em termos da equação de Fourier, isto é,

$$q = -\lambda \nabla T \quad (2.19)$$

sendo λ a condutividade térmica total ou efetiva do meio, que representa a transferência de calor através da estrutura do meio poroso.

O termo que representa a fonte de calor ou sumidouro é dependente da mudança de fase da água contida dentro do material. Dessa forma, o somatório das fontes fica:

$$h_1 I_1 + h_2 I_2 = (h_1 - h_2) I_1 = \epsilon r \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.20)$$

na qual

r = calor de vaporização da água líquida

Os termos fonte de massa de vapor (I_1) ou sumidouro de massa líquida (I_2) em processos transientes podem ser escritos como (LUIKOV, 1975):

$$I_1 = -I_2 = \varepsilon \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.21)$$

onde ε é o critério de mudança de fase. Se $\varepsilon = 0$, todo o teor de umidade que contribui no termo de geração está no líquido. Se $\varepsilon = 1$, todo o teor de umidade transportado está no estado de vapor.

Para meios capilares porosos, Luikov (1975) demonstrou que o fluxo de massa nos espaços vazios da matriz porosa poderia ser descrito em termos do gradiente do teor de umidade e do gradiente de temperatura do meio. Dessa forma, tem-se:

$$J = J_1 + J_2 = \rho_s D_e \nabla X + \rho_s D_e \delta \nabla T \quad (2.22)$$

Substituindo as Equações (2.19) e (2.20) na Equação (2.16) e a Equação (2.22) na equação (2.17), obtém-se o seguinte sistema de equações diferenciais parciais acopladas que descreve a transferência de calor e do teor de umidade em meios porosos capilares dado pelas Equações (2.23) e (2.24).

$$\rho_s c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \varepsilon r \rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_e \nabla X + D_e \delta \nabla T) \quad (2.24)$$

Esse sistema é válido para processos de secagem que não sejam rápidos e intensos ($T \leq 100^\circ\text{C}$). Caso contrário, o gradiente de pressão no meio torna-se significativo, surgindo uma terceira equação no sistema formado pelas equações (2.23) e (2.24). Isto se deve ao fato que durante um período de aquecimento interno do material, o gradiente de pressão cresce por conta da evaporação do líquido. O gradiente de pressão no meio causa o escoamento de fluidos nos poros (LUIKOV, 1975 *apud* SILVA, 2010).

Guigon (1995) obteve a solução exata do modelo de Luikov, resolvendo o problema de autovalor associado aplicando-se a Técnica da Transformada Integral Generalizada. A

solução obtida forneceu resultados de alta qualidade que podem ser utilizados como *benchmark* e que podem ser utilizados para modos de comparação com resultados obtidos de outras maneiras.

O modelo de Luikov foi empregado por Irudayaraj e Wu (1999) para modelar a transferência de calor e massa durante o processo de secagem para um sistema alimentar à base de amido. Os autores utilizaram o método dos elementos finitos para resolver o sistema de equações.

As equações propostas por Luikov foram empregadas por Cinar (2002) para modelar o fenômeno de transferência de calor e massa em frutas descongeladas e em frutas maceradas durante o processo de secagem. O autor utilizou o método dos elementos finitos para resolver o sistema de equações acopladas. Os resultados obtidos pelo modelo de Luikov foram comparados com os obtidos pelo modelo difusivo. Ambos modelos foram satisfatórios para prever as curvas de secagem, mas o modelo de Luikov se mostrou superior por prever melhor os dados experimentais.

Silva (2010) desenvolveu dois modelos matemáticos, na configuração de placa infinita, com o objetivo de estudar a obtenção de parâmetros para o processo de secagem de bananas. O primeiro modelo é baseado na Lei de Fick e resolvido através da Técnica da Transformada Integral Clássica (CITT). O segundo modelo é o sistema desenvolvido por Luikov (1966) que foi resolvido pelo método da integral generalizada (GITT). Os resultados dos dois modelos foram comparados e constatou-se que os mesmos são capazes de descrever o processo de secagem em alimentos, porém o modelo baseado na Lei de Fick subestimou o teor de umidade. Como o modelo de Luikov contempla a física da secagem de maneira mais realística por considerar a transferência simultânea de calor e massa, sempre que os coeficientes de transporte estejam disponíveis, conclui-se que o modelo de Luikov é o mais apropriado.

Isto posto, pode-se dizer que o modelo de Luikov fornece aproximações melhores, mas o número de parâmetros que ele introduz dificulta a solução do sistema. E a sensibilidade dos mesmos devem ser avaliadas para obter o melhor modelo possível que descreva o sistema (CINAR, 2002; SILVA, 2010).

O modelo desenvolvido por Luikov (1975) não envolve encolhimento. Segundo Katekawa (2006) uma descrição mais eficiente do processo de secagem de frutas é atingida quando o encolhimento do material é considerado. Vagenas *et al.* (1990b) e Vagenas e Marinou-Kouris (1991) utilizaram um modelo baseado nas equações de Luikov (1975) para descrever a secagem abordando o encolhimento da amostra. O fenômeno do encolhimento e os modelos que o representam são apresentados na sequência.

2.5. O encolhimento de materiais submetidos à secagem

Um fenômeno importante que ocorre durante a secagem de alimentos é a contração volumétrica do material que sofre a desidratação, ocasionando mudanças no tamanho e forma e afetando a taxa de secagem. O encolhimento pode reduzir os custos de embalagem do produto final, armazenamento e transporte (GABAS, 1998). O encolhimento pode ser caracterizado pelo coeficiente de encolhimento e pela velocidade de encolhimento.

O coeficiente de encolhimento pode ser definido de várias maneiras (RAHMAN, 2009):

- Coeficiente de encolhimento aparente: é a razão entre o volume aparente da água contida inicialmente no material pelo volume aparente total do material e pode ser expresso como:

$$\beta = \frac{V_{\alpha}}{V_{\alpha i}} \quad (2.25)$$

sendo $V_{\alpha i}$ e V_{α} os valores de volume aparente inicial e do conteúdo úmido.

- Coeficiente de encolhimento isotrópico: é o encolhimento uniforme em todas as dimensões do material. Este tipo de encolhimento pode ser observado na maioria de frutas e vegetais.
- Coeficiente de encolhimento anisotrópico: é o encolhimento não uniforme que acontece nas direções geométricas do material. Esse tipo de encolhimento é geralmente observado em peixes e mariscos, que apresentam uma significativa diferença no encolhimento na direção paralela das fibras do músculo quando comparada com o encolhimento na direção perpendicular, durante a secagem.

Alguns autores negligenciam o encolhimento considerando seus efeitos na difusividade efetiva. Quando o encolhimento é considerado, seu efeito é reconhecido somente como decréscimo nas dimensões da amostra (VAGENAS *et al.*, 1990b; GABAS, 1998).

Gabas (1998) em seu estudo sobre a secagem da uva Itália observou que existem dois fatores de ação contrária que influenciam no encolhimento: a temperatura e a taxa de secagem. Experimentos nas temperaturas 40, 50, 60, 70 e 80°C foram realizados com uma amostra de 140 uvas, das quais oito foram retiradas periodicamente do secador para determinação do

volume. Esse volume foi calculado utilizando o método do deslocamento de fluido que consiste em medir o volume pela escala de uma bureta inserida de cabeça para baixo em um recipiente onde a amostra foi colocada. A Equação (2.26) foi utilizada para obtenção do coeficiente de encolhimento realizando uma regressão linear dos valores V/V_0 versus X :

$$\frac{V}{V_0} = 1 + \beta X \quad (2.26)$$

em que:

V_0 = volume específico da amostra na umidade inicial, m^3 .

V = volume específico da amostra na umidade X , m^3 .

β = coeficiente de encolhimento, adimensional

X = umidade, $kg H_2O / kg bs.$

Reyes *et al.* (2002) estudaram a secagem de cenouras em leito fluidizado e na modelagem foi considerado o encolhimento das fatias do material. As cenouras estavam inicialmente com umidade de 15,4 $kg H_2O/kg b.s.$ e o ar de secagem a 80°C. O encolhimento foi obtido medindo o conteúdo úmido e a variação de tamanho das partículas com o tempo. A cinética de secagem foi dada pela Lei de Fick e o encolhimento calculado segundo a equação (2.27).

$$\beta = \frac{V}{V_0} = 0,045 + 0,969 \left(\frac{X}{X_0} \right) \quad (2.27)$$

em que:

V = volume da amostra, m^3

V_0 = volume da amostra no tempo inicial, m^3

X = umidade em base seca, $kg H_2O/kg b. s$

X_0 = umidade em base seca, $kg H_2O/kg b. s.$

Dada a importância do encolhimento na modelagem da secagem de produtos agrícolas, Rahman (2009) reuniu modelos para predição do coeficiente de encolhimento encontrados na literatura conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Modelos para o cálculo do encolhimento durante a secagem de diferentes materiais (RAHMAN, 2009)

| Equação | Material | |
|--|--|--------|
| $\beta = \frac{V}{V_0} = \frac{x_w + 0,8}{x_{w_0} + 0,8}$ | Não especificado Kilpatric <i>et al.</i> (1955) | (2.28) |
| $\beta = x' + y' + z'$ $x' = 0,161 + 0,816 \frac{x_w}{x_{w_0}}$ $y' = 0,022 \exp\left(\frac{0,018}{0,025 + x_w}\right)$ $z' = (0,209 - \beta_e) \left(1 - \frac{U}{x_{w_0}}\right)$ | Frutas e vegetais Lozano <i>et al.</i> (1983) | (2.29) |
| $\beta = \frac{1}{1 - \phi} \left[1 + \frac{\rho_0 X - X_0}{\rho_a (1 + X_0)} - \phi_0\right]$ | Maçã, Cenoura, Lula Serenó (2004) | (2.30) |
| $\beta = 0,2481 + 0,096X$ | Discos de Maçã Moreira <i>et al.</i> (2000) | (2.31) |
| $\beta = \frac{l}{l_0} = \left(\frac{X}{X_0}\right)^{d'}$ $d' = 0,2 - 0,45$ | Discos de abacaxi Rahman (1984) Uddin <i>et al.</i> (1990) | (2.32) |
| $\beta = \frac{1}{1 - \phi_\alpha} \left(1 - \frac{\rho_{\alpha_0}(x_{w_0} - x_w)}{\rho_\alpha(1 - x_w)}\right)$ | Alimentos Rahman (1995) | (2.33) |

na qual:

x_w = fração mássica de água

x_{w_0} = fração mássica inicial de água

β = coeficiente aparente de encolhimento

l = espessura final da amostra, m

l_0 = espessura inicial da amostra, m

X = umidade em base seca, $kg H_2O/kg b. s$

X_0 = umidade inicial em base seca, $kg H_2O/kg b. s$

V = volume da amostra, m^3

V_0 = volume inicial da amostra, m^3

ϕ = porosidade, adimensional

ρ_s = densidade do sólido, $kg.m^{-3}$

ρ_a = densidade da água, kg.m^{-3}

ρ_0 = densidade inicial, kg.m^{-3}

Rezende (2011) estudou a modelagem e simulação da secagem de frutos de café em bandejas vibradas aplicando três modelos diferentes, todos baseados na lei de Fick para a conservação de massa e na lei de Fourier para a conservação de energia, e contemplando o encolhimento do fruto durante o processo.

O Modelo 1 foi utilizado por Arrieche (2007) para a secagem de um sólido isolado (gel de agar). Esse modelo considera apenas o conteúdo de umidade do material junto com o seu encolhimento durante a secagem no intuito de analisar a influência do balanço de energia na simulação. O comportamento do encolhimento desse material se aproxima do comportamento apresentado por materiais alimentícios e sua equação dada por Sfredo (2006) é apresentada pela Equação (2.34).

$$d_{fc} = 1,168 \cdot 10^{-2} + 0,0449 \cdot 10^{-2} \exp\left(\frac{\bar{X}}{1,1374}\right) \quad (2.34)$$

na qual:

d_{fc} = diâmetro médio da amostra para o fruto do café, m

\bar{X} = umidade média em base seca, kg/kg bs .

O Modelo 2, desenvolvido por Hussain e Dincer (2003) leva em consideração a influência da variação da temperatura na secagem, porém com propriedades físicas e encolhimento constantes. As equações de transporte de calor e massa, considerando apenas a dimensão radial de uma esfera estão apresentadas nas equações (2.35) e (2.36) respectivamente

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\alpha}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) \quad (2.35)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{D}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial X}{\partial r} \right) \quad (2.36)$$

O Modelo 3, estudado por Chemkhi *et al.* (2005) para a secagem de batatas, utiliza uma simulação na qual as propriedades físicas são variáveis com a umidade e/ou temperatura

do produto. Os autores consideraram a variação de massa e entalpia, bem como o encolhimento do material. As respectivas equações são dadas em (2.37) e (2.38)

$$\rho_s \left(\frac{\partial X}{\partial t} + w \nabla X \right) = D \nabla X \quad (2.37)$$

$$\rho_s \frac{\partial(\rho_s h)}{\partial t} = \nabla \cdot (K_s \nabla X) \quad (2.38)$$

Os resultados obtidos por cada modelo foram comparados com dados experimentais. Para a resolução dos modelos foi utilizado o método da colocação ortogonal. Com o Modelo 1, observa-se que o raio dos frutos encolheu para 0,0062 m ao final da secagem, partindo de 0,0073 m.

Além do coeficiente de encolhimento, outra forma de estudar a variação na dimensão da amostra durante a secagem é através da velocidade com que esse encolhimento ocorre (w).

Vagenas *et al.* (1990b) apresentaram uma modelagem matemática teórica baseada na abordagem de Luikov (1975) para a secagem de uvas do tipo Sultana, considerando o encolhimento da fruta. O modelo é formado por um sistema de equações diferenciais parciais unidimensionais que descrevem o processo de transferência de calor e massa simultâneo em uma amostra de geometria retangular de uvas. Foram realizados experimentos em um secador experimental de bancada que consiste de um soprador, um aquecedor e uma câmara de secagem, na qual a amostra inicialmente com 4,5 cm de altura é colocada em bandejas de 31 cm por 19 cm. O ar de secagem é aquecido e entra em contato com o material na câmara de secagem. Oito experimentos foram realizados com diferentes temperaturas iniciais para o ar de secagem e da amostra, além de diferentes umidades iniciais da amostra. Os resultados do experimento com as seguintes condições: temperatura do ar = 70 °C, velocidade do ar = 2,0 m.s⁻¹, temperatura inicial da amostra = 23,1 °C e umidade inicial = 4,54 kg H₂O/kg bs, foram comparados com os dados simulados para a validação do modelo, com boa aproximação.

Vagenas e Marinos-Kouris (1991) utilizaram a modelagem apresentada no trabalho de Vagenas *et al.* (1990b) para estudar a secagem de uvas do cultivar Sultana em um secador industrial do tipo túnel contracorrente com 10 carrinhos, que acondicionam 20 bandejas quadradas com área de 1,6 m x 1,6 m cada, com o intuito de otimizar as propriedades operacionais como temperatura e umidade do ar de secagem, além da altura ótima de uvas em cada bandeja. A temperatura do ar de secagem não pode ultrapassar 76 °C, pois em temperaturas maiores não é garantida a qualidade final do produto. A umidade de entrada inicial em que se

encontra o ar de secagem é 0,07 kg/kg H₂O no primeiro carrinho e 0,12 kg/kg H₂O nos demais, valores determinados por otimização para garantir a maior remoção de umidade sem degradar o produto. Os autores utilizam as equações de conservação de massa e de energia aplicadas às uvas acondicionadas em uma bandeja perfurada típica, associadas às equações constitutivas. A altura inicial das uvas em cada bandeja é de 0,08 m, correspondente à altura de um cacho de uva. A formulação do modelo aplicado ao produto foi baseada em três hipóteses:

1. A amostra pode ser tratada do ponto de vista macroscópico e como um sistema de uma fase;
2. Durante a secagem, o conteúdo úmido, a pressão de vapor parcial e a temperatura estão em equilíbrio termodinâmico com o material a ser seco;
3. Não há produção e nem consumo de água durante a secagem;

Com a perda de água durante a secagem, ocorre contração no volume da partícula. Essa variação, segundo os autores, é dada pela Equação (2.39), na qual β é o coeficiente de encolhimento, X é a umidade do produto em base seca, V é o volume (m³) da amostra e V_s é o volume do sólido seco (m³). A Equação (2.40) é a equação do coeficiente de encolhimento, em que α é um fator de correção, ρ_s é a densidade do sólido seco (kg/m³) e $\rho_{\text{água}}$ é a densidade da água (kg/m³).

$$\frac{V}{V_s} = 1 + \beta X \quad (2.39)$$

$$\beta = \alpha \frac{\rho_s}{\rho_{\text{água}}} = 1,543 \quad (2.40)$$

Além do coeficiente de encolhimento, os autores empregam a velocidade de encolhimento (w) na modelagem matemática, definida como a velocidade com que o sólido seco se contrai ao longo da remoção da umidade. As dimensões significativas para o modelo são a altura do cacho de uva (eixo y) e a dimensão longitudinal que é a direção do escoamento do ar de secagem (eixo z). As variáveis dependentes deste modelo são a umidade e a temperatura do produto variando nas direções y e z e a velocidade de encolhimento que é analisada na dimensão y . Na Figura 2.12, está apresentado um esquema do arranjo geométrico das uvas em uma bandeja de secagem, bem como os eixos característicos e sentido da velocidade de encolhimento.

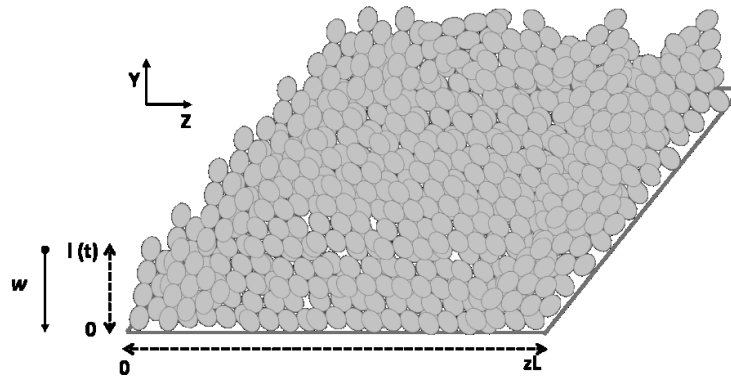


Figura 2.12 – Esquema da disposição geométrica da amostra de uvas segundo Vagenas e Marinos-Kouris (1991)

Azzouz *et al.* (2002) constataram que a maioria dos estudos sobre secagem de uva utilizam modelos difusivos para representar a influência da temperatura do ar de secagem e do conteúdo úmido inicial do produto. A difusividade mássica do modelo foi obtida pela lei de Fick, a qual representa uma variação média da umidade *versus* o tempo. Um segundo modelo matemático foi desenvolvido para a secagem convectiva de uvas Chasselas da região de Bordeaux (França) e Sultana da Tunísia, com umidade inicial de 2 kgH₂O/kg bs, com representação do encolhimento das frutas.

A Equação (2.41) mostra o balanço de massa empregado pelos autores:

$$\frac{\partial(\omega_s X)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_s \cdot D_e \cdot \nabla X) - \nabla \cdot (\omega_s \cdot X \cdot w) \quad (2.41)$$

na qual:

ω_s = concentração de sólidos secos, kg.m⁻³

ρ_s = densidade do sólido, kg.m⁻³

D_e = coeficiente de difusividade, m².s⁻¹

w = velocidade de encolhimento do sólido, m.s⁻¹

Dois modelos para a estimativa da difusividade foram avaliados, um baseado na lei de Fick e outro que leva em consideração o encolhimento do produto. Sabendo que o sólido seco encolhe na direção oposta da transferência de umidade, calcula-se a velocidade de encolhimento

em relação à diminuição da espessura da camada de uva. Os autores obtiveram uma equação linear para o coeficiente de encolhimento das frutas, mostrada pela Equação (2.42).

$$\beta = 0,79 \frac{X}{X_0} + 0,22 \quad (2.42)$$

na qual:

β = coeficiente de encolhimento, adimensional.

X = umidade (base seca) (kg/kg bs)

X_0 = conteúdo úmido inicial (base seca) (kg/kg bs)

Da Equação (2.42), pode-se observar que o coeficiente de encolhimento, que representa a variação na densidade no produto em função da umidade contida, dado por Azzouz *et al.* (2002) apresenta uma relação linear com a fração de umidade. Essa densidade foi medida experimentalmente emergindo o produto em um picnômetro com tolueno e verificando o valor deslocado pelo líquido. Com os resultados experimentais foi possível obter a relação apresentada pela Equação (2.42). Os autores concluíram que essa relação pode ser utilizada para os dois tipos de uva estudados e que representa bem o encolhimento em função da umidade.

Karim e Hawlader (2005) na modelagem da transferência de calor e massa na secagem de bananas consideraram mudanças na forma e no tamanho da amostra durante o processo de secagem através do cálculo da velocidade de encolhimento. O modelo consiste em um sistema formado por equações de balanços de massa e energia unidimensionais discretizadas por diferenças finitas. Os autores analisaram a necessidade de determinar a velocidade de encolhimento para, assim, resolver as equações de balanço, porém esse parâmetro não pode ser predito e o grau de dificuldade de encontrá-lo experimentalmente é grande. Assim, foi assumida uma distribuição linear para o modelo da velocidade de encolhimento dada pela seguinte equação:

$$w(x) = w(b) \frac{x}{b} \quad (2.43)$$

na qual:

b = metade da espessura da amostra (m)

w = velocidade de encolhimento (m/s)

x = distância até o centro da amostra (m)

A velocidade na superfície, $w(b)$, pode ser descrita pela razão da diferença entre a espessura medida no tempo atual e a espessura medida anteriormente pela variação do tempo até aquele momento de amostragem. A Equação (2.44) mostra exatamente o descrito acima.

$$w(b) = \frac{b - b(old)}{\Delta t} \quad (2.44)$$

Aprajeeta *et al.* (2015) apresentam a modelagem do transporte de calor e massa em fatias de batata, com umidade inicial de 4,5 kgH₂O/kg bs, durante a secagem convectiva com abordagem microscópica, admitindo as seguintes hipóteses simplificadoras:

- A secagem é conduzida em sistema adiabático;
- O suprimento de ar de secagem é contínuo, com velocidade uniforme;
- A transferência de massa no interior da amostra é conduzida pela difusão;
- Condição de saturação (todos os poros na amostra estão preenchidos com água);
- Transferência interna de calor é conduzida somente pela condução;
- Resistência externa aos processos de transporte foi negligenciada;
- Encolhimento na direção radial da estrutura foi contabilizada.

O modelo matemático de Aprajeeta *et al* (2015) é formado pelo sistema de equações (2.45) e (2.46).

$$(\phi) \frac{\partial C}{\partial t} + (C - C_s \rho_p) \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\nabla \cdot (D_{eff} \nabla C) \quad (2.45)$$

$$D_{eff} = \phi \tau D_f$$

$$\rho_p = \frac{\rho_b}{(1 - \phi)}$$

$$(\rho_p c)_e \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_e \nabla T) \quad (2.46)$$

$$\lambda_e = \theta_s \lambda_s + (1 - \theta_s) \lambda_L$$

$$(\rho_p c)_e = \theta_s c \rho_p + (1 - \theta_s) c_L \rho_L$$

em que:

D_{eff} = coeficiente de difusão da batata, $m^2.s^{-1}$

D_f = coeficiente de difusão livre, adimensional

c_L = calor específico do líquido, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

c = calor específico do sólido, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

λ_e = condutividade térmica no equilíbrio, $W.m^{-1}.K^{-1}$

ρ_b = densidade *bulk*, $kg.m^{-3}$

ρ_p = densidade da partícula, $kg.m^{-3}$

C = concentração de umidade, $mol.m^{-3}$

θ = fração de volume do sólido da partícula, adimensional

τ = fator de tortuosidade, adimensional

ϕ = porosidade, adimensional

A equação para o encolhimento na direção radial na amostra é indicada pela Equação (2.47), bem como a equação para a velocidade de encolhimento do sólido, dada pela Equação (2.48).

$$l(r) = A_1 + A_2 X \quad (2.47)$$

$$w = \frac{l(r)}{t} \quad (2.48)$$

na qual:

$l(r)$ = encolhimento na direção radial, m

A_1 = parâmetro, m

A_2 = parâmetro, m

X = umidade em base seca, $kgH_2O/kgbs$

w = velocidade de encolhimento, $m.s^{-1}$

t = tempo, s

Os parâmetros A_1 e A_2 devem ser definidos experimentalmente para cada tipo de material. Para o caso de batatas, $A_1 = 0,6197$ e $A_2 = 0,1381$, estimados a $62\text{ }^\circ\text{C}$. Observou-se que o encolhimento ocorre de forma linear ao longo do tempo com o decréscimo da umidade contida na amostra, a qual é mais acentuada nos primeiros períodos da secagem, pois, inicialmente, é removida a água disponível. Após a secagem, a umidade final encontrada foi de $0,266\text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$.

3. AVALIAÇÃO DE CORRELAÇÕES PARA ESTIMATIVA DE PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DE UVAS E DO AR: INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA TEMPERATURA

O conhecimento das propriedades termo-físicas do material a ser seco é de fundamental importância para a representação mais precisa da operação da secagem, sendo relevantes para a simulação e projeto de equipamentos. Por isso, com a finalidade de comparar os resultados obtidos por diversos autores, realizou-se o estudo das propriedades termo-físicas para a uva.

O estudo possibilitou a seleção das correlações mais adequadas para a estimativa das seguintes propriedades: calor específico da uva, condutividade térmica da uva, calor de vaporização da água, difusividade efetiva, atividade da água, umidade de equilíbrio, coeficiente de transferência de calor e de massa. Foram realizadas também estimativas para os números adimensionais Reynolds, Prandtl e Schmidt, necessários para o cálculo dos coeficientes de transferência de massa e de calor.

As faixas de temperatura e de umidade para o sólido utilizadas nesse estudo foram $300 \leq T(K) \leq 343$ e $0,14 \leq X(kgH_2O/kgss) \leq 4,5$, respectivamente. A temperatura do fluido estudada foi de 70°C, equivalente a 343K, visto que em temperaturas maiores a uva fica seca e desagradável ao paladar.

3.1. Estimativa do calor específico de uvas

Segundo Rao e Rizvi (1996), para uma faixa de umidade entre 84% a 90% em base úmida, o calor específico médio de frutas e vegetais varia entre 3800 e 3950 J.kg⁻¹.K⁻¹, a 298 K. Valores semelhantes são dados por ASHRAE (2006), segundo o qual a uva em geral, com uma umidade de 81,30%, possui um calor específico igual a 3710 J.kg⁻¹.K⁻¹, para uma faixa de temperatura de 273 K a 423 K.

Dada a expressiva variação tanto da umidade quanto da temperatura durante processos de secagem, serão apresentadas na sequência correlações que levam em conta a dependência do calor específico com a umidade e a temperatura.

3.1.1. Dependência com a umidade

Para determinar a correlação para o calor específico da uva ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$), foram comparados valores obtidos pelo modelo apresentado por Vagenas *et al.* (1990a) para uva Sultana dado pela equação (3.1) e valores obtidos pela equação (3.2) para alimentos ricos em água (LIMA, 2013), com faixa de umidade entre $0,14 \leq X$ ($\text{kg H}_2\text{O/kg bs}$) $\leq 4,5$.

$$c = \frac{1400 + 4182X}{1 + X} \quad 293 \leq T(\text{K}) \leq 353 \quad (3.1)$$

$$c = \frac{1673,6 + 4183,4 X}{1 + X} \quad 273 \leq T(\text{K}) \leq 293 \quad (3.2)$$

nas quais:

c = calor específico do material, $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

X = umidade em base seca do material, $\text{kg água/kg sólido seco}$

Ribeiro *et al.* (2002) obtiveram valores do calor específico para diversos alimentos através do estudo da calorimetria e para a uva *in natura* os autores encontraram $c = 3710,41 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Os autores não mencionam a faixa de temperatura estudada. Já o calor específico da uva-passa foi obtido por Cáceres-Huambo (2002) e é igual a $1400 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ para uma faixa de temperatura entre 308 K e 348 K.

Na Figura 3.1 são apresentados os valores do calor específico conforme propostos por Vagenas *et al.* (1990a) para uvas Sultana, por Lima (2013) para alimentos ricos em água e por Ribeiro *et al.* (2002) para uvas *in natura*. Estes valores são significativamente superiores ao das uvas-passas para umidade superior a $0,1 \text{ kgH}_2\text{O/kgbs}$ (CÁCERES-HUAMBO, 2002).

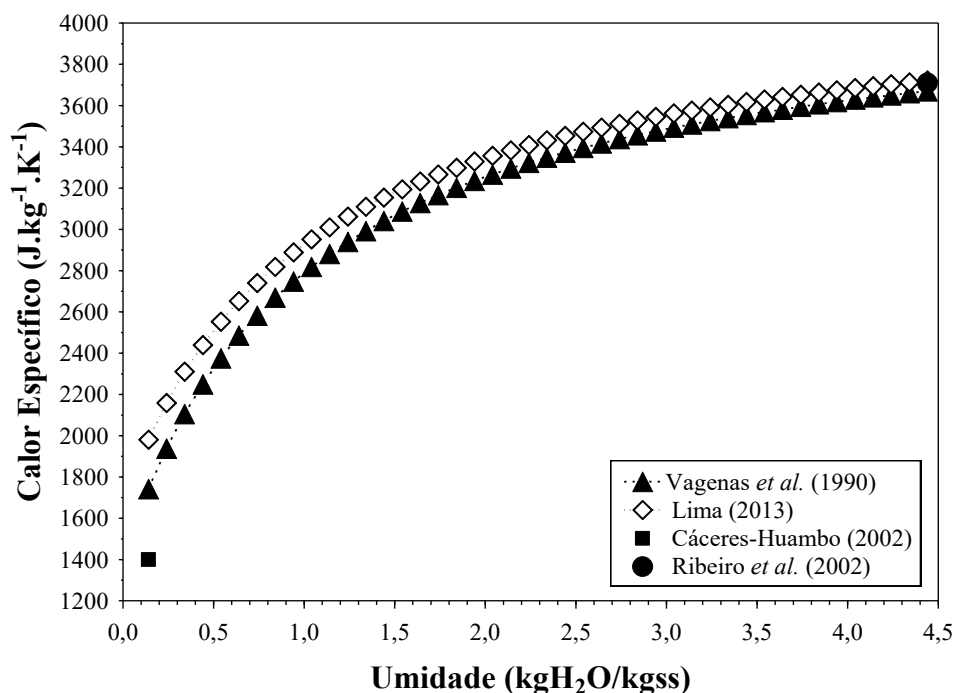


Figura 3.1 – Comportamento do calor específico com a variação da umidade em base seca para uvas Sultanas (VAGENAS *et al.*, 1990a); alimentos ricos em água (LIMA, 2013); uvas-passas do tipo Itália (CÁCERES-HUAMBO, 2002) e uva *in natura* (RIBEIRO *et al.*, 2002)

Os modelos de Vagenas *et al.* (1990a) e de Lima (2013) apresentam valores crescentes do calor específico com a umidade. O modelo de Lima (2013) resulta em valores um pouco maiores quando comparado ao de Vagenas *et al.* (1990a). Para umidade superior a 4 kg/kg b.s. ambos resultam em valor equivalente ao obtido por Ribeiro *et al.* (2002). Ressalta-se, entretanto, que o modelo de Lima (2013) é válido para uma faixa estreita de temperatura, que não alcança as temperaturas utilizadas na secagem de uvas.

3.1.2. Dependência com a temperatura

O modelo proposto por Choi e Okos (1986) e citado por ASHRAE (2006) apresenta a variação do calor específico com a temperatura a partir da fração mássica dos componentes da uva. A uva é composta principalmente por água, proteína, carboidratos, lipídios, fibra e cinzas. Na Tabela 3.1 está apresentada a porcentagem desses componentes em uma amostra com 100g de uva.

Tabela 3.1 – Composição da uva produzido em território americano e da uva europeia (ASHRAE, 2006)

| Componente | Uva Americana | Uva Europeia |
|--------------|----------------------------------|--------------|
| | Porcentagem em 100 g de material | |
| Água | 81,30 | 80,75 |
| Proteína | ND | ND |
| Lipídios | ND | ND |
| Carboidratos | 17,15 | 17,81 |
| Fibra | 1,00 | 1,00 |
| Cinza | 0,55 | 0,44 |

ND = não detectado

Pela Tabela 3.1, observa-se que a composição das uvas varia para cada território. Assim, conclui-se que há variação de composição também para cada tipo de uva existente, sendo necessário o estudo centesimal para cada uma delas.

As equações (3.3), (3.4), (3.5) e (3.6) se aplicam à estimativa do calor específico da água, de proteína, de lipídio, de carboidratos, de fibra e de cinzas respectivamente.

$$c_{\text{água}} = 4176,2 - 9,0864 \cdot 10^{-2} \cdot (T_p - 273) + 5,4731 \cdot 10^{-3} \cdot (T_p - 273)^2 \quad (3.3)$$

$$c_{\text{carboidratos}} = 1548,8 + 1,9625 \cdot 10^{-2} \cdot (T_p - 273) - 5,9399 \cdot 10^{-3} \cdot (T_p - 273)^2 \quad (3.4)$$

$$c_{\text{fibra}} = 1845,9 + 1,8306 \cdot (T_p - 273) - 4,6509 \cdot 10^{-3} \cdot (T_p - 273)^2 \quad (3.5)$$

$$c_{\text{cinza}} = 1092,6 - 1,8896 (T_p - 273) - 3,68179 \cdot 10^{-3} \cdot (T_p - 273)^2 \quad (3.6)$$

O cálculo do calor específico da uva é feito segundo a equação (3.7), na qual c_i é o calor específico de cada componente e x_i é sua fração mássica correspondente presente na uva, e c é o calor específico total da uva, dado em $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, válida para uma faixa de temperatura de 273 K a 423 K.

$$c = \sum (c_i x_i) \quad (3.7)$$

Na Figura 3.2, está representado o comportamento do calor específico dado pela equação (3.7) como função da temperatura do material.

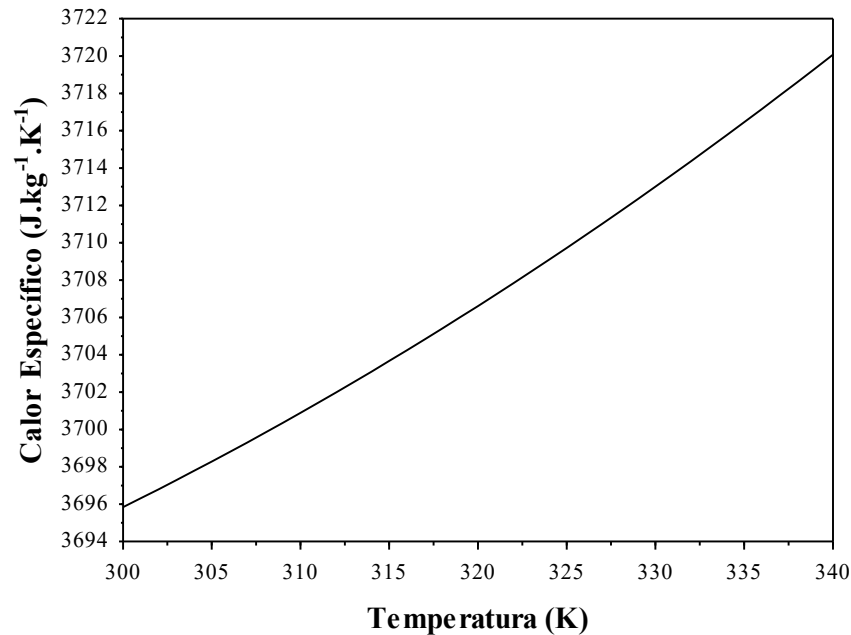


Figura 3.2 – Comportamento do calor específico da uva americana calculado pela somatória dos calores específicos de seus componentes segundo Choi e Okos (1986)

Cinar (2002) utilizou esse mesmo método para o cálculo do calor específico de *blueberries* submetidas à secagem em dois tipos de secador: secador em leito fixo e secador tipo túnel. Os valores encontrados para a fruta descongelada e para a fruta seca foram 3593,9 e 3470 J.kg⁻¹.K⁻¹, respectivamente.

3.1.3. Dependência com a umidade e a temperatura

O modelo de Akhijahani e Khodaei (2013) apresentado pela equação (3.8) foi obtido para estimativa do calor específico de uvas do tipo Rasa, considerando temperaturas 313 K, 323 K, 333 K e 343 K e umidades de 22,36 %, 37,56 %, 52,13 % e 71,53%.

$$c = 180,3 + 22 (T_p - 273) + 22,3 U(\%) \quad (3.8)$$

na qual:

c = calor específico do material, J.kg⁻¹.K⁻¹

$U(\%)$ = umidade em base úmida do material, kg água/kg sólidoúmido

T_p = temperatura do material, K

O comportamento do calor específico do material em função da temperatura e da umidade dado pela equação (3.8) é observado na Figura 3.3.

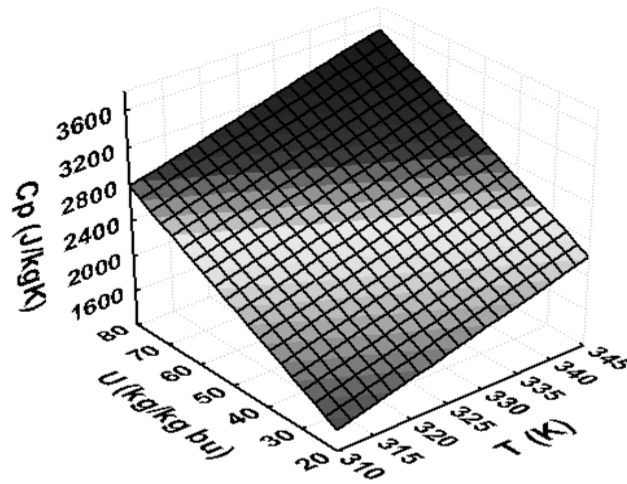


Figura 3.3 –Variação do calor específico da uva do tipo Rasa com a umidade e a temperatura segundo Akhijahani e Khodaei (2013)

Pela Figura 3.3 observa-se que o calor específico aumenta com o aumento da umidade e da temperatura e o valor máximo obtido é $3600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Da equação (3.8), pode-se avaliar os valores dos coeficientes angulares da temperatura e umidade, sendo os dois da mesma ordem de grandeza, 22 e 22,3, respectivamente. Assim, conclui-se que o efeito da temperatura e da umidade na variação do calor específico é o mesmo.

3.2. Estimativa da condutividade térmica de uvas

Maroulis *et al.* (1990) sugerem um modelo estrutural para predição da condutividade térmica de materiais alimentícios baseado na condutividade térmica do sólido e do gás. Nesse modelo, a condutividade térmica de sólidos não porosos foi igual a $0,32 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ e a de materiais porosos $0,139 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Mabrouk *et al.* (2006) estudaram a secagem de uvas em secador tipo túnel com valores de condutividade térmica para a uva seca na faixa entre $0,13$ e $0,15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ válida para temperaturas entre 303K e 343 K e umidade variando de $4,5 \text{ kg/kg bs}$ até $0,3 \text{ kg/kg bs}$.

Da mesma forma como apresentado para o calor específico, as seções a seguir apresentam correlações que expressam a dependência da condutividade térmica com a umidade e com a temperatura.

3.2.1. Dependência com a umidade

Sweat (1974) estudou a condutividade térmica de diversos materiais e por meio de experimentos obteve uma correlação para a variação da condutividade térmica com a umidade X (b.s.) para alimentos e vegetais dada pela equação (3.9).

$$\lambda = \frac{0,148 + 0,641X}{1 + X} \left[\frac{W}{mK} \right] \quad 293 \leq T \text{ (K)} \leq 338 \quad (3.9)$$

A correlação utilizada por Vagenas *et al.* (1990a) para a predição da condutividade térmica (λ) da uva do tipo Sultana é apresentada pela equação (3.10) em função da umidade X expressa em base seca.

$$\lambda = \frac{0,069 + 0,473X}{1 + X} \left[\frac{W}{mK} \right] \quad 293 \leq T \text{ (K)} \leq 353 \quad (3.10)$$

Na Figura 3.4, é apresentado o comportamento da condutividade térmica da uva predita por Vagenas *et al.* (1990a) e por Sweat (1974) para frutas e vegetais. Também está expresso o valor apresentado por Mabrouk *et al.* (2006) para a uva-passa.

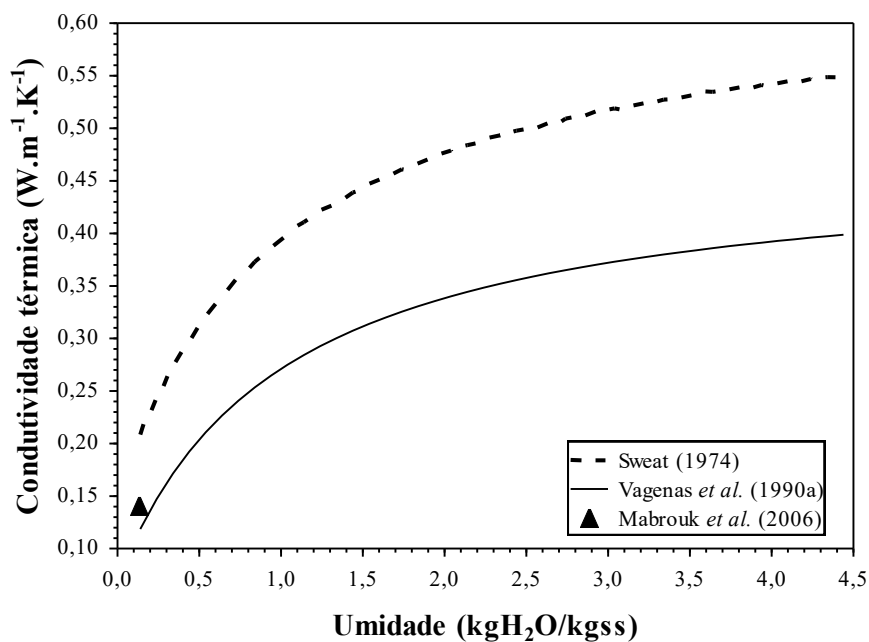


Figura 3.4 – Comportamento da condutividade térmica em função da umidade da uva em base seca segundo Vagenas *et al.* (1990a), Sweat (1974) e para a uva-passa predita por Mabrouk *et al.* (2006)

Da Figura 3.4, observa-se que a condutividade térmica aumenta com o aumento da umidade. Isso se deve ao fato de que a condutividade da água pura ser de $0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a 298K. Assim quanto maior o conteúdo de umidade na uva maior a condutividade térmica da mesma (REZENDE, 2011). Observa-se também que os valores estimados pela correlação de Sweat (1974) são superiores aos obtidos por Vagenas *et al.* (1990a). Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que o modelo de Sweat (1974) ser aplicável para frutas e vegetais de modo geral, enquanto que o modelo de Vagenas *et al.* (1990a) é específico para uvas. Vagenas *et al.* (1990a) apresenta um valor próximo em umidades baixas ao apresentado por Mabrouk *et al.* (2006) para uvas secas, o que não acontece com os valores preditos pelo modelo de Sweat (1974).

3.2.2. Dependência com a umidade e a temperatura

Akhijahani e Khodaei (2013) obtiveram uma correlação para o cálculo da condutividade térmica de uvas do tipo Rasa (*Vitis vinifera* L.), conforme a equação (3.11). Os autores utilizaram o método da transferência de calor em estado transiente, no qual a condutividade térmica foi determinada baseada na relação entre a temperatura do núcleo da amostra e o tempo de aquecimento. A Figura 3.5 apresenta a condutividade térmica para valores de $22,36 \leq U(\% \text{bu}) \leq 71,53$ e $308 \leq T (\text{K}) \leq 348$.

$$\lambda = 0,1022 + 0,0028 (T_p - 273) + 0,0044 U(\%) \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right] \quad (3.11)$$

$$U(\%) = \left(\frac{X}{1 + X} \right) * 100$$

na qual:

X = umidade da uva em base seca, kg H₂O/kg sólido seco.

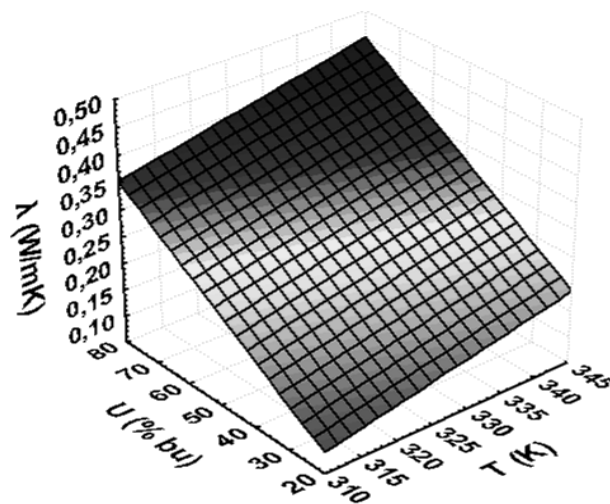


Figura 3.5 – Variação da condutividade térmica da uva Rasa com a umidade e a temperatura segundo Akhijahani e Khodaei (2013)

Da Figura 3.5, observa-se que a condutividade térmica aumenta com o aumento da umidade e da temperatura. Observando a equação (3.11), pode-se concluir que o efeito provocado pela umidade nesse parâmetro é mais significativo que o efeito da temperatura, pois o coeficiente angular referente à umidade é maior que o da temperatura.

3.3. Calor de vaporização da água

Vagenas *et al.* (1990b) apresentam uma correlação para o calor de vaporização da água (r), dada pela equação (3.12) que é obtida por duas parcelas: o calor de vaporização da água pura (r_0) (equação (3.13)) em função da temperatura (T) e o calor diferencial de adsorção da água (L_w), equação (3.14), função da umidade em base seca do material.

$$r = r_0 + L_w \quad (3.12)$$

$$r_0 = 3,11 \cdot 10^6 - 2,38 \cdot 10^3 T \quad (3.13)$$

$$L_w = 7,3 \cdot 10^6 \exp(-38X) \quad (3.14)$$

Na Figura 3.6, é apresentado o comportamento do calor de vaporização dado pelo modelo da equação (3.12). Foi estudado a variação na faixa de temperatura de 300 K a 340 K e para as seguintes umidade em base seca: 4,5; 2; 1; 0,5 e 0,3 - com o intuito de verificar a significância de L_w na equação.

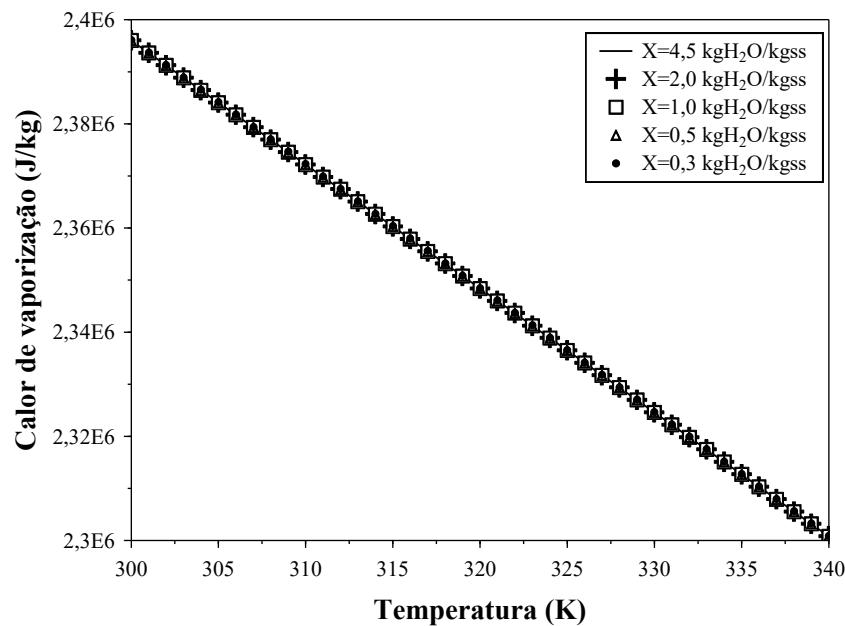


Figura 3.6 – Comportamento do calor de vaporização com a variação da temperatura em 5 diferentes umidades: 4,5; 2; 1; 0,5 e 0,3 kg/kg em base seca, dado pelo modelo apresentado por Vagenas *et al.* (1990b)

Da Figura 3.6, pode-se concluir que não há mudança no calor de vaporização quando se analisa a variação na umidade.

Para fins de comparação, foram obtidos na literatura (LEWIS, 1996; PERRY E GREEN, 1997) alguns valores para o calor de vaporização da água e os mesmos comparados com o valor obtido pela equação (3.12), para a mesma temperatura.

Para a temperatura de 373 K, o valor do calor de vaporização dado por Perry e Green (1997) foi de $2,261 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$. Ao utilizar a equação, também para a mesma temperatura, obtêm-se $r = 2,222 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$. De Lewis (1996), sabe-se que o calor latente de vaporização da água é extremamente alto, cerca de sete vezes maior que o calor de fusão e seus valores são $2,257 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ e $3,35 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}$, respectivamente.

Ramos *et al.* (2015) em seu estudo sobre a produção de passas da variedade Monukka em secador solar utilizou o valor de $2,419 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ para o calor de vaporização na modelagem matemática do processo de secagem.

Sabendo que a variação do calor latente de vaporização obtido pela equação (3.12) é próximo ao do encontrado na literatura, conclui-se que essa equação pode ser utilizada para o cálculo desse parâmetro e que o L_w não é significativo no modelo para a faixa de temperatura estudada.

3.4. Difusividade efetiva da umidade contida no interior da uva

A difusividade efetiva dentro da uva que irá passar pelo processo da secagem (D_e) é fortemente dependente da faixa de temperatura em que o produto for submetido (T_p). Segundo Vagenas *et al.* (1990b), esse efeito pode ser calculado pela equação de Arrhenius, dada pela equação (3.15).

$$D_e = D_{e0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_p}\right) \quad (3.15)$$

na qual:

D_e = difusividade efetiva, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

D_{e0} = difusividade inicial, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

E_a = energia de ativação, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

R = constante dos gases ideais, $8,314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

T_p = temperatura do produto, K

Na literatura, encontram-se estudos sobre a difusividade efetiva de uvas e derivados, que podem ser comparados com os valores mostrados na Figura 3.7. Zogzas *et al.* (1996) apresentaram um estudo sobre a difusividade efetiva variando com a umidade e com a temperatura para diferentes materiais alimentícios e para a uva-passa apresentam os seguintes resultados: em $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, com variação de umidade entre 0,15 a 2,40 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg bs}$, a difusividade efetiva está entre $5,0 \cdot 10^{-11}$ a $2,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e em $T = 50 \text{ }^\circ\text{C}$, para umidades entre 0,17 a 3,50 $\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg bs}$, entre $1,0 \cdot 10^{-10}$ a $4,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Ferreira *et al.* (2012) estudaram a difusividade efetiva para o bagaço de uva fermentado, utilizando a equação de Arrhenius nas temperaturas de $50 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ e $90 \text{ }^\circ\text{C}$ e encontraram valores que variam entre $1,009 \cdot 10^{-9}$ a $3,04 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ nas temperaturas avaliadas. Teles *et al.* (2015) em seu estudo sobre a secagem da uva Crimson obteve o valor $2,18 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a difusividade efetiva.

Na Figura 3.7, observa-se o comportamento da difusividade efetiva para a uva em função da temperatura do ar calculada a partir da equação (3.15).

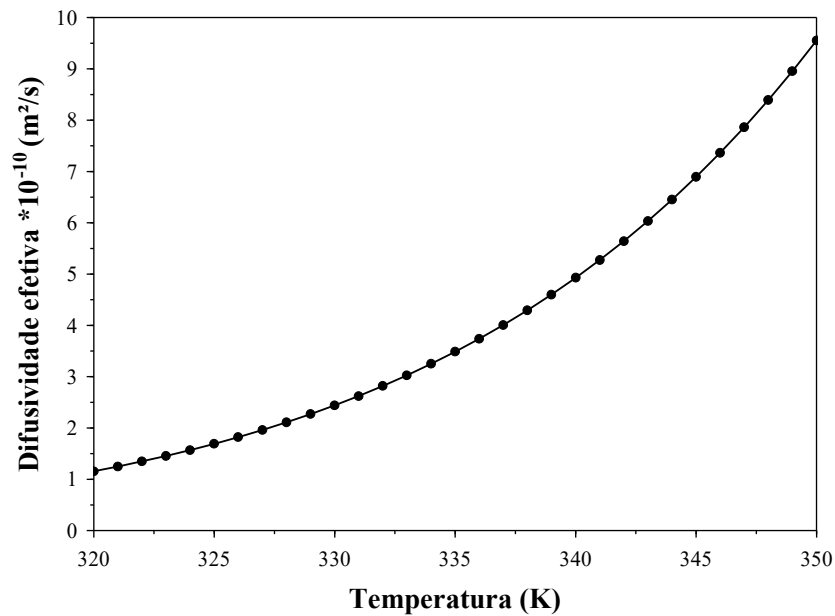


Figura 3.7 – Comportamento da difusividade efetiva calculada pela equação (3.15) Arrhenius citada em Vagenas *et al.* (1990b) em função da temperatura da uva

Observando os valores apresentados na Figura 3.7, conclui-se que o valor e a ordem de grandeza da difusividade efetiva dado pela equação (3.15) está de acordo com valores médios encontrados por Zogzas *et al.* (1996), Ferreira *et al.* (2012) e Teles *et al.* (2015).

3.5. Atividade da água

Para calcular a atividade da água foi utilizado o modelo proposto por Iglesias e Chirife (1982) com parâmetros para a uva Sultana. O valor da atividade da água é calculado em função da umidade é apresentada pela equação (3.16).

$$a_w = \exp\left(-5,4512 \left(\frac{X}{1+X} \cdot 100\right)^{-0,8127}\right) \quad (3.16)$$

na qual:

a_w = atividade da água, adimensional

X = umidade em base seca, kgH₂O/kg bs.

O comportamento da atividade de água em função da umidade é apresentado na Figura 3.8. Os cálculos foram realizados com a faixa de umidade em base seca (X) de 4,5 até 0,14 kgH₂O/kgbs, que é a umidade trabalhada em Vagenas e Marinos-Kouris (1991).

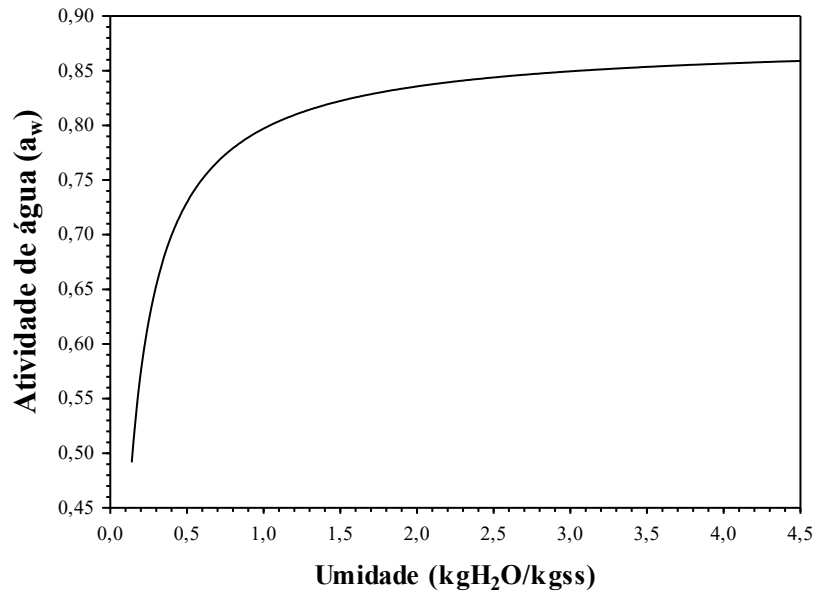


Figura 3.8 – Comportamento da atividade de água como função da umidade da uva Sultana segundo Iglesias e Chirife (1982)

Na umidade inicial de 4,5 kgH₂O/kg bs referente à umidade da uva *in natura*, observa-se um valor para atividade da água de 0,85. Para uma umidade baixa igual a 0,14 kgH₂O/kg bs referente à uva-passa, isto é, uva seca, essa atividade não ultrapassa 0,5. O valor seguro de atividade da água para que não haja proliferação de nenhum tipo de micro-organismos é inferior a 0,6, como é mostrado na Tabela 2.1. Dessa forma, pode-se concluir que a diminuição da atividade da água quando se diminui a umidade (Figura 3.8) garante uma atividade de água segura ao final da secagem, na qual não há mais água suficiente para o desenvolvimento de qualquer microrganismo patogênico, aumentando o tempo de prateleira do produto.

3.6. Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio foi calculada utilizando o modelo GAB (Guggenheim-Anderson-Boer) de três parâmetros fisicamente significativos. Esse modelo tem sido sugerido como o mais versátil quando se diz respeito à sorção em alimentos (RAO E RIZVI, 1996).

Vagenas e Marinos-Kouris (1991) apresentaram o modelo GAB já com os parâmetros para a uva Sultana, expresso da seguinte forma:

$$X_e = \frac{X_m c_r k_r a_w}{(1 - k_r a_w)(1 - k_r a_w + c_r k_r a_w)} \quad (3.17)$$

$$X_m = 0,109 \quad (3.18)$$

$$c_r = 0,005263 \exp\left(\frac{14,34}{RT_p}\right) \quad (3.19)$$

$$k_r = 1,062 \exp\left(\frac{-0,154}{RT_p}\right) \quad (3.20)$$

nas quais:

X_e = umidade de equilíbrio, kgH₂O/kg bs

a_w = atividade da água, adimensional

R = constante dos gases ideais, 8,314.10⁻³ kJ.mol⁻¹.K⁻¹

T_p = temperatura do sólido, K.

Na Figura 3.9, pode-se observar o comportamento da umidade de equilíbrio em função da atividade de água dado pela equação (3.17) para as temperaturas de 300 K, 310 K, 320 K, 330 K e 340 K. A atividade de água foi calculada pela Equação (3.16) e a faixa de umidade foi de 4,5 a 0,14 kg H₂O/kg bs.

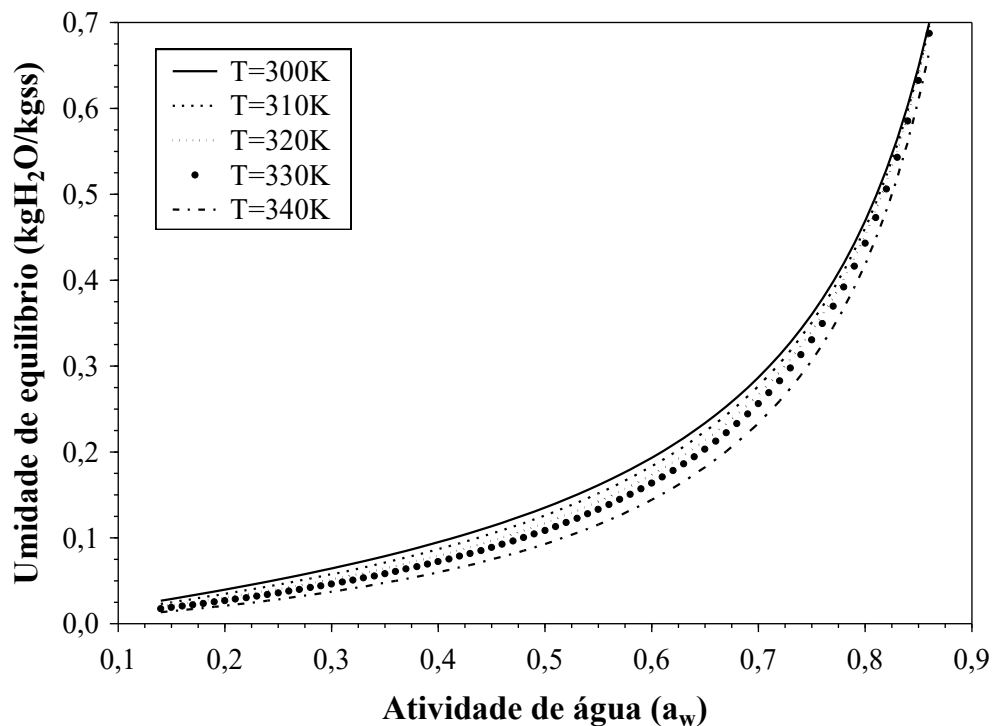


Figura 3.9 – Comportamento da umidade de equilíbrio em função da atividade da água para as temperaturas 300 K, 310 K, 320 K, 330 K e 340 K segundo o modelo de Vagenas *et al.* (1990b)

Pode-se observar o efeito da temperatura nas curvas da Figura 3.9, sobretudo, para valores de atividade de água menores que 0,8. Para atividades de água menores que 0,2, as curvas apresentam praticamente o mesmo valor.

Gabas (1998) estudou a secagem de uvas do tipo Itália para obtenção de passas. Para determinar a umidade de equilíbrio em função da atividade da água utilizou o método estático e assim calcular as isotermas de sorção da uva Itália. Com os valores de umidade de equilíbrio para as diferentes temperaturas estudadas (40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 75 °C) pôde validar os dados de três modelos distintos de umidade de equilíbrio: BET, GAB e Halsey. O método gravimétrico consiste em colocar o material em contato com diversas umidades relativas conhecidas até atingir o equilíbrio e assim determina-se a umidade das amostras. As várias umidades relativas foram obtidas através de soluções salinas saturadas de sais que possuem solubilidade pouco variável com a temperatura e com atividade de água variando entre 0,1 até 0,9. Os tempos para se alcançar o equilíbrio foram de 2 a 5 semanas. Os resultados mostraram que o modelo de GAB foi o melhor para prever os dados de umidade de equilíbrio em função da atividade da água. Os testes foram realizados em cinco temperaturas diferentes: 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C e 75°C e os parâmetros do modelo GAB encontrados para cada temperatura são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo GAB para a uva Itália (GABAS, 1998)

| Temperatura (°C) | c_r | k_r | X_m |
|------------------|-------|-------|-------|
| 40 | 1,55 | 1,06 | 0,11 |
| 50 | 1,66 | 1,08 | 0,08 |
| 60 | 1,76 | 1,11 | 0,08 |
| 70 | 3,51 | 1,16 | 0,05 |
| 75 | 3,38 | 1,18 | 0,04 |

Na Figura 3.10, está apresentado o comportamento da umidade de equilíbrio versus atividade de água calculado a partir das equações do modelo GAB para cada temperatura estudada por Gabas (1998).

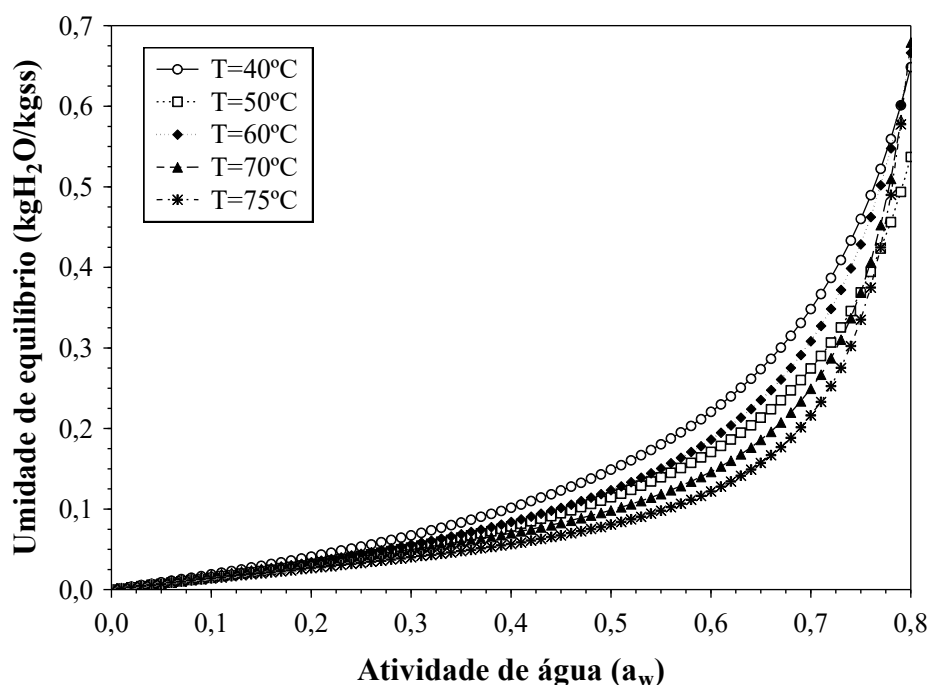


Figura 3.10 – Comportamento da umidade de equilíbrio variando com a atividade de equilíbrio pelo modelo GAB (GABAS, 1998)

Da Figura 3.10, observa-se o efeito acentuado da temperatura nas curvas, principalmente após a atividade de água igual a 0,75. A partir da atividade de água 0,3 esse efeito não é mais contabilizado e as curvas apresentam praticamente o mesmo valor de umidade de equilíbrio. Esse comportamento é o mesmo apresentado na Figura 3.9 que é o resultado do modelo GAB apresentado por Vagenas *et al.* (1990b). Dessa forma, pode-se dizer que a equação (3.17) está correta para utilização no modelo.

3.7. Estudo sobre as propriedades do ar de secagem

As características do ar, isto é, umidade e temperatura do ar, são muito importantes para o processo de secagem. O ar deve estar em uma temperatura alta, porém não tão alta a ponto de desnaturar os alimentos, e apresentar uma umidade baixa. No caso da secagem de uvas essa temperatura não deve ultrapassar 76 °C (349 K) e a umidade inicial deve estar em 0,12 kg H₂O/ kg bs.

Na modelagem da secagem são necessários parâmetros sobre o ar são necessários, coeficiente de transferência de calor e coeficiente de transferência de massa. Esses parâmetros são funções de propriedades do ar como condutividade térmica, difusividade da água no ar e de números adimensionais como o Reynolds, Prandtl e Schmidt, calculados a partir da densidade, viscosidade dinâmica e velocidade de escoamento do ar.

Um estudo sobre esses parâmetros, bem como a dependência dos mesmos com a temperatura, velocidade, densidade e viscosidade do ar foi realizado e seus resultados estão apresentados na sequência.

3.7.1. Concentração mássica do ar

A densidade do ar é necessária no cálculo dos números adimensionais, então é necessário saber como é seu comportamento sabendo que ela varia com a temperatura de acordo com a equação (3.21) (PFEIFER, 2011).

$$\rho_{ar} = 1,2 \left(\frac{293,15}{T_{ar}} \right) \quad (3.21)$$

na qual:

ρ_{ar} = concentração mássica do ar de secagem, kg.m⁻³

T_{ar} = temperatura do ar de secagem, K

Para uma faixa de temperatura variando de 300 K até 349 K, pode-se obter a Figura 3.11, que mostra o comportamento da densidade do ar em função da temperatura.

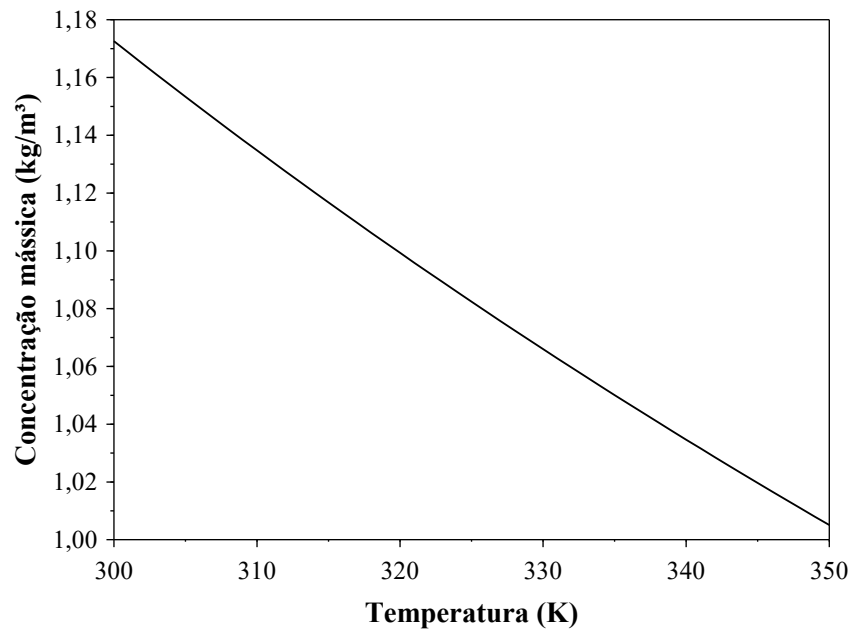


Figura 3.11 – Comportamento da densidade do ar em função da temperatura (PFEIFER, 2011)

Na Figura 3.11, observa-se que a densidade do ar é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, ela diminui enquanto a temperatura aumenta. Para a faixa de temperatura estudada a densidade varia de $1,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ até $1,00 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

3.7.2. Viscosidade dinâmica

No cálculo dos números adimensionais é necessário conhecer o valor da viscosidade dinâmica do ar. Para um ar úmido, deve-se utilizar uma correlação entre a viscosidade do ar seco e a viscosidade do vapor de água na temperatura do ar, sendo assim, a correlação seria função da temperatura do ar e da proporção mássica de vapor de água presente no ar. No entanto, a diferença nos valores da viscosidade do ar seco com a ar úmido fica em menos de 1%, portanto, optou-se em utilizar apenas a equação da viscosidade do ar seco. Para isso, foi utilizada a equação (3.22) citada por Perry e Green (1997) para descrever a viscosidade do ar seco ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$). Os resultados são apresentados na Figura 3.12.

$$\mu_{ar} = 3,02 * 10^{-6} + 5,655 * 10^{-8}T - 1,728 * 10^{-11}T^2 \quad (3.22)$$

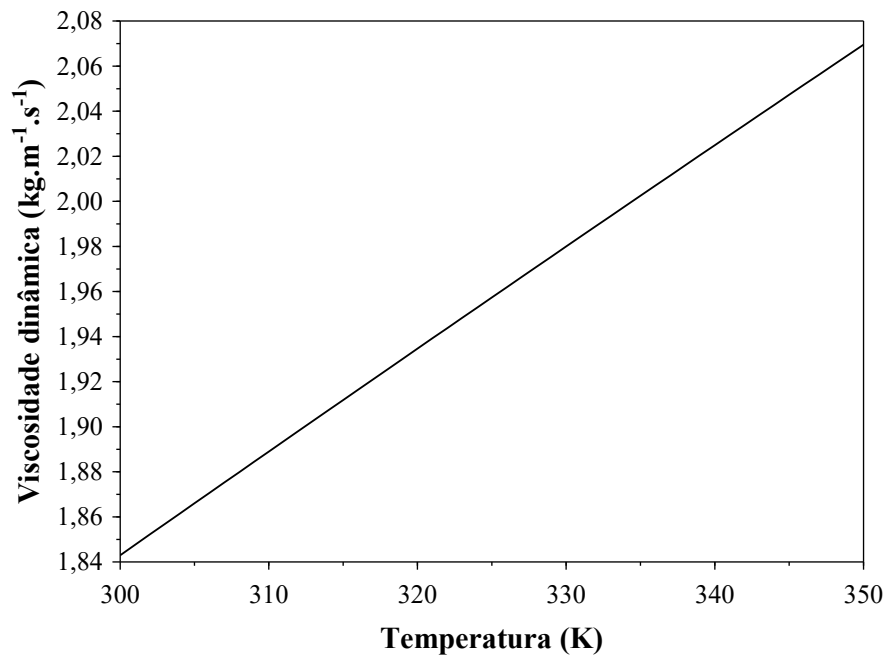


Figura 3.12 – Comportamento da viscosidade dinâmica do ar com a temperatura (PERRY E GREEN, 1997)

Pela figura, pode-se observar que a viscosidade dinâmica aumenta muito pouco com o aumento da temperatura do ar. Logo, na modelagem pode ser utilizado um valor médio igual a $1,95 \cdot 10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ para a viscosidade dinâmica do ar.

3.7.3. Condutividade térmica

A condutividade térmica do ar pode ser calculada pela equação (3.23) apresentada por Vagenas *et al.* (1990b).

$$\lambda_{ar} = 2,4 \cdot 10^{-2} \left(\frac{T_{ar}}{273} \right)^{1,81} \quad (3.23)$$

na qual:

T_{ar} = temperatura do ar de secagem, K.

Por meio de tabelas para a condutividade térmica encontradas em Perry e Green (1997), obtêm-se valores para a condutividade térmica do ar em função da temperatura e uma predição para o cálculo a partir dessa tabela é dada pela equação (3.24).

$$\lambda_{ar} = 8 * 10^{-5} T_{ar} + 0,0015 \quad (3.24)$$

na qual:

T_{ar} = temperatura do ar de secagem, K.

Karim e Hawlader (2005) em seu estudo com secador solar utilizaram um valor constante e igual a $0,0287 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ para a condutividade do ar em temperaturas de 40°C , 50°C e 60°C . Cinar (2002) em seu estudo sobre o modelo de Luikov aplicado à secagem de alimentos utilizou o valor $0,0288 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ para a condutividade do ar na temperatura de 60°C .

A Figura 3.13 apresenta o comportamento da condutividade térmica tanto pela equação (3.23) quanto pela equação (3.24), e o valor constante apresentado por Karim e Hawlader (2005) e de Cinar (2002).

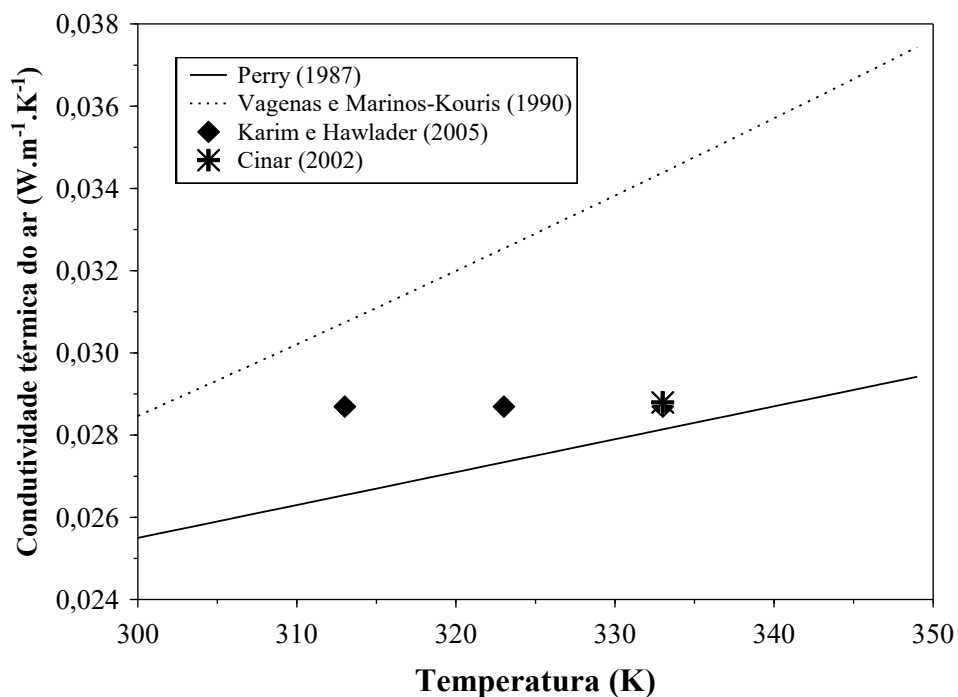


Figura 3.13 – Comportamento da condutividade térmica do ar em função da temperatura

Sabendo que à temperatura de 300 K o valor da condutividade do ar pode ser considerado igual a $0,0262 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (PERRY E GREEN, 1997), pode-se concluir que os dados obtidos pela equação (3.24) estão mais próximos do valor apresentado pelo autor. Sabe-se que, o valor constante de $0,0287 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ é uma boa aproximação para ser utilizada. No

presente trabalho, optou-se por utilizar o valor dado por Karim e Hawlader (2005) para o valor da condutividade térmica do ar.

3.7.4. Coeficiente de difusão da água no ar

O coeficiente difusivo de massa dado por Vagenas *et al.* (1990b) é mostrado na equação (3.25) baseada na equação de Arrhenius.

$$D_{ar} = 2,032 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T_{ar}}{273} \right)^{1,81} \quad (3.25)$$

na qual:

D_{ar} = coeficiente de difusão, m^2/s .

T_{ar} = temperatura do ar, K.

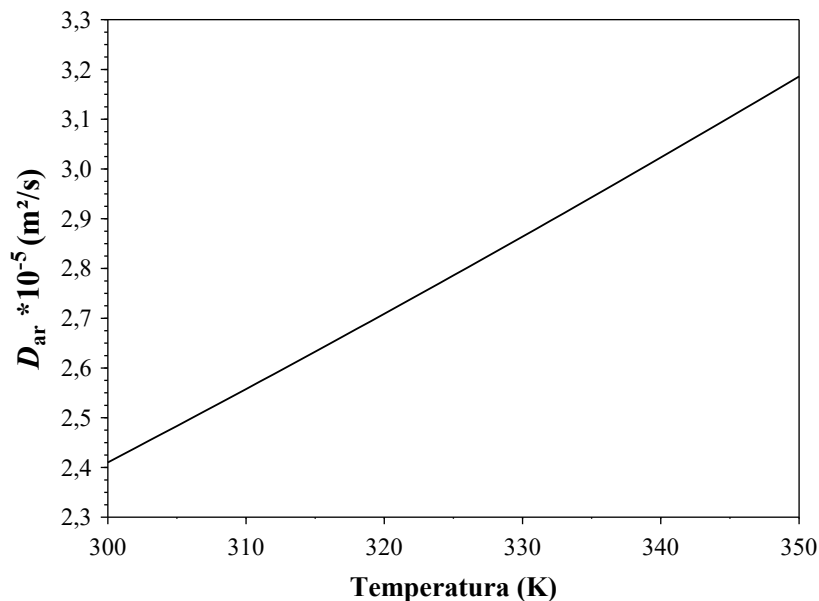


Figura 3.14 – Variação do coeficiente de difusão da água no ar descrito pela Equação (3.24)

Na literatura, pode-se encontrar valores para o cálculo do coeficiente de difusão de massa de água no ar. Esses valores foram comparados com os obtidos pela equação (3.25) e observa-se que para uma temperatura de 300 K, o coeficiente de difusividade do ar é igual a $2,21 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ (AIR PROPERTIES, 2016) e ao se calcular pela equação (3.25) encontra-se o valor de $2,41 \cdot 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$ com um erro de 9,05%. Já para uma temperatura de 350 K, em *Air*

Properties (2016), encontra-se um valor igual a $2,92 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, e calculado pela equação para a mesma temperatura, o valor do coeficiente de difusão da água no ar é igual a $3,18 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, com erro igual a 8,90%. Dessa forma, pode-se dizer que os valores obtidos pela equação apresentada por Vagenas *et al.* (1990b) estão coerentes com a literatura e a equação pode ser utilizada.

3.7.5. Estimativa dos números de Reynolds, Prandtl e Schmidt

No cálculo dos coeficientes de transferência de calor e de massa, se faz necessária a obtenção de três números adimensionais: Reynolds (Re), Prandtl (Pr) e Schmidt (Sc), dados pelas equações (3.26), (3.27) e (3.28), respectivamente. Esses parâmetros são dependentes da densidade, viscosidade e condutividade térmica do ar, que já foram apresentados, mas também da velocidade de escoamento do ar, calor específico do ar e comprimento característico.

Segundo Rathore e Panwar (2010) o calor específico do ar pode ser considerado constante e com um valor igual a $1012,0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, para ar em temperaturas de 3313 K, 323 K e 333 K. Cinar (2002) utilizou o valor de $1009,0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ na modelagem da secagem de frutas com ar à temperatura de 333 K. Segundo a tabela para propriedades do ar apresentada em *Air Properties* (2016), para a temperatura de 349 K que é a temperatura máxima utilizada nesse trabalho, o calor específico do ar é de $1009,0 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

O comprimento característico (d_e) utilizado foi o valor de 0,04 m, referente à metade da espessura inicial (L_{in}) total igual a 0,08 (Vagenas e Marinos-Kouris, 1991). A velocidade do ar (u) utilizada foi de $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Número de Reynolds

$$Re = \frac{d_e u \rho_{ar}}{\mu_{ar}} \quad (3.26)$$

na qual:

d_e = comprimento característico, m

u = velocidade do ar de secagem, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

ρ_{ar} = concentração mássica do ar de secagem, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

μ_{ar} = viscosidade dinâmica do ar de secagem, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

Cinar (2002) em seu estudo sobre a secagem de *blueberries* utilizou o valor de 2991,43 para o número de Reynolds para temperatura do ar a 333 K e velocidade de 4 m.s⁻¹.

Número de Prandtl

O número adimensional de Prandtl (Pr) pode ser calculado segundo a equação (3.27).

$$Pr = \frac{\mu_{ar} c_{ar}}{\lambda_{ar}} \quad (3.27)$$

na qual:

μ_{ar} = viscosidade dinâmica do ar, kg. m⁻¹.s⁻¹

c_{ar} = calor específico do ar, J.kg⁻¹.K⁻¹

λ_{ar} = condutividade térmica do ar, W.m⁻¹.K⁻¹

O valor típico encontrado na literatura para o número de Prandtl é $Pr = 0,7$ (OUESLATI *et al.* 2014).

Número de Schmidt

O número de Schmidt pode ser calculado através da Equação (3.28) como função da viscosidade, da densidade e do coeficiente difusivo do ar.

$$Sc = \frac{\mu_{ar}}{\rho_{ar} D_{ar}} \quad (3.28)$$

na qual:

μ_{ar} = viscosidade dinâmica do ar de secagem, kg. m⁻¹.s⁻¹

ρ_{ar} = concentração mássica do ar de secagem, kg. m⁻³

D_{ar} = coeficiente de difusão do ar de secagem, m².s⁻¹

Da Figura 3.15, para uma temperatura de 343 K, o número de Schmidt é aproximadamente 0,712.

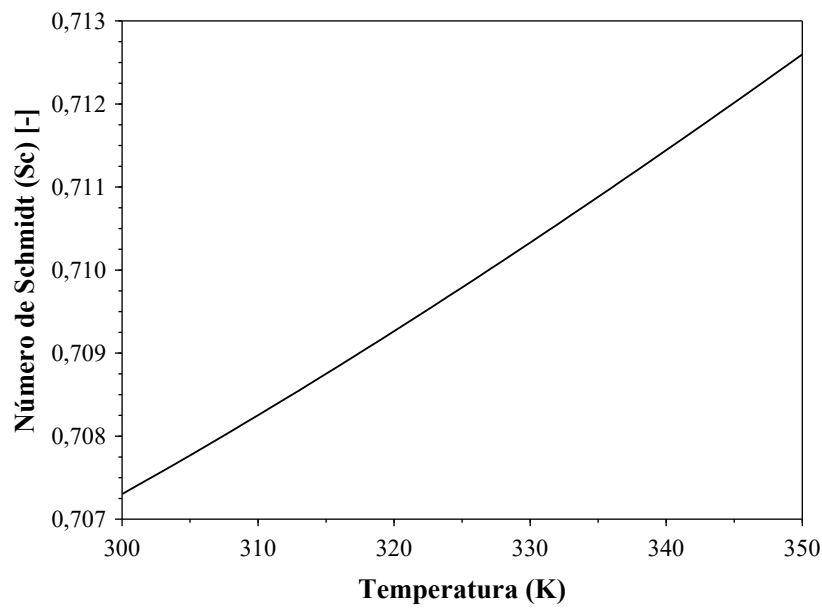


Figura 3.15 – Dependência do número de Schmidt com a temperatura

3.7.6. Coeficiente de transferência de calor

A Equação (3.29) foi proposta por Vagenas *et al.* (1990b) para estimativa do coeficiente de transferência de calor.

$$h_q = \left(\frac{\lambda_{ar}}{d_e} \right) 0,74 Re^{0,57} Pr^{0,33} \quad (3.29)$$

na qual:

h_q = coeficiente de transferência de calor, $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

λ_{ar} = condutividade térmica, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

d_e = comprimento característico, m

Re = número de Reynolds, adimensional

Pr = número de Prandtl, adimensional

A variação do coeficiente de transferência de calor com a temperatura é apresentada na Figura 3.16 para velocidades de $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e comprimento característico $d_e = L_{in}$ e $d_e = L_{in} / 2$, no qual $L_{in} = 0,04 \text{ m}$.

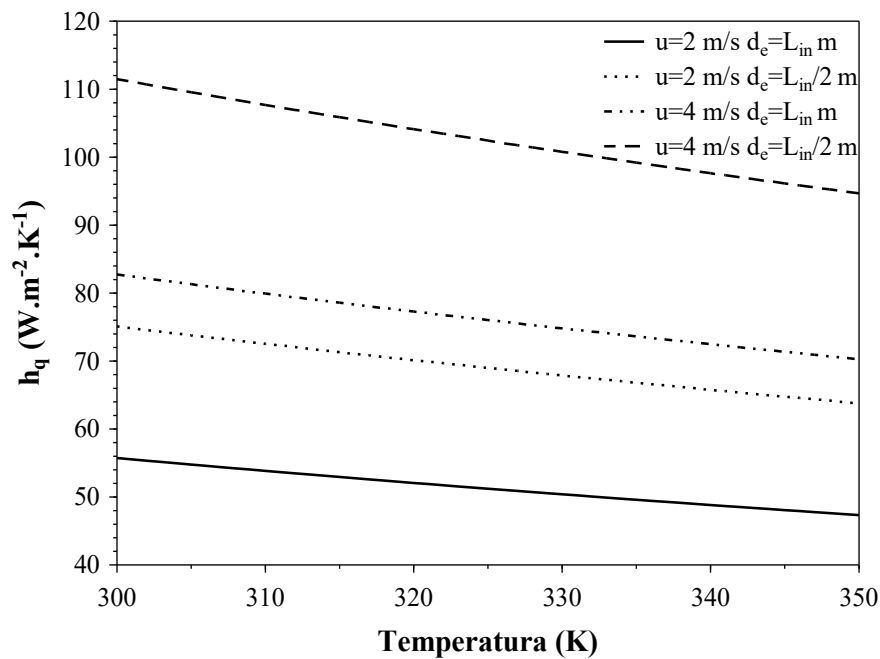


Figura 3.16 – Comportamento do coeficiente de transferência de calor com a variação da velocidade do ar de secagem e do comprimento característico segundo Vagenas *et al.* (1990b)

Da Figura 3.16, pode-se concluir que a velocidade do ar e o comprimento característico, ambos utilizados no cálculo do número de Reynolds, possuem forte influência no comportamento do coeficiente de transferência de calor. Sabe-se que, para o ar esse parâmetro varia dentro da faixa de 10 a 100 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Assim, a velocidade de 4 $m \cdot s^{-1}$ combinada com metade da espessura inicial não pode ser utilizada no cálculo. Cinar (2002) utiliza o valor de 31,8656 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ em seus cálculos da modelagem da secagem a 333 K com velocidade do ar igual a 2 $m \cdot s^{-1}$.

3.7.7. Coeficiente de transferência de massa convectivo

O coeficiente de transferência de massa convectivo (h_m) apresentado por Vagenas *et al.* (1990b) é dado pela equação (3.30).

$$h_m = \left(\frac{D_{ar}}{d_e} \right) 0,74 Re^{0,57} Sc^{0,33} \quad (3.30)$$

na qual:

h_m = coeficiente de transferência de massa, s^{-1}

D_{ar} = coeficiente difusivo de massa, $m \cdot s^{-1}$

d_e = comprimento característico, m

Re = número de Reynolds, adimensional

Sc = número de Schmidt, adimensional

A Figura 3.17 mostra como o coeficiente de transferência de massa varia quando há mudança na velocidade do ar de secagem e no comprimento característico do sistema.

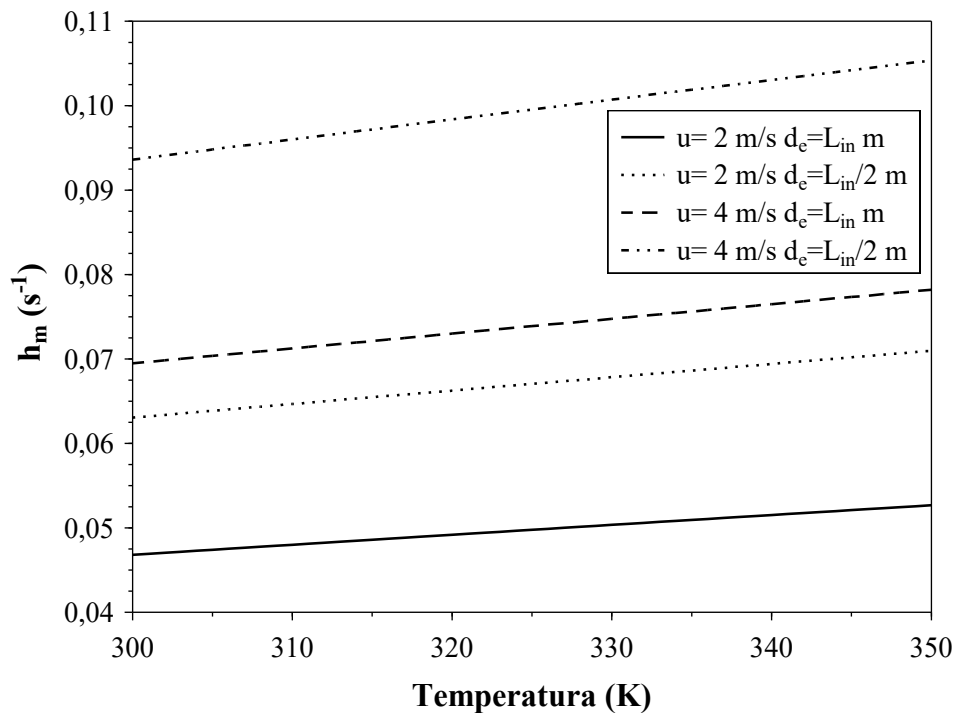


Figura 3.17 – Comportamento do coeficiente de transferência de massa do ar com a variação das condições do ar de secagem segundo Vagenas *et al.* (1990b)

De Cinar (2002) sabe-se que para uma temperatura de 333 K o coeficiente de transferência de massa é de $0,03225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Desta forma, pode-se dizer que a curva dada pelas seguintes condições, velocidade do ar igual a $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e comprimento característico igual à espessura inicial, representa melhor o comportamento desse parâmetro.

Após essa revisão bibliográfica sobre parâmetros encontrados na literatura, observa-se que os mesmos são sensíveis à variação de umidade e temperatura e tipo de material. Dessa forma, como não existem parâmetros específicos para a uva de variedade Crimson faz-se necessário encontrar os mesmos para esse tipo de uva, utilizada nesse estudo. No Capítulo 4, será apresentada uma metodologia experimental para obtenção das propriedades tratadas no Capítulo 3, para a uva variedade Crimson.

4. METODOLOGIA EXPERIMENTAL PARA OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E TERMOFÍSICAS DA UVA CRIMSON

Este trabalho foi realizado na Faculdade de Engenharia Química da FEQUI/UFU e nos laboratórios da Engenharia de Alimentos da FEQUI/UFU, respectivamente nas cidades de Uberlândia e Patos de Minas, Minas Gerais.

A matéria prima utilizada nesse trabalho foram uvas de mesa (*Vitis vinífera*) da variedade Crimson *Seedless* da marca Coopex Vale, adquiridas no Central de Abastecimento S.A. (Ceasa) de Uberlândia, Minas Gerais. As uvas se encontravam em estado de maturação completa, polpa firme, casca roxa bem escura e com bagas pesando entre 3 e 7g. Durante os experimentos elas foram armazenadas em geladeira comum, da marca Consul modelo CRM45ABANA, por 14 dias, mantidas a uma temperatura de 1°C.

Em todos os experimentos, as uvas que estavam fora do padrão de maturação foram descartadas.

4.1. Caracterização da matéria prima

As características físicas da uva Crimson foram determinadas de acordo com as seguintes análises: carboidratos redutores, fibra bruta, umidade, sólidos totais, cinzas, acidez titulável e grau Brix. Todas as medidas foram feitas em triplicata.

Teor de umidade

A uva, por conter alto teor de açúcar, carameliza em altas temperaturas. Dessa forma, para obter-se o teor de umidade, foi realizada secagem direta em estufa à vácuo a 60°C por 24h, até peso constante. O procedimento baseou-se na pesagem de 5g da amostra em placa petri, previamente seca em estufa a 105°C e com a massa medida, em seguida essa amostra foi colocada na estufa até peso constante. A Equação (4.1) foi utilizada para o cálculo da umidade.

$$\% \text{ Umidade} = \frac{(\text{massa inicial} - \text{massa final})}{\text{massa inicial}} * 100 \quad (4.1)$$

Teor de carboidratos redutores

O procedimento para obtenção do teor de carboidratos redutores baseou-se na metodologia do Instituto Adolfo Lutz (2008). A metodologia consiste na pesagem, em triplicata, de 5 g da amostra. Transfere-se quantitativamente a amostra para um balão de fundo redondo de 250 mL com o auxílio de água. Em seguida, adiciona-se 5 mL de ácido clorídrico P.A 36,5-38,0%. Coloca-se em chapa de aquecimento e em seguida o refrigerador de refluxo é adaptado ao balão. Deixa-se em ebulição por 3 horas a contar a partir do início da ebulição.

Após resfriada, a solução foi neutralizada com solução de hidróxido de sódio a 40%. O pH foi medido a cada adição com auxílio de peagâmetro. Após a neutralização a solução foi transferida, quantitativamente, para um balão volumétrico de 250 mL, com auxílio de água, e o volume foi completado com água. Agitou-se para homogeneizar. Filtrou-se, em papel de filtro seco para um frasco Erlenmeyer de 300 mL. Transferiu o filtrado para uma bureta de 25 mL. Num Erlenmeyer de 250 mL colocou-se 10 mL de solução Fehling A e 10 mL de solução Fehling B, previamente padronizadas, adicionando 40 mL de água. Em seguida, titulou-se a solução de Fehling, mantida em ebulição por meio de chapa aquecedoras, com a solução neutralizada, até o ponto de viragem. Os cálculos foram realizados pela Equação (4.2):

$$\% \text{ Carboidratos} = \frac{100 A f}{P V} \quad (4.2)$$

sendo:

A = volume da solução P (g da amostra) = 250g

f = fator de correção das soluções Fehling, obtido através da padronização

P = massa da amostra em gramas.

V = volume da solução da amostra gasto na titulação.

Teor de lipídios

A metodologia para obtenção de lipídios se baseia na extração do mesmo por éter de petróleo (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

Pesou-se dois gramas da amostra seca (24h em estufa a vácuo a 60°C) em saquinhos de papel filtro com as dimensões de dois centímetros de largura por dois centímetros de altura. Transferiu-se o conjunto saquinho+amostra para o aparelho extrator tipo Soxhlet. Acoplou o

extrator ao balão de fundo chato, previamente seco em estufa a 105°C e tarado. Adicionou-se 180 mL de éter, quantidade suficiente para um Soxhlet e meio.

Adaptou a um refluxo refrigerante. Mantendo, sob aquecimento em chapa elétrica, à extração contínua por 4h (quatro a cinco gotas por segundo). Retirou-se o saquinho e então o éter contido no balão foi seco em chapa aquecida e dentro da capela. Em seguida, transferiu-se o balão com o resíduo extraído para uma estufa a 105°C, mantendo-o por cerca de uma hora. Resfriou-se em dessecador até a temperatura ambiente. Pesou-se e repetiu as operações de aquecimento por 30 minutos na estufa e resfriou até peso constante (no máximo 2 h). O cálculo foi realizado como mostra a Equação (4.3).

$$\% \text{ Lipídios} = \frac{100 N}{P} \quad (4.3)$$

sendo:

N = massa do balão após extração menos a massa inicial do balão = massa de lipídios

P = massa da amostra.

Teor de proteínas

A quantidade de proteínas é determinada pelo método Kjeldahl que indica o conteúdo de nitrogênio presente no alimento (NIELSEN, 2003).

O procedimento consistiu na pesagem de 0,5 g da amostra que foi transferida para um tubo digestor. A esse tubo foi adicionada 1g de mistura catalítica e 5 mL de ácido sulfúrico P.A ACS 95-98%. Em seguida, os tubos foram colocados em aquecimento no bloco digestor até a solução se tornar azul-esverdeada e livre de material não digerido (pontos pretos). Esse procedimento dura em torno de cinco horas.

Esperou o material digerido esfriar e em seguida foi adicionado cerca de 10 mL de água destilada ao tubo. Em um Erlenmeyer de 250 mL foram adicionadas 25 mL de solução de ácido bórico e o mesmo foi colocado na recepção do sistema de destilação de nitrogênio (Destilador de Nitrogênio, marca TECNAL, modelo TE-0363). O tubo contendo a amostra diluída foi conectado à saída de solução básica do equipamento. Um volume de 20 mL de hidróxido de sódio 50% foi adicionado ao tubo. Em seguida, o gerador de vapor foi ligado e

iniciou-se a destilação da amostra até que cerca de 100 mL do destilado tenha sido recolhido. O mesmo procedimento foi realizado para os outros dois tubos com as amostras digeridas.

Depois de finalizar a destilação, foi realizado a titulação da solução recolhida com solução de ácido clorídrico padronizada. A titulação foi realizada sob agitação e até que o pH do titulado esteja em 4,2.

A Equação (4.4) foi utilizada para o cálculo da quantidade de proteínas.

$$\% \text{ Proteínas} = \text{Normalidade do HCl} \cdot \frac{f}{P} \cdot \frac{14 \text{ g de N}}{\text{mol}} \cdot 100 \quad (4.4)$$

sendo:

P = massa da amostra.

f = fator de conversão do HCl após padronização

Teor de fibra bruta

O procedimento descrito a seguir foi utilizado para determinação do teor de fibra bruta em 1g de uvas secas em estufa a vácuo por 24h à 60°C. Após pesagem das amostras, as mesmas foram colocadas em saquinhos de tecido TNT que tiveram suas massas medidas previamente. Os saquinhos com as amostras foram hidratados em água destilada por 15 min e em seguida colocados no determinador de Fibra da marca TECNAL, modelo TE-149, juntamente com 3L de solução de ácido clorídrico 1,25%. O sistema funcionou por 30 min a 100 °C. Em seguida, lavou-se o sistema três vezes com 3L de água destilada por vez e então 3L de solução básica (NaOH 1,25%) foi adicionado e o sistema funcionou por mais 30 min a 100°C. Ao final, o equipamento foi novamente lavado com água destilada e em seguida os saquinhos foram removidos e lavados com álcool absoluto por 3 min e, então, com acetona por mais 3 min. Em seguida, os saquinhos foram transferidos para cadinhos de porcelana, previamente secos em estufa a 105°C com suas massas aferidas. O conjunto saquinho+cadinho foi levado para a estufa a 105°C por 5h. Ao retirar da estufa, deixou-se esfriar em dessecador e o conjunto saquinho+cadinho+extrato teve sua massa aferida. Esse conjunto, então, foi levado à mufla a 550°C por 1h. Ao retirar o conjunto da mufla, esperou esfriar e então pesou-se. A Equação (4.5) foi utilizada na determinação da porcentagem de fibra fruta contida na uva.

$$\% \text{ Fibra Bruta} = \frac{(C - A) - D}{B} \cdot 100 \quad (4.5)$$

onde:

A = Massa do saquinho vazio (g)

B = Massa da amostra (g)

C = Massa do conjunto cadinho+saquinho+extrato (g)

D = Massa do conjunto cadinho+cinzas (g)

Teor de cinzas

Para se obter o teor de cinzas, uma amostra seca com massa de aproximadamente 5g, obtida após a secagem em estufa a vácuo por 24h a 60°C, foi colocada por 8h na mufla a 550°C. A amostra *in natura* foi colocada em cadinhos de porcelana, previamente secos e com as massas aferidas, e o conjunto foi colocado para secar em estufa a vácuo por 24h a 60°C. Após esse período, esperou-se esfriar, o conjunto foi novamente pesado e então levado para a mufla na qual ficou por 8h a 550°C. A porcentagem de cinzas foi obtida segundo a equação:

$$\% \text{ Cinzas} = \frac{(\text{massa inicial} - \text{massa final})}{\text{massa inicial}} \cdot 100 \quad (4.6)$$

Acidez titulável

A acidez total titulável foi determinada segundo CARVALHO *et al.* (1990). Para determinar a acidez total titulável foi pesado 5g de uvas maceradas em almofariz de porcelana que em seguida foram dissolvidos em 100 ml de água destilada em balão de vidro. A mistura foi agitada vigorosamente a fim de homogeneizar a amostra. Uma alíquota de 5ml da amostra foi transferida para um Erlenmeyer, diluída em 30 ml de água e acrescentada 3 gotas de fenolftaleína 0,1M. A titulação foi com solução de hidróxido de sódio 0,1N, previamente padronizada com solução de biftalato de potássio, até que a primeira coloração rósea clara perdurasse por 30 segundos. A acidez foi calculada através da equação (4.7) e os resultados expressos em porcentagem de ácido tartárico.

$$\% \text{ de \u00c1cido Tart\u00e1rico} = \frac{V f N PE}{P} \quad (4.7)$$

na qual:

V = volume de NaOH gasto na titula\u00e7\u00e3o em mL,

f = fator de corre\u00e7\u00e3o da solu\u00e7\u00e3o de NaOH,

N = normalidade do NaOH,

P = massa de amostra em g e

PE = peso em equivalente grama do \u00e1cido tart\u00e1rico (75,04).

Determina\u00e7\u00e3o de pH

Uma amostra de 5g de uvas maceradas em almofariz de porcelana foi utilizada para determinar o pH. A metodologia utilizada foi a descrita pela AOAC (1999). A leitura foi realizada em pHmetro digital da marca Marconi.

Teor de s\u00f3lidos sol\u00faveis (\u00b0Brix)

O teor de S\u00f3lidos Sol\u00faveis foi realizado num refrat\u00f4metro port\u00e1til, modelo EEQ9029 da marca Edutec.

Com o aux\u00edlio de pipetador descart\u00e1vel colocou-se algumas gotas de uvas maceradas sobre o prisma inferior do refrat\u00f4metro. Aguardaram-se alguns segundos para que o l\u00edquido entrasse em equil\u00edbrio t\u00e9rmico com o prisma. Procurou-se lentamente na ocular a linha de separa\u00e7\u00e3o entre a regi\u00e3o iluminada e a escura, usando para isto o bot\u00e3o de varia\u00e7\u00e3o de \u00e2ngulo. Com a linha de separa\u00e7\u00e3o bem n\u00edtida procedeu \u00e0 leitura do grau Brix.

4.2. C\u00e1lculo das propriedades f\u00edsicas da uva a partir da an\u00e1lise centesimal

Como j\u00e1 foi mostrado no Cap\u00edtulo 3, uma op\u00e7\u00e3o para o c\u00e1lculo das propriedades f\u00edsicas de alimentos \u00e9 utilizando a composi\u00e7\u00e3o qu\u00edmica desses alimentos. De ASHRAE (2006) pode-se obter equa\u00e7\u00f5es do calor espec\u00edfico e condutividade t\u00e9rmica para componentes como \u00e1gua, lip\u00eddios, prote\u00ednas, carboidratos, cinzas e fibras. Essas correla\u00e7\u00f5es bem como \u00e9 feito o c\u00e1lculo das propriedades s\u00e3o mostradas a seguir.

4.2.1. Calor específico variando com a temperatura

As equações utilizadas para o cálculo do calor específico ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$) de cada componente centesimal foram apresentadas no Capítulo 3 e dadas pelas equações (3.3), (3.4), (3.5) e (3.6).

O cálculo do calor específico da uva é feito segundo a equação (4.8), na qual c_i é o calor específico de cada componente, equações (3.3), (3.4), (3.5) e (3.6), e x_i é sua fração mássica correspondente presente na uva, obtida através da caracterização centesimal da matéria prima, e c é o calor específico total da uva, dado em $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

$$c = \sum (c_i x_i) \quad (4.8)$$

4.2.2. Condutividade térmica pela variação da temperatura

Foram utilizadas para o cálculo da condutividade térmica baseada nos componentes físicos da uva Crimson, as equações (4.9), (4.10), (4.11) e (4.12). A temperatura para o cálculo foi dada em Kelvin.

$$\lambda_{\text{água}} = 0,57109 + 1,7625 \cdot 10^{-3} \cdot T_p - 6,7036 \cdot 10^{-6} \cdot T_p^2 \quad (4.9)$$

$$\lambda_{\text{carboidratos}} = 0,20141 + 1,3874 \cdot 10^{-3} \cdot T_p - 4,3312 \cdot 10^{-6} \cdot T_p^2 \quad (4.10)$$

$$\lambda_{\text{fibra}} = 0,18331 + 1,2497 \cdot 10^{-3} \cdot T_p - 3,1683 \cdot 10^{-6} \cdot T_p^2 \quad (4.11)$$

$$\lambda_{\text{cinza}} = 0,32962 + 1,4011 \cdot 10^{-3} \cdot T_p - 2,9069 \cdot 10^{-6} \cdot T_p^2 \quad (4.12)$$

Após obtenção das equações de cada um dos componentes pode-se calcular a condutividade térmica para a uva Crimson dada pela equação (4.13), na qual λ_i é a condutividade térmica do componente i ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) é x_i^v é a fração de volume do componente i dada pela equação (4.14) e λ é dado em $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

$$\lambda = \frac{1}{\sum (x_i^v / \lambda_i)} \quad (4.13)$$

$$x_i^v = \frac{x_i/\rho_i}{\sum(x_i/\rho_i)} \quad (4.14)$$

4.2.3. Densidade pela variação da temperatura

A densidade da uva Crimson pode ser calculada a partir da densidade dos seus componentes centesimais. As equações para a densidade dos componentes i são apresentadas pelo conjunto de equações dado por (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18).

$$\rho_{\text{água}} = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot T_p - 3,7574 \cdot 10^{-3} \cdot T_p^2 \quad (4.15)$$

$$\rho_{\text{carboidratos}} = 1,5991 \cdot 10^3 - 3,1046 \cdot 10^{-1} \cdot T_p \quad (4.16)$$

$$\rho_{\text{fibra}} = 1,3115 \cdot 10^3 - 3,6589 \cdot 10^{-1} \cdot T_p \quad (4.17)$$

$$\rho_{\text{cinza}} = 2,4238 \cdot 10^3 - 2,8063 \cdot 10^{-1} \cdot T_p \quad (4.18)$$

O cálculo da densidade da uva Crimson é feito segundo a equação (4.19), na qual ρ_i é a densidade de cada componente i e x_i é sua fração mássica correspondente presente na uva Crimson daquele componente i , e ρ é a densidade total da uva Crimson, dada em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

$$\rho = \frac{1}{\sum(x_i/\rho_i)} \quad (4.19)$$

4.3. Cálculo das Isotermas de sorção

A construção das isotermas de umidade foi baseada no método estático gravimétrico proposto por Gabas (1998). Foram utilizadas oito soluções saturadas para produzir valores de umidade relativa (atividade de água) na faixa de 11% a 92,4%. Os sais utilizados e suas respectivas umidades relativas estão presentes na Tabela 4.1. Cada solução salina foi colocada em potes de vidro que foram vedados com plástico filme e armazenados em estufa encubadora a 25°C para garantir o equilíbrio (Figura 4.1). Cerca de 200 mL de solução salina foi acondicionada em cada pote.

Tabela 4.1 – Umidade relativa de equilíbrio para 70 °C (GABAS, 1998)

| Sais | Umidade Relativa |
|-----------------------------------|------------------|
| CuSO ₄ | 0,924 |
| BaCl ₂ | 0,87 |
| K ₂ Cl | 0,795 |
| NaCl | 0,739 |
| Mg(NO ₃) ₂ | 0,458 |
| K ₂ CO ₃ | 0,432 |
| MgCl ₂ | 0,294 |
| LiCl | 0,11 |

A uva foi higienizada com hipoclorito de sódio 5% e em seguida retirou-se as sementes das bagas. Então, a uva foi cortada em fatias finas e uniforme e um grama de amostra foi colocada em recipientes plásticos de 50 mL, previamente higienizados, secos em estufa a 70°C por 24h e tarados. Foram colocados quatro recipientes em cada pote já com as soluções salinas. Três gotas de formol foram colocadas nas amostras a fim de evitar a proliferação de microorganismos. Os recipientes com as amostras foram acondicionados em cima de um suporte de plástico PVC.

Após feita a vedação dos potes os mesmos foram colocados em estufa com circulação de ar a 70°C para garantir a umidade de equilíbrio na temperatura em que a secagem foi realizada. As amostras foram pesadas em balança analítica a cada 5 dias até peso constante.



Figura 4.1 – Potes para teste estático de umidade de equilíbrio

Após atingirem o peso constante foi realizada uma análise de umidade. Desta forma, foram obtidos os valores de umidade de equilíbrio para a uva que foram relacionados com a umidade relativa ou atividade de água do ambiente onde as amostras foram equilibradas.

O ajuste da curva foi realizado no *software* Statistica® versão 7. A avaliação dos melhores ajustes foi efetuada através da análise do coeficiente de determinação do ajuste fornecido pelo programa.

4.4. Secagem em secador de bandeja

4.4.1. Pré-tratamento químico das uvas

No pré-tratamento químico da uva, foi utilizado como agente ativo o azeite de oliva extra virgem da marca Malaguenza com acidez máxima de 0,5%, adquirido em supermercado local, misturado ao carbonato de potássio (K_2CO_3). A concentração de azeite de oliva utilizado foi de 0,5% (p/v) e a de carbonato de potássio de 6% (p/v), ambas foram mantidas fixas. Dissolveu-se a quantidade pré-determinada de carbonato de potássio em água destilada, e sob agitação mecânica o azeite de oliva foi adicionado lentamente. O pré-tratamento das uvas consistiu na imersão das mesmas por dois minutos na emulsão mantida a 50°C.

4.4.2. Descrição do equipamento

Nos ensaios da secagem, utilizou-se uma estufa de bandejas da marca *Ethiktechnology* modelo 400 – 8D 200°C que consiste de:

- Gabinete construído em chapa de aço carbono 1020 com tratamento anticorrosivo e acabamento com pintura eletrostática;
- Sistema de aquecimento por meio de resistências tubulares;
- Câmara interna em aço inox 430;
- Circulação de ar realizada por um ventilador tipo axial, localizado internamente para proporcionar uniformidade da temperatura;
- Temperatura controlada através de um controlador microprocessado (PID) com a utilização de um sensor tipo Pt 100, resolução de 0,1°C;
- Saída de 4 a 20 mA para registro e monitoramento da temperatura via *software*;
- Prateleira aramada em aço inox AISI 304 com chapa perfurada.

Na Figura 4.2, podem ser observados alguns elementos descritos acima como a prateleira aramada de aço inox bem como as saídas de ar (1). A circulação do ar na estufa se dá no sentido das flechas (2). Nesta configuração, caracteriza-se o escoamento paralelo do ar na base e na superfície da amostra.

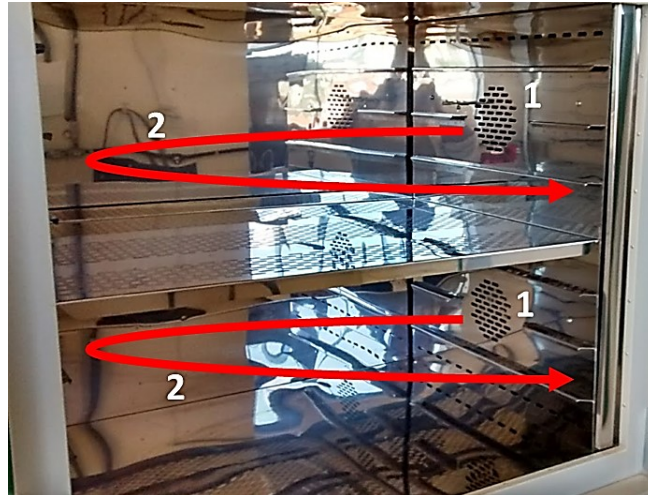


Figura 4.2 – Estufa de secagem com saída de ar (1) e circulação de ar (2)

4.4.3. Descrição do ensaio da secagem

Antes do início de cada ensaio o secador foi colocado na temperatura de 70°C (temperatura de secagem). Primeiramente as uvas foram cortadas dos cachos uma a uma e sua maior dimensão medida com paquímetro para selecionar as bagas com tamanhos aproximados. Em seguida, as bagas foram lavadas em água corrente e higienizadas com solução de hipoclorito de sódio 5%, na qual ficaram imersas por 15 min e, então, foram enxaguadas com água filtrada e colocadas sobre papel absorvente. Posteriormente as bagas foram separadas em 22 fileiras com cinco uvas em cada e o pré-tratamento foi realizado por fileira. As uvas, previamente tratadas foram adicionadas uma a uma na chapa perfurada, caracterizando um retângulo de 60 cm de comprimento por 10 cm de largura. Foram feitas 22 fileiras de uvas e cada fileira continham cinco uvas, totalizando 110 uvas por ensaio (vide Figura 4.3). Bastões de vidro foram utilizados para auxiliar na montagem da geometria e os mesmos foram retirados assim que a bandeja foi colocada na estufa. Cada uva foi medida e tiveram suas massas aferidas após receberem o pré-tratamento e antes de serem acomodadas na estufa.

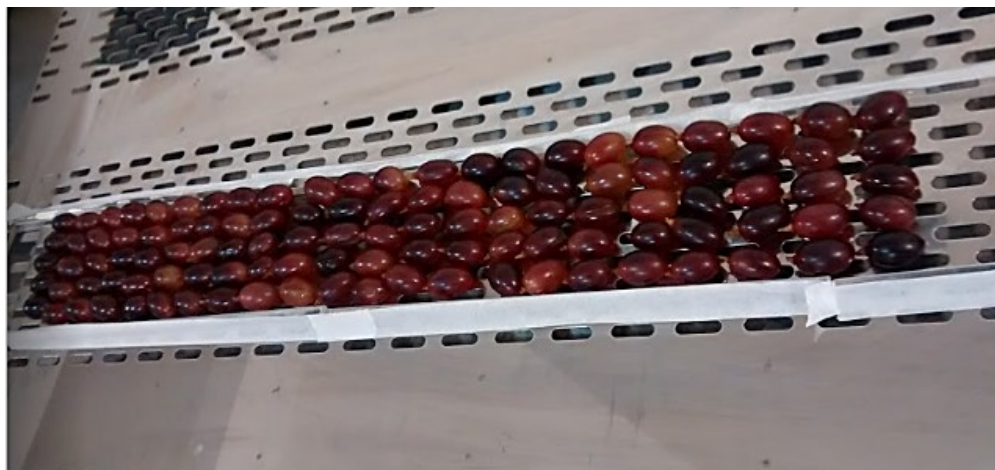


Figura 4.3 – Configuração geométrica das uvas Crimson na bandeja de secagem da estufa com recirculação de ar

Após serem acomodadas no secador, iniciou-se a contagem do período de secagem, que totalizou 16h. Durante as 5 primeiras horas e as 5 horas finais da secagem, foram retiradas fileiras com as cinco uvas a cada meia hora. Em cada amostragem, foi lida a temperatura das bagas com termômetro digital infravermelho, e suas dimensões características medidas por meio de paquímetro digital, além de suas massas aferidas em balança analítica. Após análise as uvas foram retornadas para seu local dentro da estufa para não interferir na geometria inicial da secagem. A umidade em cada amostragem foi realizada por meio da Equação (4.1), com o valor da massa final obtida em estufa a 60°C por 24h.

O ensaio da secagem foi realizado em triplicata e em dois deles foram retirados pontos iniciais e finais (amostragens a cada meia hora durante as cinco primeiras e últimas horas) e um terceiro ensaio foi realizado para obtenção dos pontos intermediários da curva, os quais foram amostrados a cada 1h e 30 min, sendo realizado as mesmas análises de temperatura, dimensão e massa das bagas.

Após a secagem as amostras foram acondicionadas em potes plásticos previamente limpos com álcool 70% para análises posteriores.

4.5. Estudo da variação de propriedades físicas durante a secagem

4.5.1. Densidade

Para obtenção da densidade da uva foi realizado um ensaio separado, porém a preparação da amostra foi a mesma realizada para os ensaios da secagem.

Utilizou-se o método do volume deslocado com provetas descrito por Mata *et al.* (2005) para a medição da densidade, o qual consiste em avaliar o volume de fluido deslocado quando a massa analisada é adicionada a um volume específico. O fluido utilizado para o método foi a água. Gabas (1998) utilizou uma bureta adaptada descrita por Zogzas (1996) para o cálculo do volume deslocado e como fluido utilizou-se água.

No teste, foram três retiradas de amostras a cada uma hora até o final das 16 horas de secagem. Cada amostra teve sua massa aferida e em seguida foram colocadas numa proveta de 30 mL para que o volume deslocado pudesse ser aferido. No início da secagem, devido ao tamanho das amostras foi utilizado uma proveta de 50 mL. Com a massa de cada baga e o volume deslocado a densidade pode ser calculada.

Os dados obtidos experimentalmente foram analisados pela Equação (4.20), a qual avalia a densidade com a variação da umidade. Os parâmetros obtidos por essa equação são ρ_s e β , isto é, a densidade do sólido seco e o coeficiente de encolhimento, respectivamente.

$$\rho = \frac{\rho_s (1 + X)}{(1 + \beta X)} \quad (4.20)$$

4.5.2. Encolhimento

A geometria de uma uva pode ser aproximada pela forma oblato esferoidal, cujas dimensões características são apresentadas na Figura 4.4 a, na qual o eixo “a” é o eixo maior, o “b” é o eixo médio e “c” é o menor eixo. Foram realizadas medidas do comprimento do eixo médio (M) e do maior eixo (L) no decorrer da secagem, para fins de observação da dimensão do encolhimento em cada uma dessas direções. O encolhimento da uva foi calculado pela medida do comprimento do eixo médio (M) e do maior eixo (L), conforme apresentado na Figura 4.4 b.

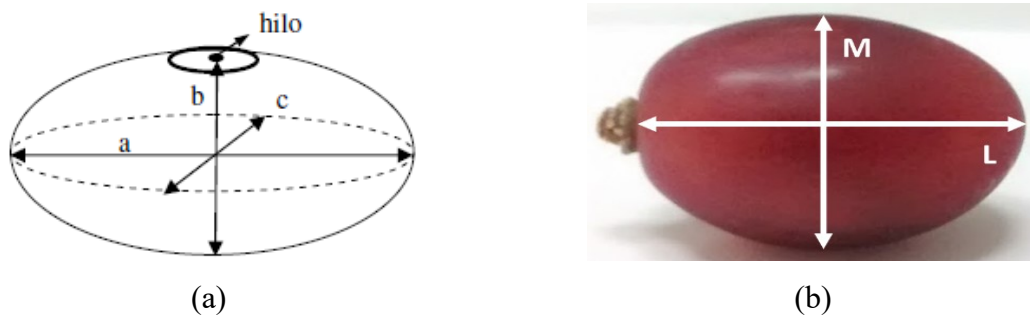


Figura 4.4 – Dimensões características da uva

Essas medidas das dimensões características M e L foram realizadas para as amostras de 5 uvas retiradas periodicamente durante o tempo da secagem. No primeiro experimento, as medidas foram feitas em intervalos de 30 minutos durante as cinco horas iniciais da secagem. Nas cinco horas seguintes, as medidas foram feitas em intervalos de 1,5 horas. No período final, as medidas foram feitas em intervalos de 30 minutos. Nos demais experimentos da triplicata, as medidas foram feitas a cada 30 minutos nas cinco horas iniciais e nas cinco horas finais, uma vez que o primeiro experimento mostrou que a variação destas dimensões não era significativa no período intermediário da secagem.

4.6. Resultados experimentais para determinação das propriedades da uva Crimson

4.6.1. Composição da matéria prima

Os resultados da caracterização da uva Crimson feita realizando-se análises de carboidratos redutores, fibra, umidade, sólidos solúveis totais, cinzas, acidez, lipídios, proteínas e grau Brix estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Caracterização química da uva Crimson utilizada nos experimentos.

| Análises | Valor (%) |
|--------------------------------------|-----------|
| Umidade (base úmida) | 80,48 |
| Lipídios | ND |
| Proteína | ND |
| Carboidratos Redutores | 17,74 |
| Fibra | 0,93 |
| Cinzas | 0,62 |
| °Brix | 15,00 |
| pH | 3,88 |
| Acidez (expressa em ácido Tartárico) | 0,35 |

ND = não detectado

Gabas (1998) caracterizou a uva Itália e encontrou o valor de 14 °Brix e 0,64% de acidez. Os valores de umidade, carboidratos, fibra e cinzas encontrados para a uva Itália foram

83,89%, 11,65%, 1,70% e 0,35%, respectivamente. De acordo com ASHRAE (2006), uvas americanas possuem 81,30% de umidade, 17,15% de carboidratos, 1,00% de fibras e 0,57% de cinzas, e uvas do tipo europeias 80,56% de umidade, 17,77% de carboidratos, 1,00% de fibras e 0,44% de cinzas.

Conforme essas referências, pode-se concluir que as análises realizadas e os métodos adotados estão adequados e foram suficientes para a obtenção da composição centesimal da uva. Lipídios e Proteínas não foram detectados pelos métodos utilizados por serem encontrados em baixíssimas quantidades ou não existirem em uvas.

4.6.2. Cálculo das propriedades físicas da uva a partir da análise centesimal

Após a avaliação da composição centesimal observa-se que não foram detectados valores para proteínas e lipídios na uva Crimson. Dessa forma, a análise da variação da densidade, da condutividade térmica e do calor específico para esse tipo de uva foi calculada a partir das equações da água, carboidratos, cinza e fibras. A Tabela 4.3 traz os componentes resultado da análise centesimal bem como os seus valores de frações mássicas.

Tabela 4.3 – Frações mássicas dos componentes da uva Crimson

| Componente | x_i |
|--------------|--------|
| Umidade | 0,8048 |
| Carboidratos | 0,1774 |
| Fibra | 0,093 |
| Cinzas | 0,062 |

A faixa de temperatura utilizada para o cálculo foi de 31°C referente à temperatura inicial da uva Crimson até 60°C, temperatura final da uva no período da secagem. Os resultados dessa análise para o calor específico, condutividade térmica e densidade podem ser observados na Figura 4.5, Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

A dependência do calor específico com a temperatura pode ser calculada pela Equação (4.8) e na Figura 4.5 pode-se observar a variação desse parâmetro com a temperatura. A Equação (4.21) foi obtida por regressão utilizando os valores estimados a partir da composição centesimal.

$$c = 3821,6 - 1,4898 T_p(K) + 3,2849 \cdot 10^{-3} \left(T_p(K) \right)^2 \quad (4.21)$$

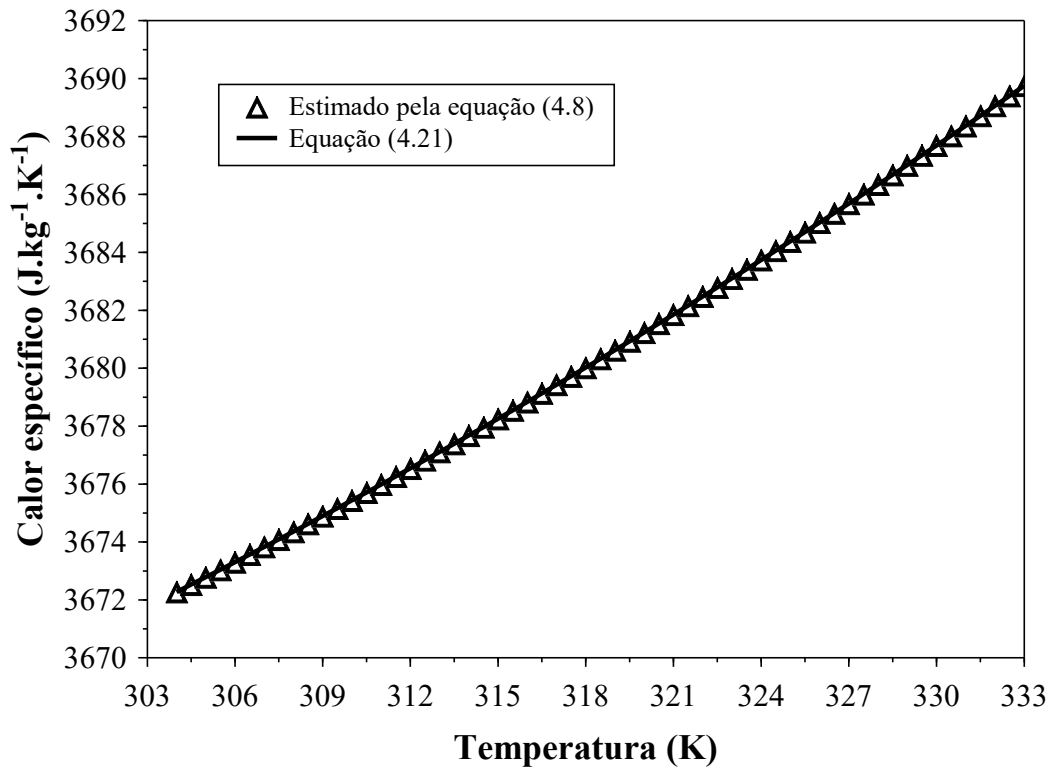


Figura 4.5 – Variação do calor específico da uva Crimson

A Figura 4.6, mostra a curva obtida a partir das Equações (4.13) e (4.14) utilizando a condutividade térmica de carboidratos, cinzas, fibras e água. Observa-se que a condutividade térmica aumenta com o aumento da temperatura. Esse comportamento pode ser comparado com a da Figura 3.5, que avalia a variação da condutividade térmica com a umidade e com a temperatura, e nela pode ser visto esse aumento. Foi realizada uma regressão dos dados obtidos pelas Equações (4.13) e (4.14) e a equação encontrada é mostrada pela Equação (4.22).

$$\lambda = -0,5504 + 5,5307 \cdot 10^{-3} T_p(K) - 6,7 \cdot 10^{-6} \left(T_p(K) \right)^2 \quad (4.22)$$

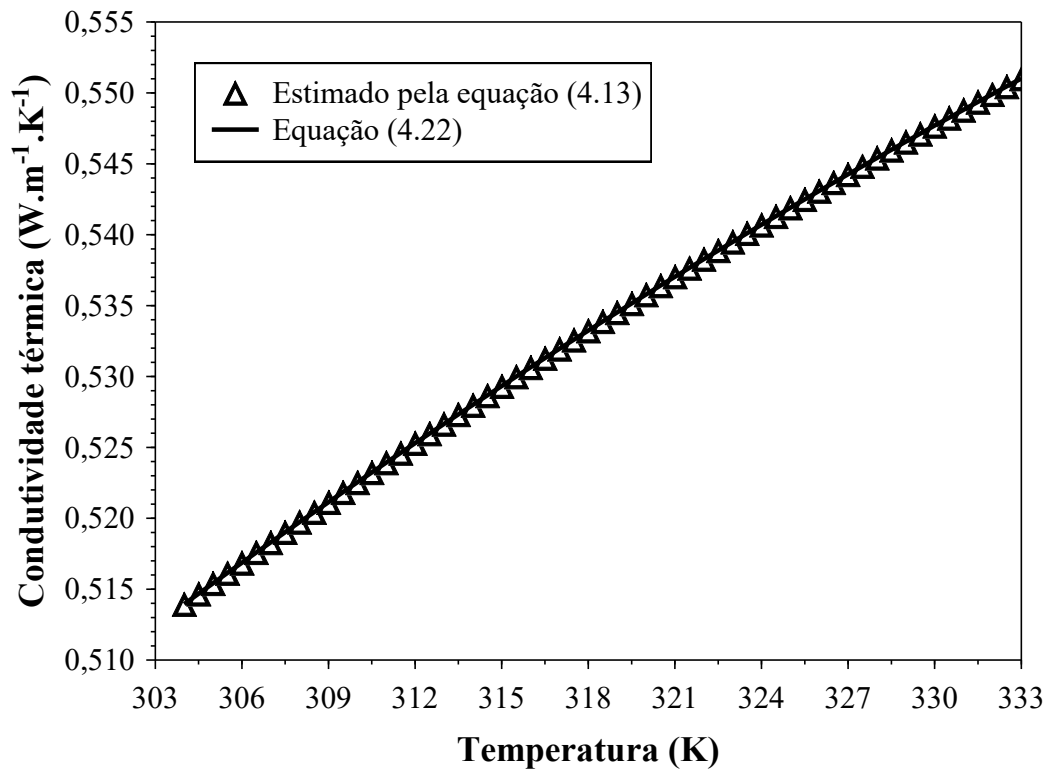


Figura 4.6 – Variação da condutividade térmica da uva Crimson

Os valores obtidos pela Equação (4.19) para a densidade da uva Crimson a partir da análise centesimal da mesma podem ser observados na curva preta apresentada na Figura 4.7. Observa-se que a variação da densidade é inversamente proporcional ao aumento da temperatura, ou seja, a densidade diminui. Também foi realizada a regressão dos dados dada pela Equação (4.23).

$$\rho = 821,1755 + 1,9058 T_p(K) - 3,5355 \cdot 10^{-3} \left(T_p(K) \right)^2 \quad (4.23)$$

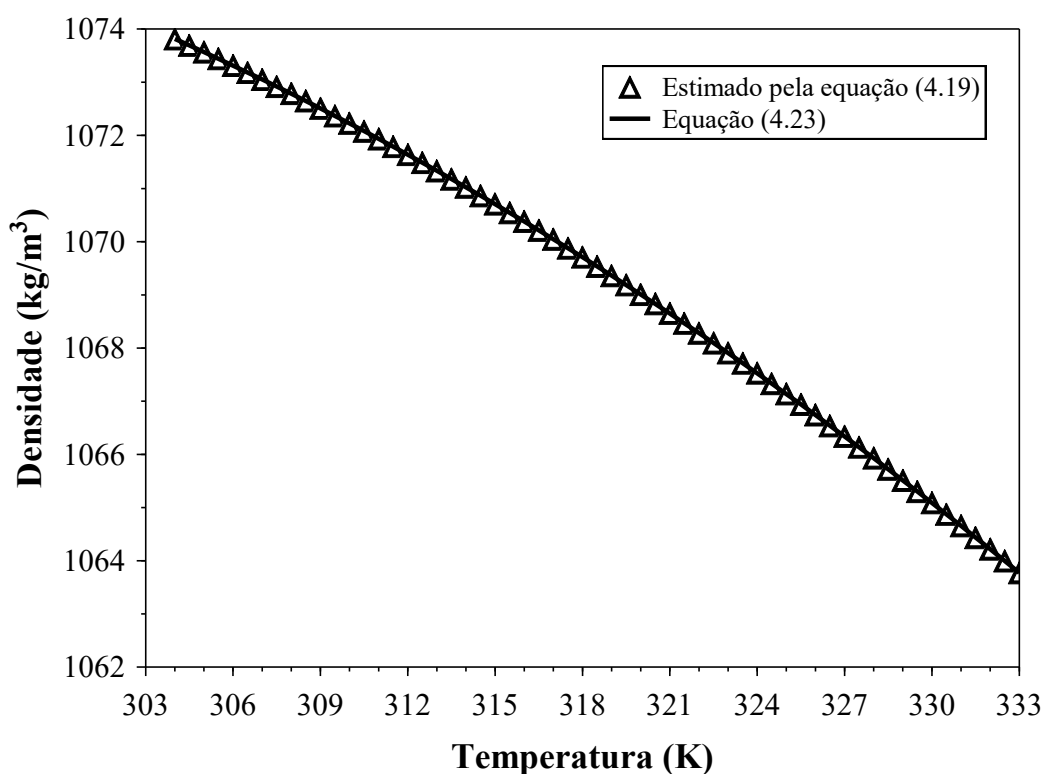


Figura 4.7 – Variação da densidade da uva Crimson calculada pela sua composição centesimal

4.6.3. Isotermas de Equilíbrio

Na Tabela 4.4, estão apresentados os valores para o coeficiente de correlação de cada modelo de isoterma de equilíbrio estudado nesse trabalho. Os parâmetros foram ajustados pelo *software* Statistica[®] versão 7.

Tabela 4.4 – Coeficiente de correlações para os modelos de isotermas de equilíbrio

| Modelo | r^2 |
|----------------------|--------|
| GAB | 0,9934 |
| Oswin | 0,9891 |
| Halsey | 0,9944 |
| Henderson | 0,9786 |
| Henderson Modificado | 0,9786 |

Da Tabela 4.4, observa-se que os valores para o coeficiente de correlação dos modelos GAB e Halsey estão em próximos, 0,9934 e 0,9944, respectivamente. Para uma análise mais completa de qual é o melhor modelo de isotermas de equilíbrio que descreve os dados experimentais, uma análise da distribuição de resíduos foi realizada. Dessa análise observou-se

que os resíduos estavam melhor distribuídos no modelo GAB, logo esse modelo representa melhor os dados experimentais. As demais distribuições de valores preditos versus resíduos estão presentes no Apêndice A.

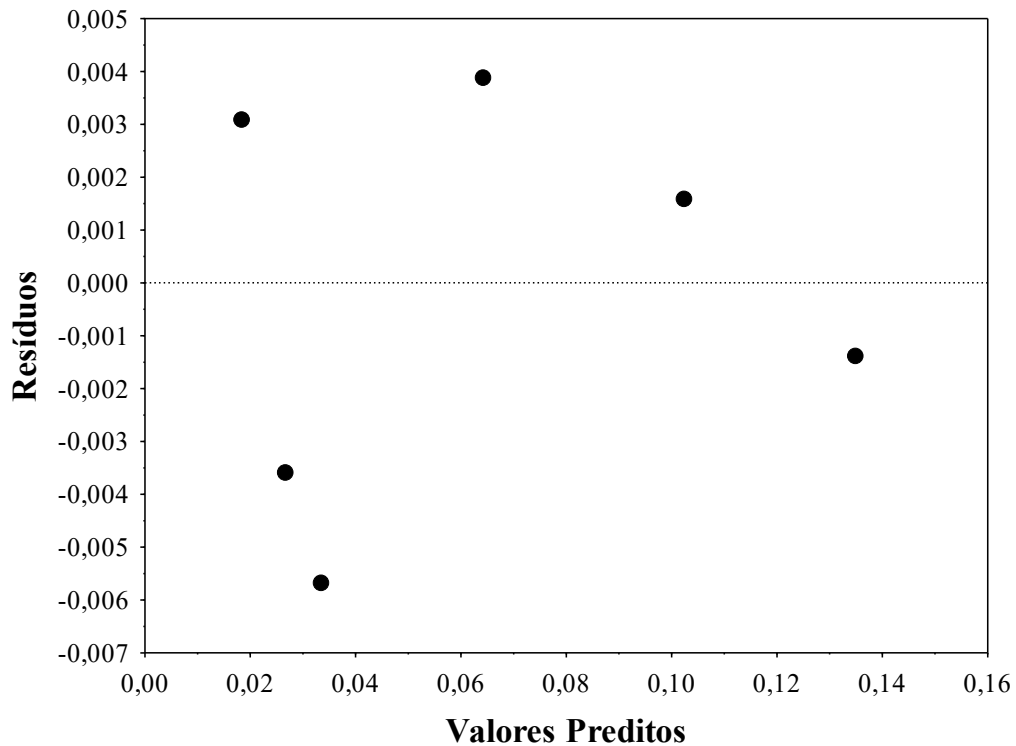


Figura 4.8 – Distribuição de resíduos do modelo GAB

Na Figura 4.9, pode-se observar a curva ajustada para todos os modelos estudados.

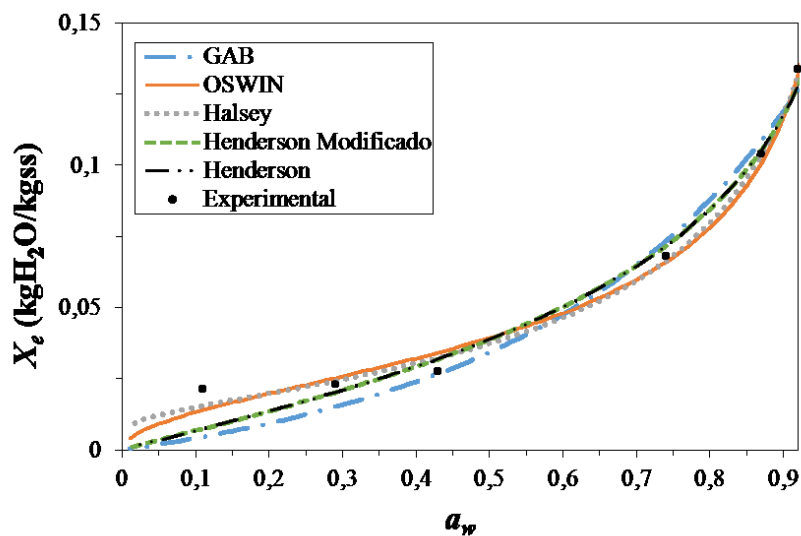


Figura 4.9 – Correlações para estimativa da umidade de equilíbrio

Ao final da secagem, as uvas-passas apresentaram atividade de água (a_w) igual a $0,479 \pm 0,006$. Dessa forma, observando a Figura 4.9, obtem-se $0,03 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$ para a uva-passa do tipo Crimson. Gabas (1998), utilizando o modelo GAB para obter a umidade de equilíbrio da uva Itália, encontrou o valor de $0,09 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$ à 70°C . Vagenas *et al.* (1990b), obtiveram um modelo do tipo GAB para umidade de equilíbrio da uva Sultana e como resultado a umidade foi de $0,06 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$ a 70°C .

Observa-se que os valores experimentais encontrados nesse trabalho são inferiores aos referenciados aqui. Isso se deve ao fato de que no experimento de isotermas de equilíbrio, a polpa e a casca da uva não foram separadas, como está apresentado na metodologia proposta por Gabas (1998). Como a casca possui uma atividade de água menor quando comparada com a polpa, aquela demora um tempo maior para entrar em equilíbrio, fazendo com que a umidade de equilíbrio fique baixa.

4.6.4. Secagem em secador de bandeja

4.6.4.1. Pré-tratamento químico da uva

Na Figura 4.10, pode-se observar a característica qualitativa que uma baga de uva adquire após o pré-tratamento realizado com emulsão de azeite de oliva (0,5%) e carbonato de potássio (6%) por dois minutos a 50°C .



Figura 4.10 – Comparação entre uma baga de uva submetida ao pré-tratamento e uma baga *in natura*

Após o pré-tratamento, observa-se rachaduras na casca o que caracteriza a redução da barreira efetiva de cera presente na casca que impede a desidratação e deterioração de sua textura. A presença dessas rachaduras indica que a umidade presente na uva irá sair preferencialmente e com mais facilidade por elas durante a secagem ao invés de sair pela casca e, assim, pode-se concluir que a perda de água se dá na direção longitudinal da uva.

4.6.5. Umidade

A umidade inicial encontrada na uva foi 4,07 kg H₂O/kg s.s. para valores médios obtidos com os dados das três secagens realizadas, e ao final da secagem as uvas encontraram-se com 0,13 kg H₂O/kg s.s. Gabas (1998) encontrou uma diminuição média de 4,263 kg H₂O/kg s.s. para 0,112 kg H₂O/kg s.s. em 60 h de secagem para uma carga de 1000 g de uva Itália acondicionadas em badeiras perfuradas. Teles *et al.* (2015) obteve um teor final de 0,1301 de umidade na uva Crimson após 24 h de processo e conclui que esse tempo de secagem foi longo pois as amostras não haviam passado pelo pré-tratamento. O comportamento pode ser observado na Figura 4.11.

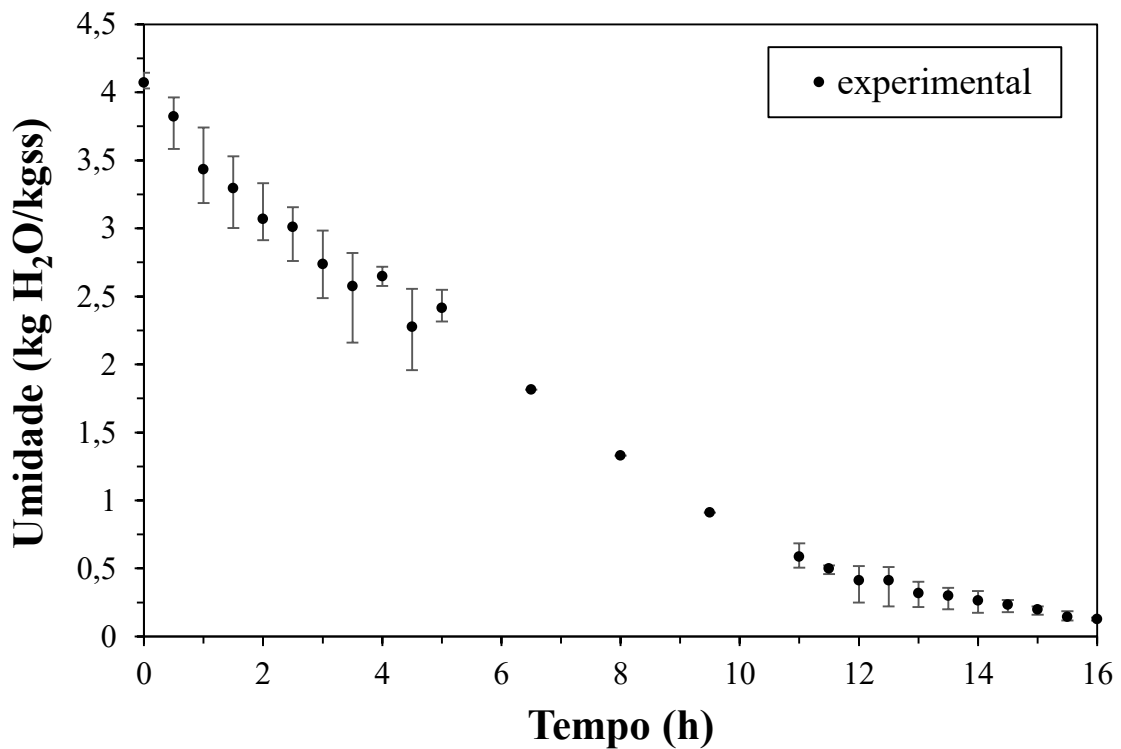


Figura 4.11 – Teor de umidade das uvas Crimson obtidos experimentalmente

Para avaliar o perfil de umidade ao longo do tempo foram utilizados seis modelos de cinética de secagem encontrados na literatura. O melhor ajuste foi analisado pelo valor do r^2 , isto é, do coeficiente de correlação e pela distribuição de resíduos *versus* valores predito. O ajuste foi realizado pelo *software* Statistica versão 7 e os valores obtidos são mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Coeficiente de correlação para os modelos de cinética de secagem

| Modelo | Referência | r^2 |
|-------------------|--------------------------------|--------|
| Verna | Johann <i>et al.</i> (2016) | 0,9970 |
| Newton | Lewis (1921) | 0,9798 |
| Page | Page (1949) | 0,9920 |
| Henderson e Pabis | Henderson e Pabis (1961) | 0,9827 |
| Overhults | Overhults <i>et al.</i> (1973) | 0,9920 |
| Dois Termos | Henderson (1974) | 0,9827 |

Da tabela, observa-se que o modelo Verna apresentado por Johann *et al.* (2016) apresenta o melhor resultado estatístico com r^2 superior aos valores encontrados para esse mesmo parâmetro para os outros modelos analisados.

A análise de resíduos *versus* valores preditos também foi realizada para todos os modelos e é apresentada no Apêndice B. Na Figura 4.12, é apresentada a distribuição dos resíduos obtido pelo modelo Verna, na qual observa-se boa distribuição de resíduos, justificando o maior r^2 .

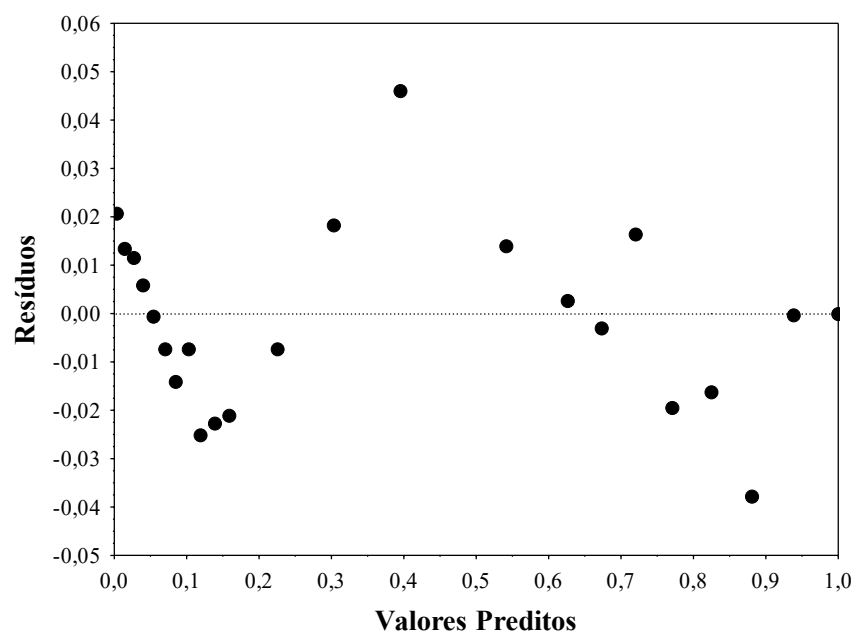


Figura 4.12 – Distribuição de resíduos do modelo Verna

Na Figura 4.13, observa-se o decaimento da umidade adimensional presente na uva ao longo das 16 h de secagem, bem como os ajustes feitos pelos seis modelos de cinética de secagem.

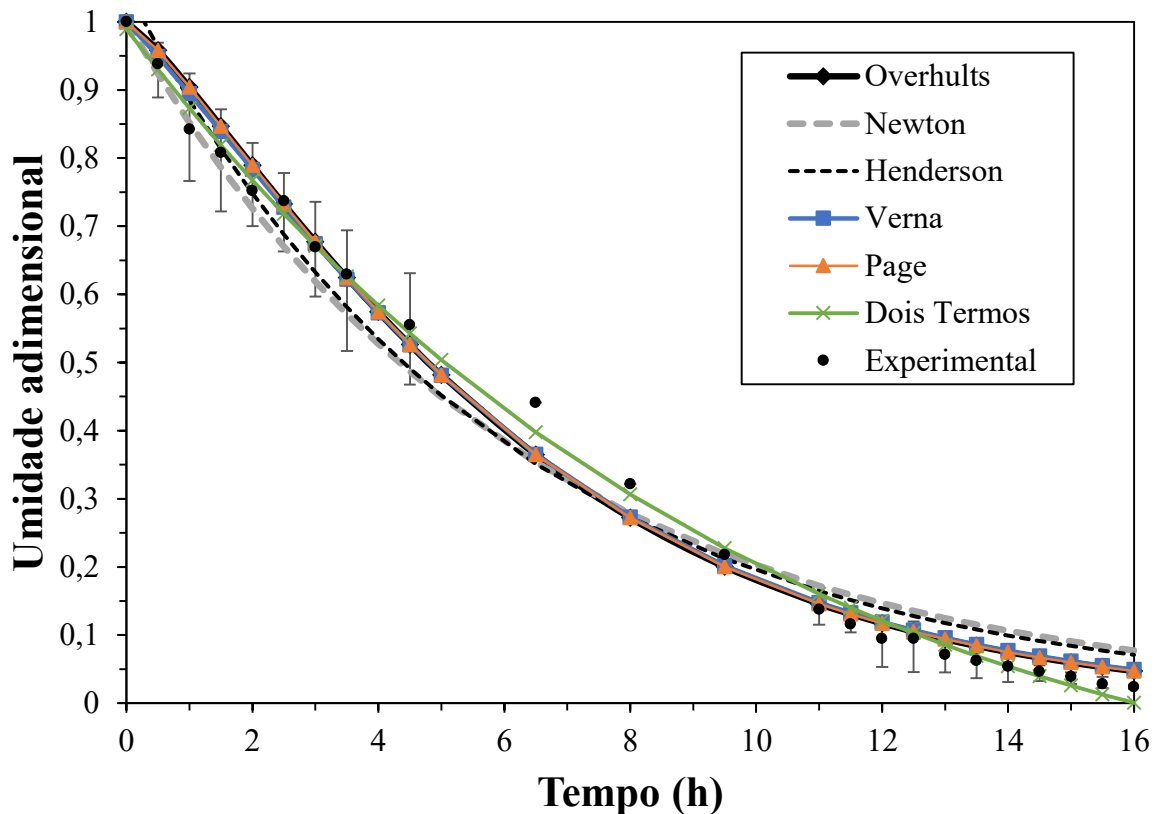


Figura 4.13 – Curva de secagem da uva Crimson para temperatura do ar a 70°C em estufa de circulação

4.6.6. Encolhimento

Após análise dos dados de comprimento do eixo médio (M) e eixo maior (L) da baga ao longo do tempo de secagem, pode-se concluir que o encolhimento ao longo do eixo médio é superior ao encolhimento ao longo do eixo maior.

A Figura 4.14 apresenta as uvas decorridas cinco horas de secagem, onde já se observa a diminuição do seu volume, mas sem evidência clara da direção em que ocorre o encolhimento. A Figura 4.15 mostra a comparação entre uma baga *in natura* com uma baga após dezesseis horas de secagem e nela pode-se notar que o encolhimento na direção vertical é mais expressivo. Esse comportamento foi representado por Vagenas *et al.* (1990b) em sua modelagem quando considera o encolhimento apenas em uma direção (vertical).



Figura 4.14 – Uvas-passas após cinco horas de secagem



Figura 4.15 – Comparação das dimensões características de bagas de uva *in natura* e seca

Na Figura 4.16, é apresentado a variação do eixo médio da uva Crimson ao longo da secagem. O desvio padrão em cada ponto da curva também foi calculado e representado pelas barras de desvio. A variação do encolhimento com o tempo de secagem (t) pode ser expressa pela Equação (4.24) com $R^2 = 0,9945$, isto é, 99,45% dos dados experimentais podem ser descritos por essa equação. A curva obtida pela Equação (4.24) também pode ser vista nessa figura.

$$M = 1,744 \cdot 10^{-2} - 1,113 \cdot 10^{-3} t + 1,9 \cdot 10^{-5} t^2 \quad (4.24)$$

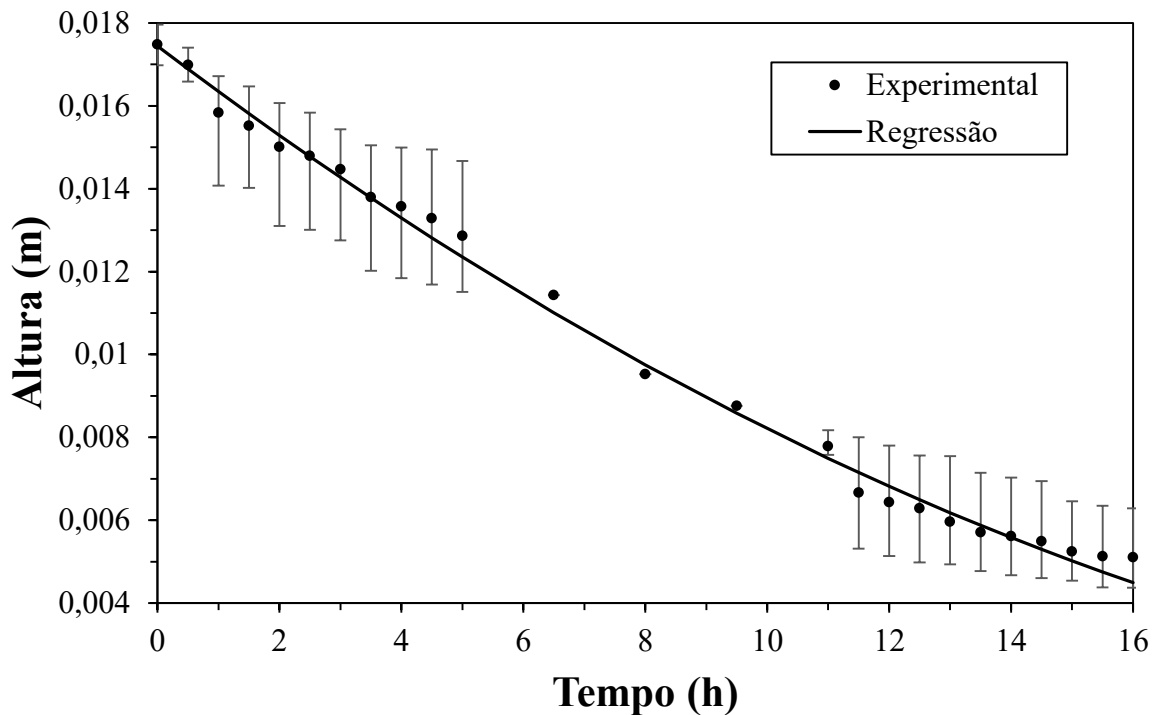


Figura 4.16 – Variação da altura da uva Crimson ao longo da secagem

Analisando a Figura 4.16, observa-se que o encolhimento do eixo médio foi de inicialmente 0,0175 m para 0,0051 m que representa 29,14% do diâmetro inicial das bagas. Teles *et al.* (2015) analisou uma diminuição do eix médio das bagas da uva Crimson de 0,01702 m para 0,00351 m após 24h de secagem em secador convectivo. Assim, pode-se concluir que o encolhimento obtido experimentalmente nesse estudo está de acordo com os dados da literatura.

Sabe-se que o encolhimento está relacionado com a variação de volume do material alimentício que diminui com a redução da umidade inicial, ou seja, conforme a umidade vai sendo removida há uma compressão do volume da amostra. Carmo *et al.* (2005) desenvolveram uma equação para o cálculo do volume ao longo do tempo de secagem a partir dos dados de (L) e de (M) para a lentilha, dada pela Equação (4.25). A configuração da lentilha foi considerada oblato esferoidal.

$$V(t) = \frac{4}{3} \frac{M}{2} \frac{L^2}{2} \quad (4.25)$$

na qual:

L = maior eixo, m

M = eixo médio, m

$V(t)$ = volume da amostra naquele ponto, m³

Com os dados do maior eixo (L) e do eixo médio (M) da uva Crimson medidos ao longo da secagem, o volume pôde ser calculado e foi obtida a curva mostrada pela Figura 4.17. Fez-se uma regressão dos dados experimentais e a equação (4.26) foi encontrada com $R^2=0,9901$ que representa 99,01% dos dados experimentais.

$$\frac{(V(t) - V_0)}{(V_f - V_0)} = 0,1001 + 0,9104 \frac{(X_0 - X(t))}{(X_0 - X_f)} \quad (4.26)$$

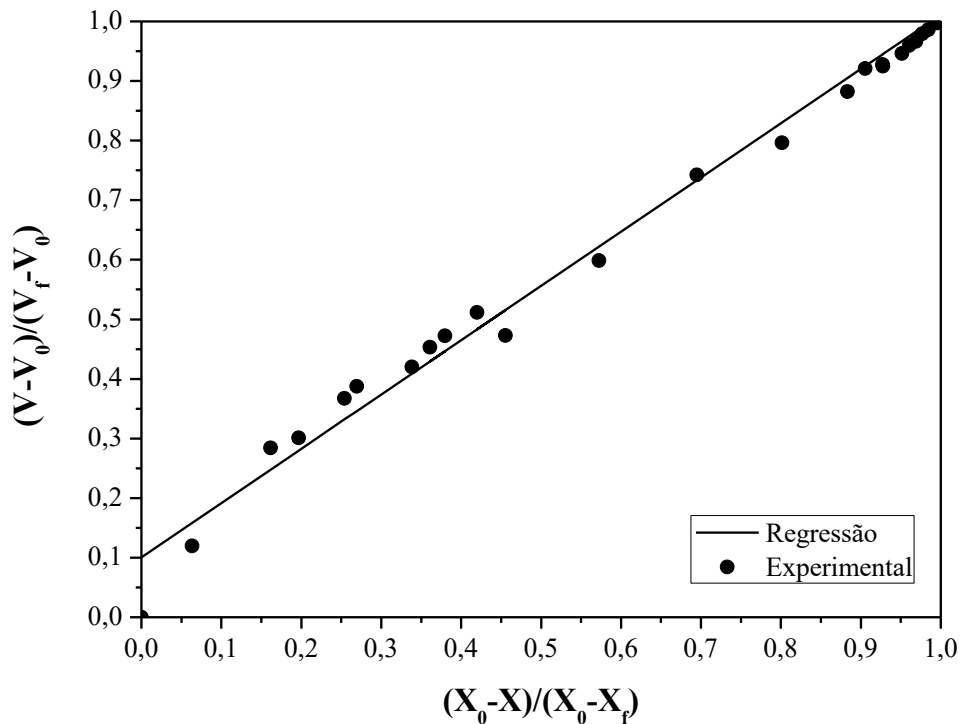


Figura 4.17 – Variação do volume adimensional obtido a partir da remoção da umidade da uva Crimson

A Figura 4.17 mostra a variação do volume do material com a remoção da umidade ao longo da curva de secagem. Observa-se um comportamento linear, também observado por Carmo *et al.* (2005) para a lentilha.

4.6.7. Densidade e coeficiente de encolhimento

O cálculo para a densidade foi realizado a partir dos dados de massa e volume obtidos experimentalmente para cada amostra utilizando a Equação (4.27). Após os cálculos realizados a Figura 4.18 foi obtida.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.27)$$

Após regressão dos dados, encontra-se $\rho_s = 1296,67 \text{ kg.m}^{-3}$ e $\beta = 1,4409$ e a Equação (4.28) é obtida, com R^2 igual a 0,9958.

$$\rho = \frac{1296,67 (1 + X)}{(1 + 1,4409X)} \quad (4.28)$$

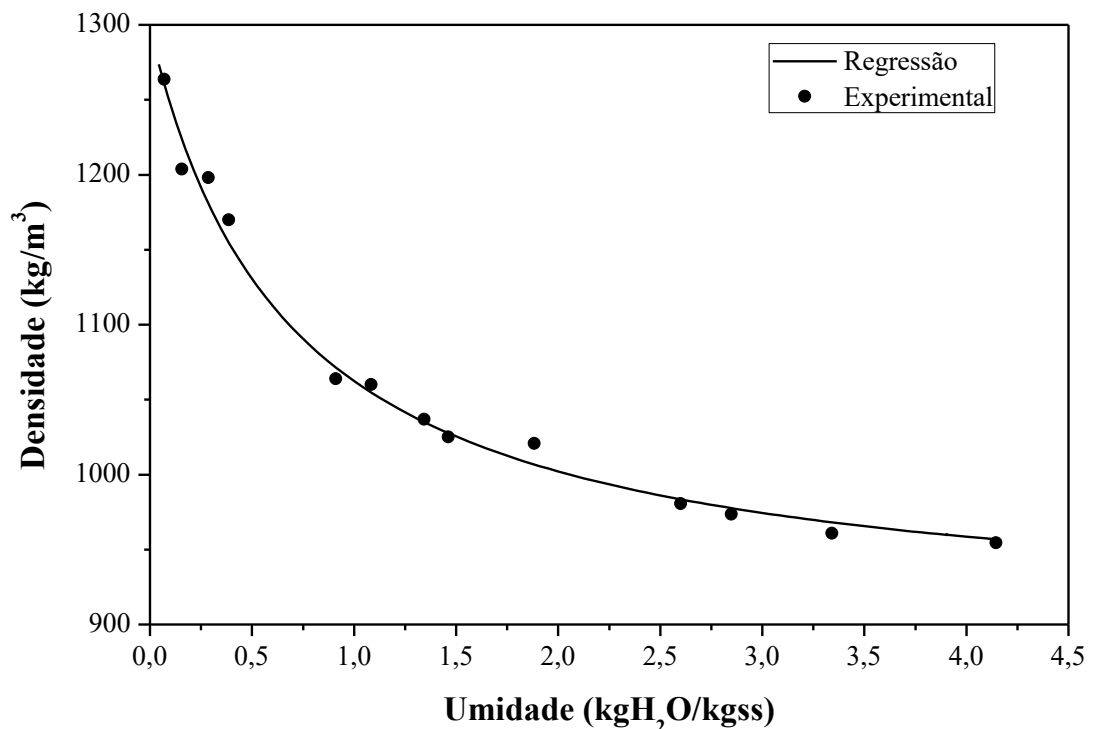


Figura 4.18 – Comportamento da densidade da uva Crimson com a variação da umidade

Da Figura 4.18, observa-se que a densidade do material aumenta com a remoção de água. Isso se deve ao aumento da concentração de sólidos quando a água contida no material é retirada (VAGENAS *et al.*, 1990a). Gabas (1998) apresenta um modelo para o cálculo da

densidade a partir da umidade dado pela Equação (4.20) pelo qual obtêm-se o valor do coeficiente de encolhimento (β) e a densidade do sólido seco (ρ_s), parâmetros que serão necessários para a simulação da secagem da bandeja de uva Crimson.

Gabas (1998) para a uva Itália encontrou o valor de 1556 kg/m^3 para a densidade de sólido seco e 1,325 para o coeficiente de encolhimento da uva Itália submetida à secagem com ar à $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Vagenas *et al.* (1990b) apresentam valores semelhantes para a uva Sultana a $76 \text{ }^\circ\text{C}$, $\rho_s = 1543 \text{ kg.m}^{-3}$ e $\beta = 1,543$.

5. MODELAGEM MATEMÁTICA DA SECAGEM DE UVAS CRIMSON EM BANDEJAS

O modelo desenvolvido por Vagenas *et al.* (1990b) foi aplicado a uma bandeja com dimensões de 0,04 m x 0,3 m com escoamento paralelo do ar com velocidade de 2 m/s. O modelo transiente e unidimensional é formado pelas equações de conservação de massa do sólido seco e da água na fase líquida e na fase vapor, pela equação de conservação de energia e pela equação representativa do encolhimento do material.

As seguintes hipóteses foram adotadas para o desenvolvimento do modelo:

1. A amostra de secagem pode ser tratada do ponto de vista macroscópico;
2. Durante a secagem, o conteúdo úmido, a pressão de vapor parcial e a temperatura estão em equilíbrio termodinâmico com o interior do material de secagem;
3. Nenhuma massa de água é produzida ou consumida durante a secagem.

O modelo de Vagenas *et al.* (1990b) foi aplicado à predição da umidade e da temperatura de uvas da variedade Sultana e nessa dissertação balizará o desenvolvimento de um modelo matemático aplicado a uvas da variedade Crimson, cujas propriedades termo-físicas foram obtidas experimentalmente. As propriedades do ar foram estimadas através de correlações apropriadas.

As equações de conservação de massa e de energia e demais equações constitutivas do modelo matemático proposto são apresentadas em detalhes na sequência.

5.1. Modelagem matemática da secagem das uvas

A Figura 5.1 e a Figura 5.2 representam as uvas *in natura* e as uvas-passas ao final da secagem, conforme dispostas na bandeja perfurada do secador para medição da umidade, temperatura e encolhimento conforme metodologia experimental apresentada no Capítulo 4.

No secador utilizado nos experimentos, a circulação do ar se dá paralelamente às superfícies superior e inferior das uvas, da direita para a esquerda. Enquanto a superfície superior (representada em azul) está totalmente exposta ao ar, a superfície inferior é perfurada, de modo que somente parte das uvas é diretamente exposta ao ar ao mesmo tempo que estão

em contato com a superfície metálica. Observe-se ainda que as uvas apresentam uma simetria indicada pela linha amarela nessas figuras.

O encolhimento das uvas é pronunciado no sentido y e à medida que ocorre, a forma oblata esferoidal original se modifica, a superfície torna-se enrugada e devido à diminuição do seu volume o espaçamento entre elas aumenta.

A representação matemática simplificada desse processo exige que se considere a diminuição da dimensão $l(t)$, que caracteriza o encolhimento preferencial das uvas na direção y .

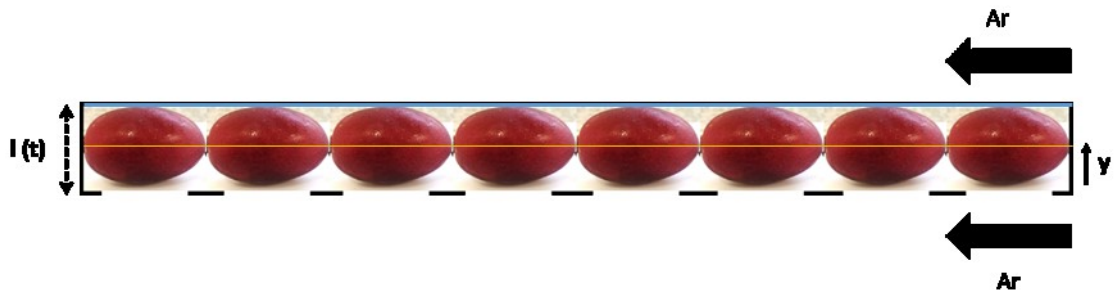


Figura 5.1 – Esquema de disposição das uvas *in natura* dispostas na bandeja perfurada de secagem

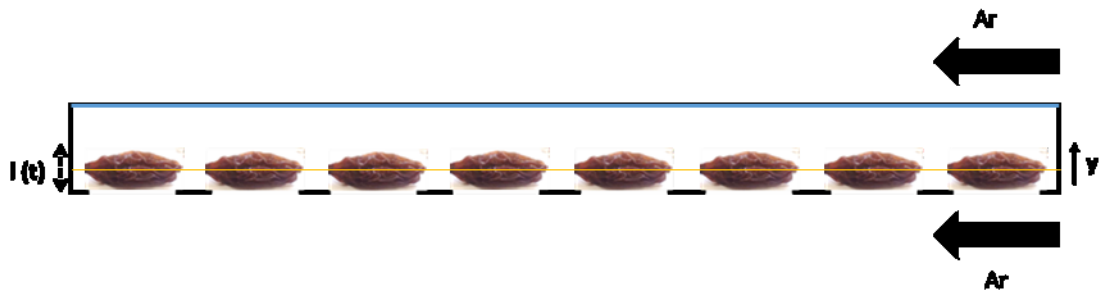


Figura 5.2 – Disposição das uvas-passas ao final da secagem na bandeja perfurada

Nesta dissertação foi utilizada uma abordagem macroscópica para a representação do processo, admitindo que as uvas formam uma torta sólida com propriedades constantes e independentes da umidade e da temperatura, cujo encolhimento ocorre na direção y .

Os balanços de massa para o sólido seco, para a água na fase líquida e na fase vapor, o balanço de energia e a equação constitutiva para predição do encolhimento são apresentados com detalhes na sequência.

Balço de massa no sólido seco

A equação da continuidade de massa do modelo foi desenvolvida considerando que o volume de controle é mantido fixo em relação a um sistema de coordenadas. A Equação (5.1) é o balanço de massa para o sólido seco em termos de concentração de sólido e fluxo.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{1 + \beta X} \right) = -\nabla \cdot \left(\frac{w}{1 + \beta X} \right) \quad (5.1)$$

na qual:

w = velocidade de encolhimento, $m \cdot s^{-1}$

$X = m_a/m_s$ = umidade (kg H₂O/kg bs) = $X(y, t)$

$\beta = \alpha(\rho_s/\rho_a)$ = coeficiente de encolhimento (adimensional)

Balço de massa de água na fase vapor e na fase líquida

As equações do balanço para a água na fase vapor e na fase líquida são mostradas em (5.2) e (5.3), respectivamente.

$$\frac{\partial(\omega_s X_1)}{\partial t} = -\nabla \cdot j_1 + I_1 \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial(\omega_s X_2)}{\partial t} = -\nabla \cdot j_2 + I_2 \quad (5.3)$$

nas quais:

j = fluxo mássico total de substância ligada por unidade de área perpendicular ao escoamento, $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$

I = taxa mássica de produção ou consumo devido à mudança de fase, $kg \cdot m^{-3}$

1 representa o vapor

2 representa o líquido

Sabendo que:

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$X_1 + X_2 = X$$

$$j_1 + j_2 = j$$

Somando-se as Equações (5.2) e (5.3) e encontra-se a equação (5.4):

$$\frac{\partial(\omega_s X)}{\partial t} = -\nabla \cdot j \quad (5.4)$$

Sabendo que:

$$\omega_s = \frac{\rho_s}{1 + \beta X} \quad (5.5)$$

e substituindo a equação (5.5) na equação (5.4), obtém-se a equação (5.6).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\rho_s X}{1 + \beta X} \right) = -\nabla \cdot j \quad (5.6)$$

Como o fluxo mássico total consiste de duas contribuições como mostrado na Equação (5.7).

$$j = j_{diff} + j_{shr} \quad (5.7)$$

na qual:

j_{diff} = fluxo mássico difusivo representado pela transferência de umidade devido à forças termodinâmicas, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

j_{shr} = fluxo mássico de substância ligada devido ao encolhimento, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$

As equações (5.8) e (5.9) apresentam a formulação para o fluxo difusivo e o fluxo de encolhimento, respectivamente.

$$j_{diff} = -\rho_s D_e \nabla X - \rho_s D_e \delta \nabla T \quad (5.8)$$

$$j_{shr} = j_s X = w \omega_s X \quad (5.9)$$

nas quais:

D_e = difusividade efetiva, $m^2.s^{-1}$

δ = coeficiente de gradiente térmico para a transferência de umidade, K^{-1}

j_s = fluxo mássico de sólido seco

w = velocidade de encolhimento, $m.s^{-1}$

ω_s = concentração de sólido seco, $kg.m^{-3}$

Assim, a Equação (5.7) fica:

$$j = -\rho_s D_e \nabla X - \rho_s D_e \delta \nabla T + \frac{\rho_s \cdot w \cdot X}{1 + \beta X} \quad (5.10)$$

Substituindo a Equação (5.10) na Equação (5.6), obtém-se:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1 + \beta X} \right) = \nabla \cdot (D_e \nabla X) + \nabla \cdot (D_e \delta \nabla T) - \nabla \cdot \left(\frac{w \cdot X}{1 + \beta X} \right) \quad (5.11)$$

A Equação (5.11) é o balanço de massa tridimensional para a água na fase vapor e na fase líquida.

Balanço de energia

A conservação da energia parte da aproximação de Luikov e é mostrada na Equação (5.12).

$$\omega_s c \frac{\partial T_p}{\partial t} = -\nabla \cdot j_q + \varepsilon r \rho_s \frac{\partial}{\partial t} (\omega_s X) \quad (5.12)$$

na qual:

j_q = fluxo de calor devido à condução, $W.m^{-2}$

c = calor específico do corpo úmido à uma pressão constante, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

r = calor de vaporização da umidade presente no material, $J.kg^{-1}$. É formado por duas partes: calor de vaporização da água e calor diferencial de adsorção (devido à água ligada dentro do corpo úmido).

ε = critério de mudança de fase, adimensional.

O modelo de Luikov para secagem está baseado em fenômenos de termodifusão. Luikov provou experimentalmente e explicou teoricamente que a migração da umidade, em uma matriz porosa, é causada também pelo gradiente de temperatura, o que lhe permitiu definir um sistema de equações diferenciais acopladas para os campos de temperatura e umidade (GUICON, 1995).

Da equação de Fourier, sabe-se que:

$$j_q = -\lambda \nabla T_p \quad (5.13)$$

na qual:

λ = condutividade térmica efetiva do corpo, $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Substituindo as Equações (5.13) e a equação (5.5) na equação (5.12), têm-se:

$$\frac{c\rho_s}{1 + \beta X} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T_p) + \varepsilon r \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1 + \beta X} \right) \quad (5.14)$$

que é o balanço de energia tridimensional para a bandeja.

Modelagem do encolhimento

A espessura da camada, $l(t)$, decresce continuamente durante a secagem, devido à contração do volume da amostra descrita pela Equação (5.15). Essa equação expressa o fato de que a massa do sólido seco permanece constante durante o processo enquanto a água sai de dentro do corpo sólido.

$$\int_{V(t)} \omega_s dV = m_s \quad (5.15)$$

na qual:

V = volume da amostra, m^3

m_s = massa total de sólido seco, kg

Desenvolvendo a integral de volume nas três dimensões da bandeja, a Equação (5.15) se torna:

$$\int_0^{z_l} \int_0^b \int_0^l \omega_s dy dx dz = m_s \quad (5.16)$$

Sabendo que a concentração de sólidos (ω_s) é constante em relação à dimensão x, e substituindo ω_s (Equação (5.5)), mantendo-se ρ_s constante, obtem-se:

$$\int_0^{z_l} \int_0^l \frac{1}{1 + \beta X} dy dz = \frac{m_s}{\rho_s} \frac{1}{b} \quad (5.17)$$

na qual:

$$\frac{m_s}{\rho_s} = V_s \text{ que é o volume do sólido.}$$

Sabe-se que:

$$V_s = \frac{V}{1 + \beta X} \quad (5.18)$$

então:

$$\int_0^{z_l} \int_0^l \frac{1}{1 + \beta X} dy dz = \frac{V}{1 + \beta X} \frac{1}{b} \quad (5.19)$$

Como, $V = z_l \cdot b \cdot l$, e sabendo que a função também é constante em relação a z, a Equação (5.19), fica:

$$\int_0^l \frac{1}{1 + \beta X} dy dz = \frac{z_l \cdot b \cdot l}{1 + \beta X} \frac{1}{b \cdot z_l} \quad (5.20)$$

Dessa forma, o resultado final desse desenvolvimento pode ser observado na Equação (5.21), que é a variação da concentração de sólido em função da contração do volume da bandeja. Essa equação será utilizada como condição para o cálculo do encolhimento da amostra na bandeja.

$$\int_0^{l(t)} \frac{dy}{1 + \beta X} = \frac{l_{in}}{1 + \beta X_{in}} \quad (5.21)$$

Considerando que o encolhimento ocorre de maneira mais pronunciada ao longo da altura do material colocado na bandeja, o modelo formado pelas equações (5.1), (5.11) e (5.14) pode ser aplicado para a predição da umidade e da temperatura ao longo dessa altura (y), conforme apresentado nas equações (5.22), (5.23) e (5.24)

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{1 + \beta X} \right) = - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{w}{1 + \beta X} \right) \quad (5.22)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1 + \beta X} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_e \frac{\partial X}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_e \delta \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{w \cdot X}{1 + \beta X} \right) \quad (5.23)$$

$$\frac{c \rho_s}{1 + \beta X} \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) + \varepsilon r \rho_s \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{X}{1 + \beta X} \right) \quad (5.24)$$

Admitindo que as propriedades D_e , λ , δ e β são constantes as equações (5.22) a (5.24) tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = -w \frac{\partial X}{\partial y} + \frac{(1 + \beta X)}{\beta} \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.25)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (1 + \beta X)^2 \left(D_e \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + D_e \delta \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) - w \frac{\partial X}{\partial y} - X(1 + \beta X) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.26)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\lambda(1 + \beta X)}{c \rho_s} \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + \frac{\varepsilon r}{c(1 + \beta X)} \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5.27)$$

O modelo matemático formado pelas equações (5.25), (5.26) e (5.27) é reescrito, substituindo a equação (5.25) na equação (5.27) e igualando as equações (5.25) e (5.26). Dessa forma, obtêm-se o conjunto de equações formado por (5.28), (5.29) e (5.30).

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \beta D_e \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \beta D_e \delta \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \quad (5.28)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = (1 + \beta X)^2 \left(D_e \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + D_e \delta \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} \right) - w \frac{\partial X}{\partial y} - X(1 + \beta X) \frac{\partial w}{\partial y} \quad (5.29)$$

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\lambda(1 + \beta X)}{c \rho_s} \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} + \frac{\epsilon r}{c(1 + \beta X)} \left(-w \frac{\partial X}{\partial y} + \frac{(1 + \beta X)}{\beta} \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (5.30)$$

A equação (5.28) foi substituída nas equações (5.29) e (5.30) e em seguida a equação (5.28) foi integrada em y a fim de obter-se a equação da velocidade de encolhimento, resultando nas equações (5.31), (5.32), (5.33) e (5.34) respectivamente:

$$\frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{\epsilon r D_e}{c} \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + \frac{\lambda(1 + \beta X) + \epsilon r \rho_s D_e \delta}{c \rho_s} \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} - \frac{\epsilon r}{c(1 + \beta X)} w \frac{\partial X}{\partial y} \quad (5.31)$$

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_e(1 + \beta X) \frac{\partial^2 X}{\partial y^2} + D_e \delta(1 + \beta X) \frac{\partial^2 T_p}{\partial y^2} - w \frac{\partial X}{\partial y} \quad (5.32)$$

$$w = \beta D_e \left(\frac{\partial X}{\partial y} + \delta \frac{\partial T_p}{\partial y} \right) \quad (5.33)$$

$$\frac{dl}{dt} = -h_m \beta (X|_{\zeta=1} - X_e) \quad (5.34)$$

Definindo as seguintes variáveis adimensionais:

$$\theta_1 = \frac{T_p - T_{in}}{T_f - T_{in}} \quad (5.35)$$

$$\theta_2 = \frac{X_{in} - X}{X_{in} - X_e} \quad (5.36)$$

$$\theta_3 = \frac{w}{w_{ref}} \quad (5.37)$$

$$\zeta = \frac{y}{l(t)} \quad (5.38)$$

As equações de conservação podem ser reescritas conforme as equações (5.39), (5.40), (5.41) e (5.42).

$$\frac{d\theta_1}{dt} = a_{21} \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \zeta^2} + a_{22} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \zeta^2} + a_{23} \theta_3 \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} \quad (5.39)$$

$$\frac{d\theta_2}{dt} = a_{11} \frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \zeta^2} + a_{12} \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \zeta^2} + a_{13} \theta_3 \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} \quad (5.40)$$

$$\theta_3 = a_{31} \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} - a_{32} \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} \quad (5.41)$$

$$\theta_3|_{\zeta=1} = \frac{-h_m \beta}{w_{ref}} (X_{in} - X_e)(1 - \theta_2|_{\zeta=1}) \quad (5.42)$$

Sendo

$$a_{11} = \frac{De\{1 + \beta[X_{in} - \theta_2(X_{in} - X_e)]\}}{l(t)^2} \quad (5.43)$$

$$a_{12} = -\frac{De\delta(T_f - T_{in})\{1 + \beta[X_{in} - \theta_2(X_{in} - X_e)]\}}{l(t)^2(X_{in} - X_e)} \quad (5.44)$$

$$a_{13} = -\frac{w_{ref}}{l(t)} \quad (5.45)$$

$$a_{21} = -\frac{\epsilon r De (X_{in} - X_e)}{c (T_f - T_{in}) l(t)^2} \quad (5.46)$$

$$a_{22} = \frac{\lambda\{1 + \beta[X_{in} - \theta_2(X_{in} - X_e)]\} + \epsilon r De \delta \rho_s}{c \rho_s l(t)^2} \quad (5.47)$$

$$a_{23} = \frac{\epsilon r w_{ref} (X_{in} - X_e)}{c l(t)\{1 + \beta[X_{in} - \theta_2(X_{in} - X_e)]\} (T_f - T_{in})} \quad (5.48)$$

$$a_{31} = \frac{De \delta \beta (T_f - T_{in})}{w_{ref} l(t)} \quad (5.49)$$

$$a_{32} = \frac{De \beta (X_{in} - X_e)}{w_{ref} l(t)} \quad (5.50)$$

As condições iniciais e de contorno associadas ao modelo matemático são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Condições iniciais e de contorno adimensionais do modelo matemático para a secagem de uvas

| Condição | Equações |
|------------------|---|
| $t = 0$ | $\theta_1 = T_{in}$ (5.51) |
| $0 < y < l_{in}$ | |
| $l = l_{in}$ | $\theta_2 = X_{in}$ (5.52) |
| | $\theta_3 = 0$ (5.53) |
| $\zeta = 0$ | $\frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = 0$ (5.54) |
| $t > 0$ | $\frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} = 0$ (5.55) |
| | $\frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} - \frac{\delta(T_f - T_{in})}{(X_{in} - X_e)} \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} - \frac{h_m l(t)}{De} (1 - \theta_2) = 0$ (5.56) |
| $\zeta = 1$ | $\frac{\lambda}{l(t)} \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} + h_q (1 - \theta_1) - \frac{(1 - \varepsilon) r \rho_s h_m (X_{in} - X_e)}{(T_f - T_{in})} (1 - \theta_2) = 0$ (5.57) |
| $t > 0$ | $\theta_3 = a_{31} \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} - a_{32} \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta}$ (5.58) |

Nesta dissertação o modelo matemático apresentado é resolvido numericamente pelo método das Diferenças Finitas, conforme apresentado na próxima seção.

5.2. Metodologia de solução numérica do modelo matemático unidimensional

O sistema formado pelas equações de (5.39) a (5.42), foi discretizado utilizando-se o método das Diferenças Finitas centrais e as condições de contorno em $\zeta=0$ foram discretizadas por Diferenças Finitas a frente e as condições em $\zeta=1$ foram discretizadas por Diferenças Finitas a ré. A discretização utilizada pode ser encontrada em Eberly (2015) e está presente na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Fórmulas de Diferenças Finitas para derivadas de primeira e segunda ordem

| Diferenças Finitas | Equações |
|--------------------|--|
| Central | $\frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} = \frac{\theta_2(i+1) - \theta_2(i-1)}{2\Delta\zeta} \quad (5.59)$ |
| | $\frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} = \frac{\theta_1(i+1) - \theta_1(i-1)}{2\Delta\zeta} \quad (5.60)$ |
| | $\frac{\partial^2 \theta_2}{\partial \zeta^2} = \frac{\theta_2(i+1) - 2\theta_2(i) + \theta_2(i-1)}{\Delta\zeta^2} \quad (5.61)$ |
| | $\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial \zeta^2} = \frac{\theta_1(i+1) - 2\theta_1(i) + \theta_1(i-1)}{\Delta\zeta^2} \quad (5.62)$ |
| Frente | $\left. \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} \right _{\zeta=0} = \frac{-\theta_2(i+2) + 4\theta_2(i+1) - 3\theta_2(i)}{2\Delta\zeta} \quad (5.63)$ |
| | $\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} \right _{\zeta=0} = \frac{-\theta_1(i+2) + 4\theta_1(i+1) - 3\theta_1(i)}{2\Delta\zeta} \quad (5.64)$ |
| Ré | $\left. \frac{\partial \theta_2}{\partial \zeta} \right _{\zeta=1} = \frac{3\theta_2(i) - 4\theta_2(i-1) + \theta_2(i-2)}{2\Delta\zeta} \quad (5.65)$ |
| | $\left. \frac{\partial \theta_1}{\partial \zeta} \right _{\zeta=1} = \frac{3\theta_1(i) - 4\theta_1(i-1) + \theta_1(i-2)}{2\Delta\zeta} \quad (5.66)$ |

O modelo discretizado por Diferenças Finitas resulta no sistema de Equações (5.67) a (5.69).

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_1}{dt} = & a_{21} \left(\frac{\theta_2(i+1) - 2\theta_2(i) + \theta_2(i-1)}{\Delta\zeta^2} \right) \\ & + a_{22} \left(\frac{\theta_1(i+1) - 2\theta_1(i) + \theta_1(i-1)}{\Delta\zeta^2} \right) \\ & + a_{23} \theta_3 \left(\frac{\theta_2(i+1) - \theta_2(i-1)}{2\Delta\zeta} \right) \end{aligned} \quad (5.67)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta_2}{dt} = & a_{11} \left(\frac{\theta_2(i+1) - 2\theta_2(i) + \theta_2(i-1)}{\Delta\zeta^2} \right) \\ & + a_{12} \left(\frac{\theta_1(i+1) - 2\theta_1(i) + \theta_1(i-1)}{\Delta\zeta^2} \right) \\ & + a_{13}\theta_3 \left(\frac{\theta_2(i+1) - \theta_2(i-1)}{2\Delta\zeta} \right) \end{aligned} \quad (5.68)$$

$$\theta_3 = a_{31} \left(\frac{\theta_1(i+1) - \theta_1(i-1)}{2\Delta\zeta} \right) - a_{32} \left(\frac{\theta_2(i+1) - \theta_2(i-1)}{2\Delta\zeta} \right) \quad (5.69)$$

Na Tabela 5.3, são apresentadas as condições iniciais e de contorno discretizadas, adimensionalizadas, sendo definidas na superfície e na base da bandeja, como funções da temperatura do produto, da umidade e de parâmetros constantes.

Tabela 5.3 – Condições iniciais e de contorno discretizadas do modelo matemático para a secagem de uvas

| Condição | Equações |
|-------------|--|
| $t = 0$ | $\theta_1(i) = 0$ (5.70) |
| $0 < i < 1$ | $\theta_2(i) = 0$ (5.71) |
| | $\theta_3(t) = 0$ (5.72) |
| $i = 0$ | $\theta_1(0) = \frac{4\theta_1(1) - \theta_1(2)}{3}$ (5.73) |
| $t > 0$ | $\theta_2(0) = \frac{4\theta_2(1) - \theta_2(2)}{3}$ (5.74) |
| | $\theta_1(N1) = \frac{\phi_1\gamma_2 - \phi_2(3 + \gamma_1)}{\varphi_1}$ (5.75) |
| $i = N1$ | $\theta_2(N1) = \frac{-3\phi_2\alpha_1 - \phi_1(3\alpha_2 - hq)}{\varphi_1}$ (5.76) |
| $t > 0$ | $\theta_3(N1) = a_{31} \frac{(3\theta_1(N1) - 4\theta_1(N) + \theta_1(N-1))}{2\Delta} - a_{32} \frac{(3\theta_2(N1) - 4\theta_2(N) + \theta_2(N-1))}{2\Delta}$ (5.77) |

Nas equações (5.75) e (5.76) os coeficientes são definidos, como mostrados nas equações de (5.78) a (5.84).

$$\alpha_1 = \frac{\delta (T_f - T_{in})}{(X_{in} - X_e)} \quad (5.78)$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda}{l(t) 2\Delta} \quad (5.79)$$

$$\gamma_1 = \frac{h_m l(t) 2\Delta}{De} \quad (5.80)$$

$$\gamma_2 = \frac{(1 - \varepsilon) r \rho_s h_m (X_{in} - X_e)}{(T_f - T_{in})} \quad (5.81)$$

$$\phi_1 = \gamma_1 + 4\theta_2(N) - \theta_2(N - 1) - 4\alpha_1\theta_1(N) + \alpha_1\theta_1(N - 1) \quad (5.82)$$

$$\phi_2 = 4\alpha_2\theta_1(N) - \alpha_2\theta_1(N - 1) - h_q + \gamma_2 \quad (5.83)$$

$$\varphi_1 = -3\alpha_1\gamma_2 - 9\alpha_2 - 3\alpha_2\gamma_1 + 3h_q + \gamma_1 h_q \quad (5.84)$$

5.3. Parâmetros do modelo matemático

Os parâmetros do modelo de Luikov são: coeficiente de encolhimento (β), densidade do sólido seco (ρ_s), coeficiente de gradiente térmico (δ), critério de mudança de fase (ε), calor específico da uva (c), condutividade térmica da uva (λ), difusividade efetiva (De), calor de vaporização da água no ar (r), coeficiente de transferência de calor (h_q), coeficiente de transferência de massa (h_m), velocidade de encolhimento referencial (w_{ref}), umidade de equilíbrio (X_e), medida inicial do menor eixo da uva (l_{in}) e temperatura do fluido (T_f), com as seguintes condições iniciais umidade inicial (X_{in}), temperatura inicial da uva (T_{in}).

Os seguintes parâmetros foram obtidos experimentalmente através da metodologia descrita no Capítulo 4: coeficiente de encolhimento (β), densidade do sólido seco (ρ_s), calor específico da uva seca (c), condutividade térmica (λ), umidade de equilíbrio (X_e), medida inicial do menor eixo da uva (l_{in}) e temperatura do fluido (T_f), bem como as condições iniciais umidade inicial (X_{in}) e temperatura inicial da uva (T_{in})

Para o calor específico (c) e a condutividade térmica da uva (λ), foram propostas correlações dependentes da temperatura, obtidas a partir dos dados da análise centesimal da composição e apresentadas na Equação 4.31 e na Equação 4.32 respectivamente. Estas correlações são válidas para a faixa de temperatura entre 304 K a 328 K. Nas simulações apresentadas, foi admitido um valor constante de c igual a 3688 J.kg⁻¹.K⁻¹ e de λ igual a 0,55

$W.m^{-1}.K^{-1}$, válidos para as maiores temperaturas – nas quais o material permanece durante o maior período da secagem.

Como foi apresentado no Capítulo 3, o calor de vaporização da água no ar (r) apresenta pequena variação em uma faixa ampla de temperatura. Nesta dissertação, será utilizado o valor $2,3586.10^6 J.kg^{-1}$ utilizado por Cinar (2002) na simulação da secagem de *blueberries*.

Segundo Irudayaraj *et al.* (1992), o coeficiente de gradiente térmico (δ) para materiais biológicos varia entre 0,01- 0,02 K^{-1} . Nessa dissertação será utilizado o valor igual a 0,015 K^{-1} .

Para analisar a influência dos demais parâmetros: critério de mudança de fase (ε), difusividade efetiva (De), coeficiente de transferência de calor (h_q) e coeficiente de transferência de massa (h_m) sobre a resposta do modelo, foi realizada uma análise de sensibilidade paramétrica. Essa análise demonstrou que a resposta do modelo é pouco sensível à variação desses parâmetros e, portanto, valores médios foram utilizados nas simulações.

A equação (5.85) foi proposta por Vagenas *et al.* (1990b), na qual observa-se que o critério de mudança de fase é dependente da umidade inicial e da umidade ao longo da secagem e seu valor varia de 0 (início da secagem) a 1 (final da secagem). Valores constantes para o critério de mudança de fase (ε) reportados na literatura variam entre 0,7 (IRUDAYARAJ *et al.*, 1992) para alimentos ricos em amido e 0,8 (CINAR, 2002) para *blueberries*.

$$\varepsilon = 1 - \frac{X}{X_{in}} \quad \text{Vagenas et al. (1990b)} \quad (5.85)$$

Nessa dissertação, foi adotado o valor de 0,95 para o critério de mudança de fase, considerando a umidade inicial das uvas da ordem de 80 %, a inexistência de amido na sua composição e a variação mais pronunciada desta umidade durante as primeiras horas da secagem.

A difusividade efetiva (De) foi calculada utilizando o modelo de Arrhenius apresentado na equação (3.15) por Vagenas *et al.* (1990b). Os parâmetros desse modelo foram estimados pelos autores para nove experimentos. A revisão da literatura apresentada no Capítulo 3 e a análise de sensibilidade paramétrica demonstrou que este parâmetro é dependente da umidade e da temperatura e que pode influenciar significativamente os resultados. Nesta dissertação foi adotado o valor constante igual a $5.10^{-10} m^2.s^{-1}$, considerada a faixa de umidade e de temperaturas objeto deste estudo.

O coeficiente de transferência de calor (h_q) foi calculado pela correlação proposta por Vagenas *et al.* (1990b), em função dos adimensionais Reynolds e Prandtl (ver Equação (3.29).

O valor máximo para o coeficiente de calor do ar reportado na literatura é de $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. Apesar da análise de sensibilidade paramétrica apresentada na seção 3.7.6 demonstrar que esse valor é significativamente afetado pela velocidade do ar de secagem e pelo comprimento característico, considerando que esta velocidade é constante na secagem realizada, mesmo com a alteração do comprimento característico será adotado o valor de h_q igual a $88,14 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, estimado para um comprimento característico e constante de $0,017$ metros, temperatura de 70 °C (343 K), admitida uma velocidade do ar igual a 2 m.s^{-1} .

O coeficiente de transferência de massa (h_m) calculado pela equação (3.30) foi de $0,083 \text{ m.s}^{-1}$. O teste de sensibilidade demonstrou que o modelo não é sensível à variação desse parâmetro.

A velocidade de encolhimento referencial (w_{ref}) utilizada nessa dissertação foi a definida em Vagenas *et al.* (1990b).

A Tabela 5.4 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nessa dissertação.

| Tabela 5.4 – Parâmetros utilizados para a simulação da secagem da uva Crimson | |
|--|--|
| Parâmetro | Valores |
| ρ_s | $1296,67 \text{ kg.m}^{-3}$ * |
| β | $1,4409 [-]$ * |
| δ | $0,015 \text{ 1/K}$ |
| ε | $0,95 [-]$ |
| d_e | $0,017 \text{ m}$ * |
| c | $3681 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ * |
| w_{ref} | $-10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| h_q | $88,14 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ |
| h_m | $0,083 \text{ m.s}^{-1}$ |
| r | $2,35.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ |
| λ | $0,55 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ * |
| D_e | $5.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| T_f | $70 \text{ }^\circ\text{C}$ * |
| T_{in} | $31,1 \text{ }^\circ\text{C}$ * |
| X_e | $0,03 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$ * |
| X_{in} | $4,07 \text{ kg H}_2\text{O/kg bs}$ * |

*Valores obtidos experimentalmente

5.4. Resultados simulados e validação experimental

A simulação do modelo foi realizada no software Scilab 5.5.2, em um computador com sistema operacional Windows 10, processador Intel Core i3 64 bits e CPU de 1,80 GHz.

O sistema de equações diferenciais ordinárias oriundo da discretização espacial das equações de conservação e das condições iniciais e de contorno, considerando uma malha de discretização com 80 pontos, foi resolvido com o resolvidor LSODA. Esse resolvidor, disponível na coleção ODEPACK, aplica-se a sistemas explícitos sem e com rigidez, empregando os métodos de Adams e BDF respectivamente (HINDMARSH, 2001).

O tempo computacional médio para as simulações apresentadas considerando o tempo de secagem de 16 horas foi de 6 minutos.

Na Figura 5.3 é apresentado o perfil de umidade no material ao longo de sua altura adimensional, para diferentes tempos de secagem.

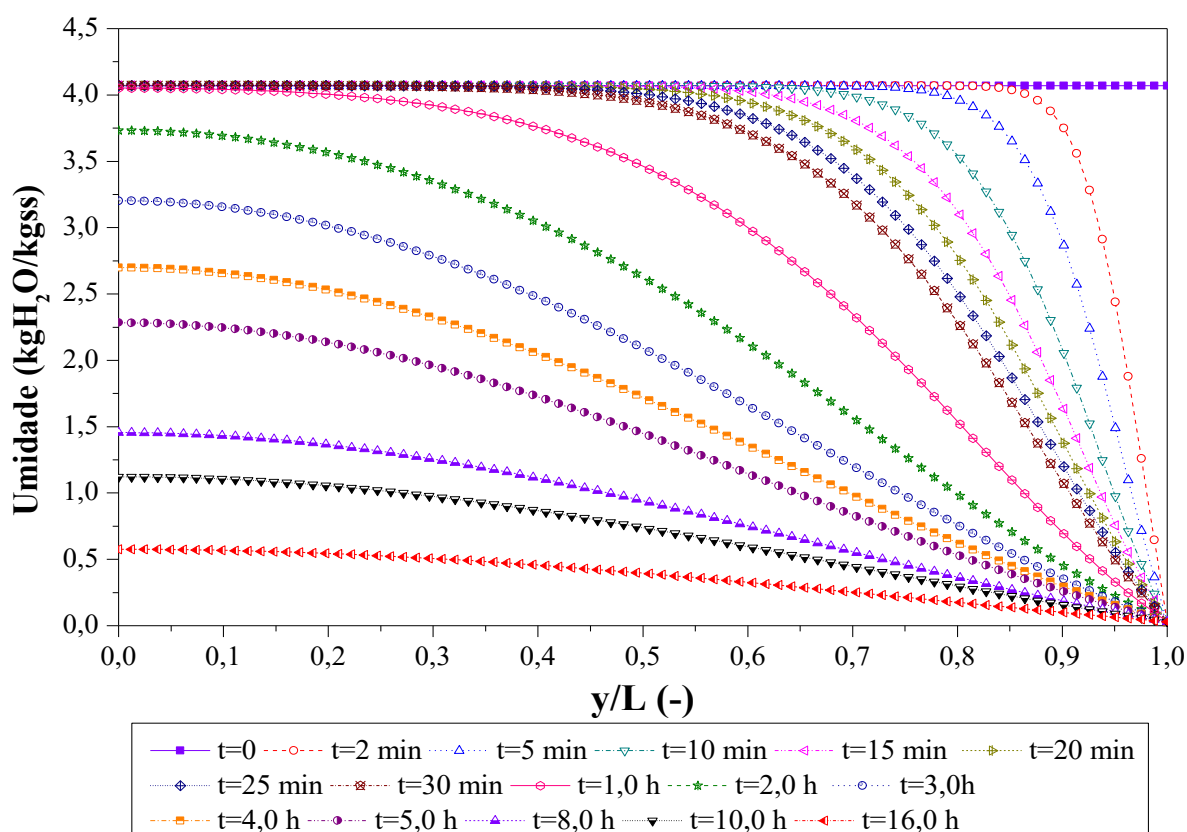


Figura 5.3 – Variação da umidade do material ao longo de sua altura adimensional, para diferentes tempos de secagem

Pode-se observar que ao longo de todo o processo uma região úmida interna e uma região mais seca próxima à superfície. Isso se deve ao fato de que a evaporação da umidade

ocorre na superfície do material e que a umidade interna deve romper as outras camadas até chegar na superfície, isto é, o gradiente de umidade vai do centro para a superfície. Sabe-se que o transporte de umidade no material é resultante da difusão do líquido e do vapor e neste caso o valor da difusividade efetiva é muito baixo ($D_e = 5.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$), justificando a lenta perda de água no interior (VAGENAS *et al.*, 1990b).

Conforme já discutido por Mabrouk *et al.* (2006), o leito pode ser dividido em duas regiões conforme o teor de umidade. Na região em que o gradiente de umidade é maior a evaporação é pronunciada e à medida que aumenta o tempo de secagem essa frente de evaporação aproxima-se da região úmida, localizada no interior da amostra.

A Figura 5.4 apresenta a umidade do material ao longo do tempo e para diferentes alturas no material.

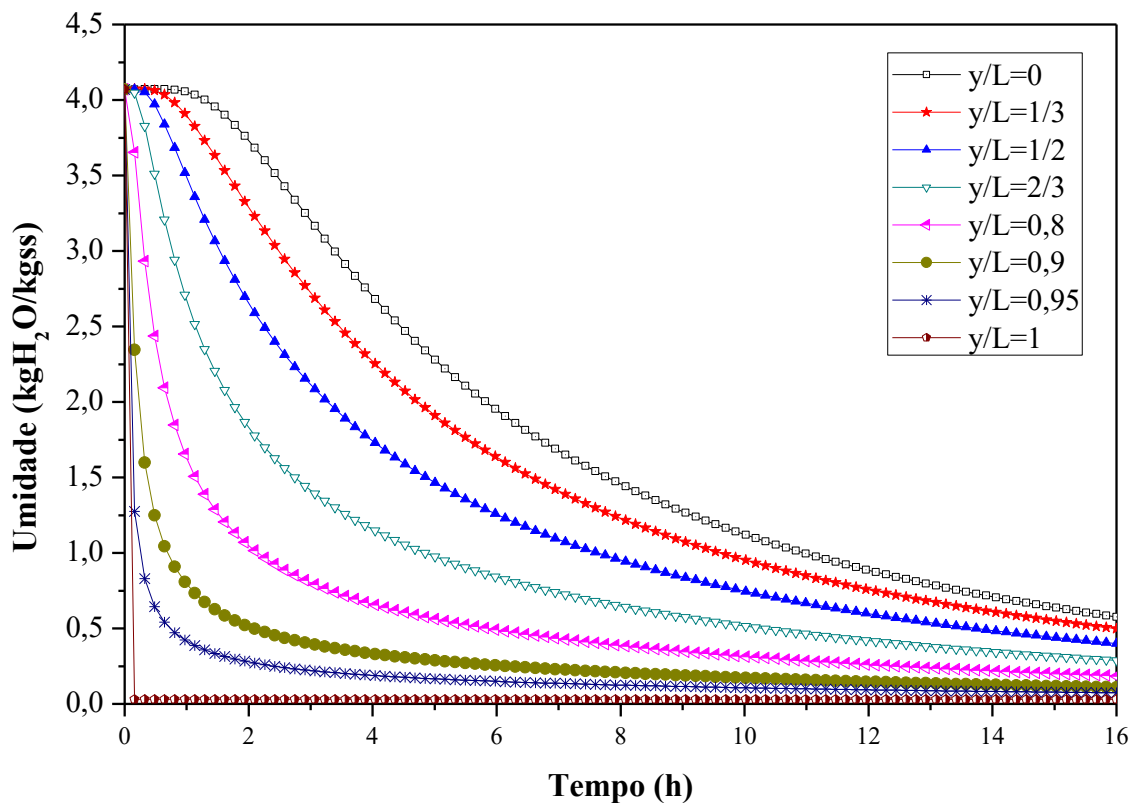


Figura 5.4 – Variação da umidade do material com o tempo de secagem para diferentes alturas

A secagem nas camadas mais próximas à superfície acontece de forma mais efetiva, aproximando da umidade de equilíbrio de 0,03 kg H₂O/ kg bs, valor alcançado na superfície em contato direto com o ar de secagem ($y/L=1$).

Na Figura 5.5, é apresentado o perfil de umidade média simulado, calculado pelo teorema do valor médio, bem como a umidade média obtida experimentalmente.

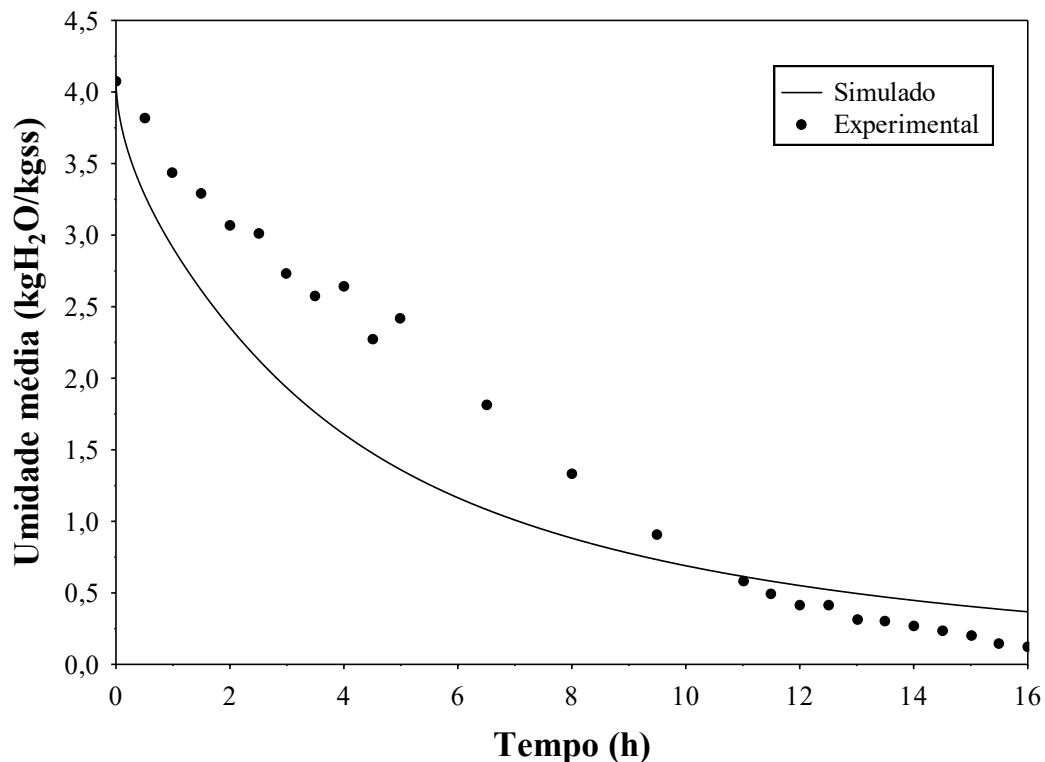


Figura 5.5 – Perfil da umidade média simulada e obtida experimentalmente

Os valores experimentais de umidade foram obtidos pesando cinco bagas de uva, sendo um conjunto de uvas diferente para cada hora de amostragem. Há que se considerar, portanto a heterogeneidade destas amostras e que devido às bandejas do secador serem fixas, não ter sido possível obter a umidade do conjunto das uvas por medição da massa total. Sob tal perspectiva, os valores simulados representam qualitativamente os valores experimentais na região de maior umidade, mais próxima do centro do material, nos tempos iniciais de secagem. Ao final da secagem, para tempos superiores a 13 horas, os valores experimentais apresentam pouca variação, como ocorre nas simulações na região mais seca próxima à superfície do material. Cabe ressaltar que os parâmetros do modelo matemático foram considerados constantes em toda a faixa de umidade e de temperatura, embora análises anteriores tenham demonstrado a influência da umidade e da temperatura sobre parâmetros como o calor específico e a difusividade. Desta forma, considera-se que a predição da umidade do material pelo modelo matemático desenvolvido é consistente, considerando os erros experimentais e as hipóteses simplificadoras adotadas.

O perfil de temperatura em diferentes tempos ao longo da altura do leito é mostrado na Figura 5.6. A temperatura inicial é igual a 31,1°C (304 K) e ao final de 16 horas de secagem alcança aproximadamente 68°C (341 K), sendo a temperatura do ar de secagem constante e igual a 70°C (343,15 K).

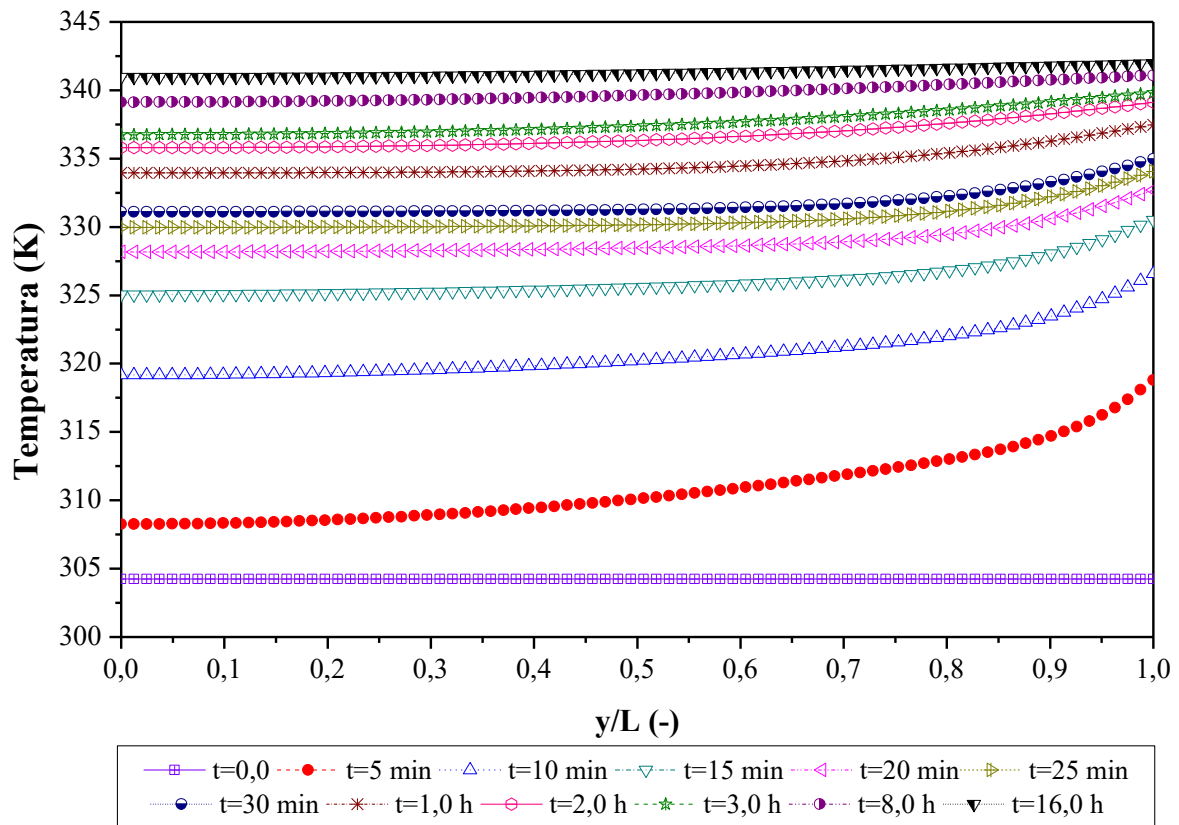


Figura 5.6 – Variação da temperatura do material ao longo de sua altura adimensional, para diferentes tempos de secagem

No início da secagem, o aumento da temperatura é mais pronunciado próximo à superfície do material quando comparado aos valores para tempos de secagem maiores do que 0,5 hora. Decorridas cerca de duas horas da secagem, as variações nesta temperatura são pequenas e ela se mantém aproximadamente constante em todo o leito. Da mesma forma que acontece com a umidade, a temperatura mostra duas regiões distintas uma mais quente (superfície) e uma mais fria indicada pelas camadas mais internas. Cabe ressaltar o significativo aumento da temperatura ocorrido no intervalo entre 5 minutos e 10 minutos, mais evidente nas camadas internas do leito.

Na Figura 5.7, é apresentado os perfis de temperatura simulados para $y/L=0; 1/3; 1/2; 2/3$ e 1 em 16 horas de secagem.

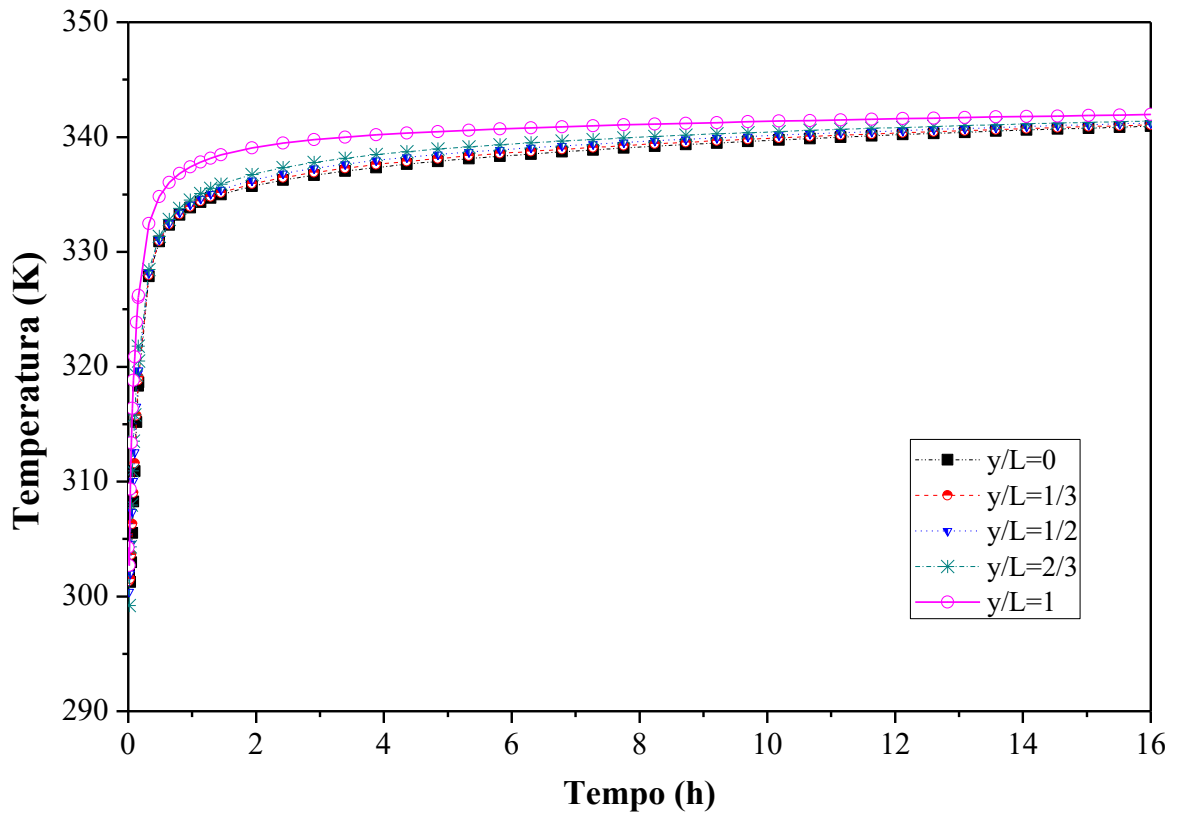


Figura 5.7 – Perfis de temperatura simulados ao longo do leito para 16 horas de secagem

Da Figura 5.7, pode-se observar que a temperatura do leito se estabelece constante após 10 horas de secagem, e com quatro horas de secagem a temperatura já está bem próxima do estado estacionário. Em tempos muito pequenos, bem próximos de zero horas, observa-se temperaturas abaixo da temperatura inicial, detalhe que é apresentado na Figura 5.8.

A Figura 5.8 apresenta a variação da temperatura para 0,18 horas de secagem. Neste curto período ocorre um intenso decréscimo da umidade na região próxima à superfície, decorrente da transferência de massa convectiva com consequente queda na temperatura do sólido que atinge valores inferiores à temperatura inicial. Este efeito reverso também foi observado por Silva (2010).

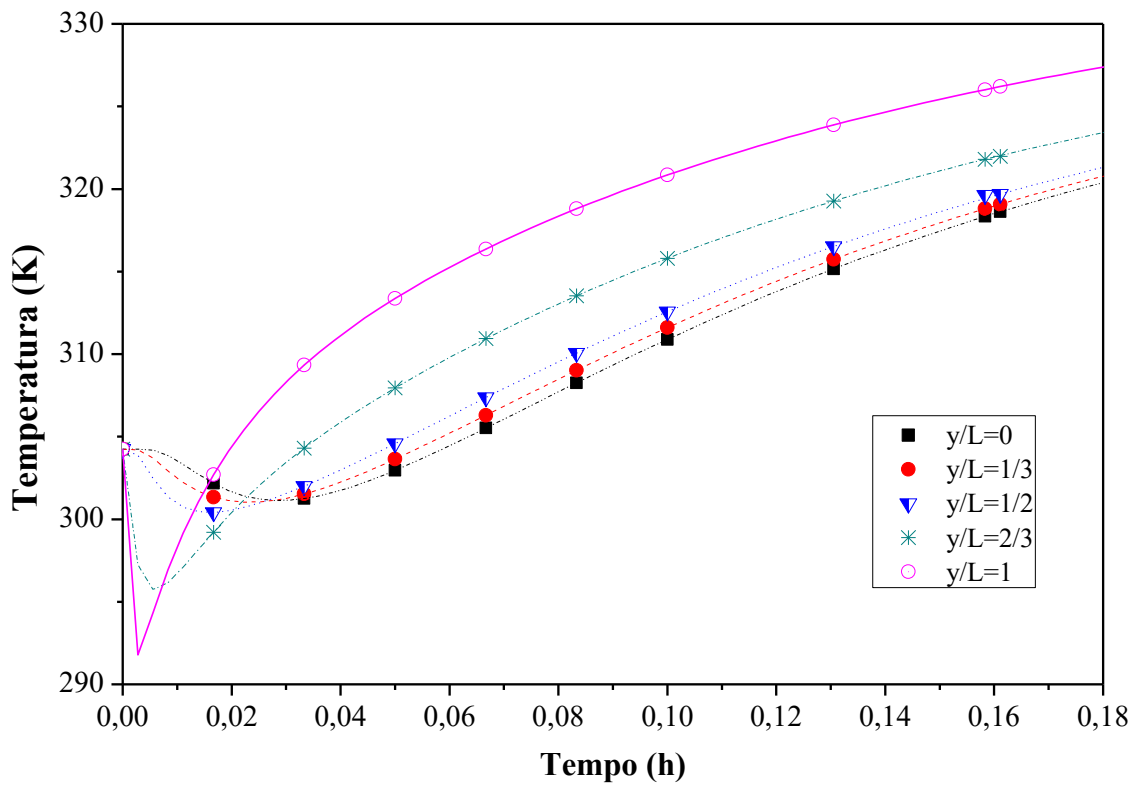


Figura 5.8 – Perfis de temperatura em diferentes pontos do leito em 0,18 horas de secagem

A Figura 5.9 mostra os valores simulados e os dados experimentais da altura do leito com o tempo, devido ao encolhimento do material.

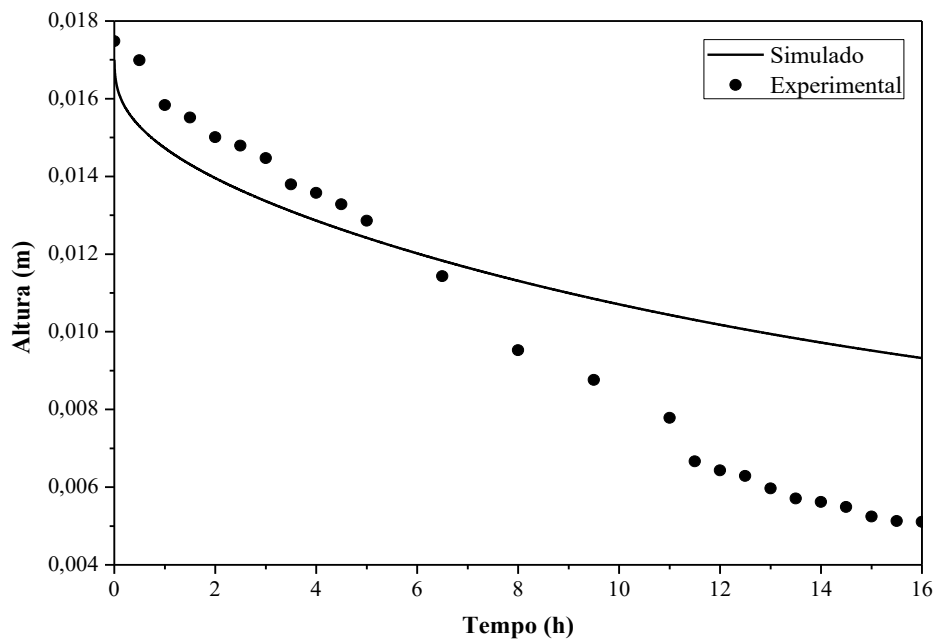


Figura 5.9 – Variação da altura do leito com o tempo de secagem

A predição qualitativa do encolhimento no período de secagem até 7 horas, quando o material está mais úmido, pode ser considerada razoável. A partir das oito horas de secagem, os valores simulados foram superiores aos valores experimentais, indicando um menor encolhimento. No modelo matemático, este encolhimento é calculado a partir da condição de contorno definida na superfície totalmente exposta à transferência de calor com o ar. Esta condição inclui vários parâmetros dependentes da umidade e da temperatura e do comprimento característico, mas admitidos constantes. Desta forma, credita-se à hipótese de parâmetros constantes adotadas neste modelo e à representação das uvas por um leito com altura igual à altura inicial média das uvas, o distanciamento entre os valores simulados e os valores experimentais do encolhimento.

A Figura 5.10 apresenta a velocidade de encolhimento do sólido para diferentes tempos ao longo do leito.

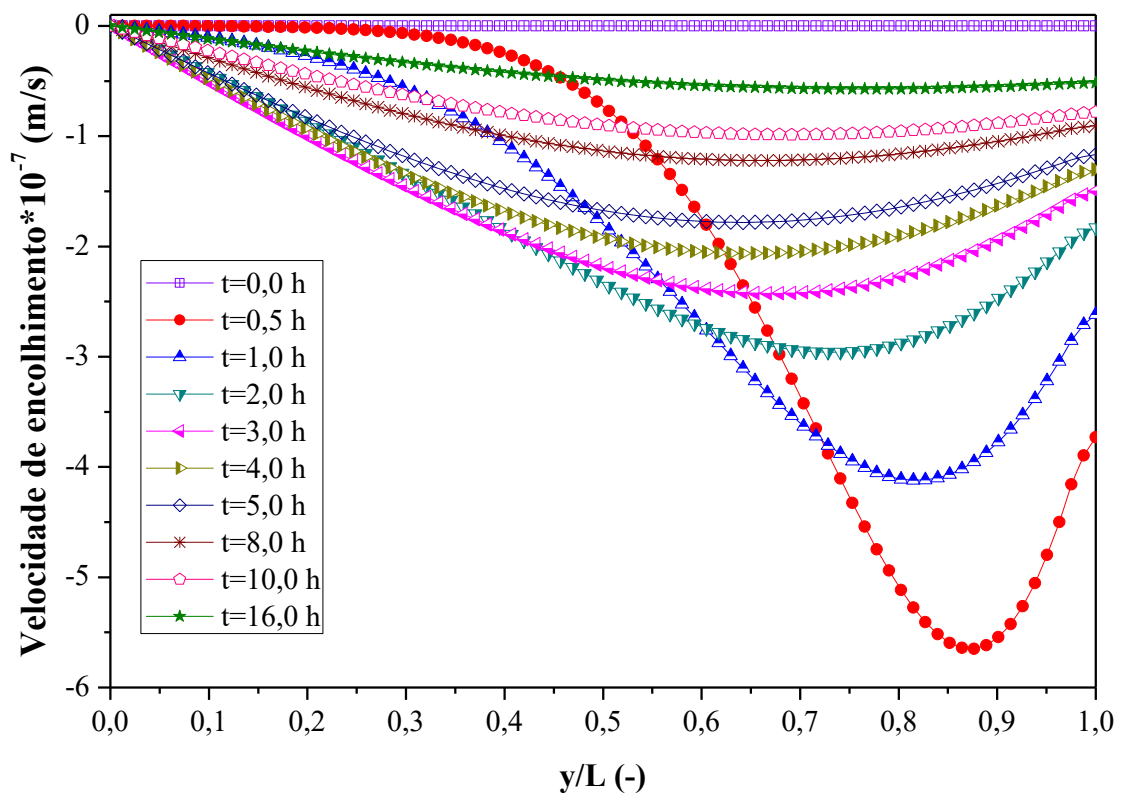
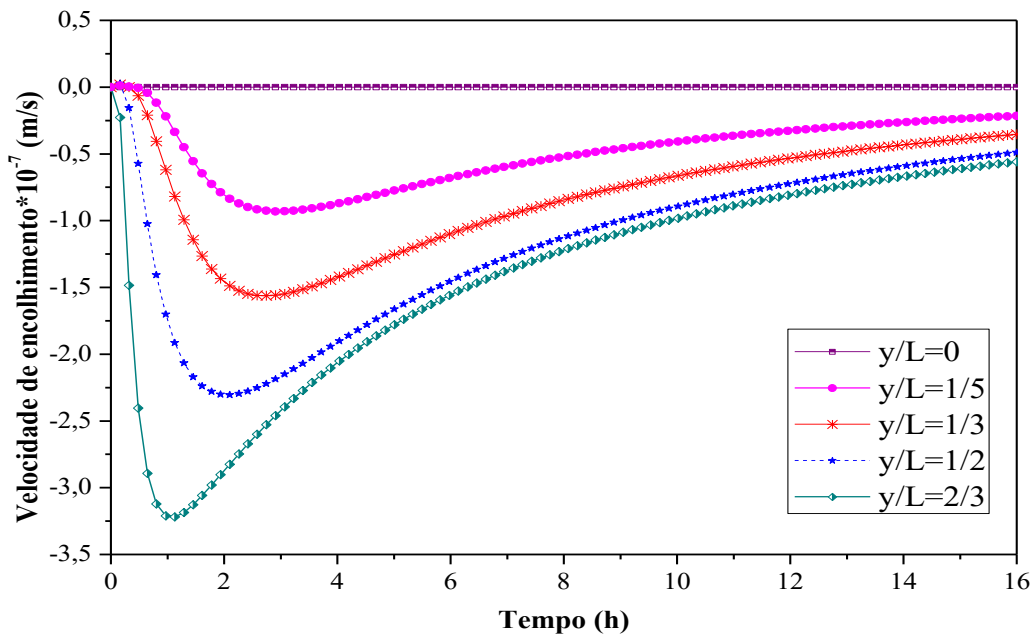


Figura 5.10 – Perfil da velocidade de encolhimento ao longo do domínio adimensional em diferentes tempos

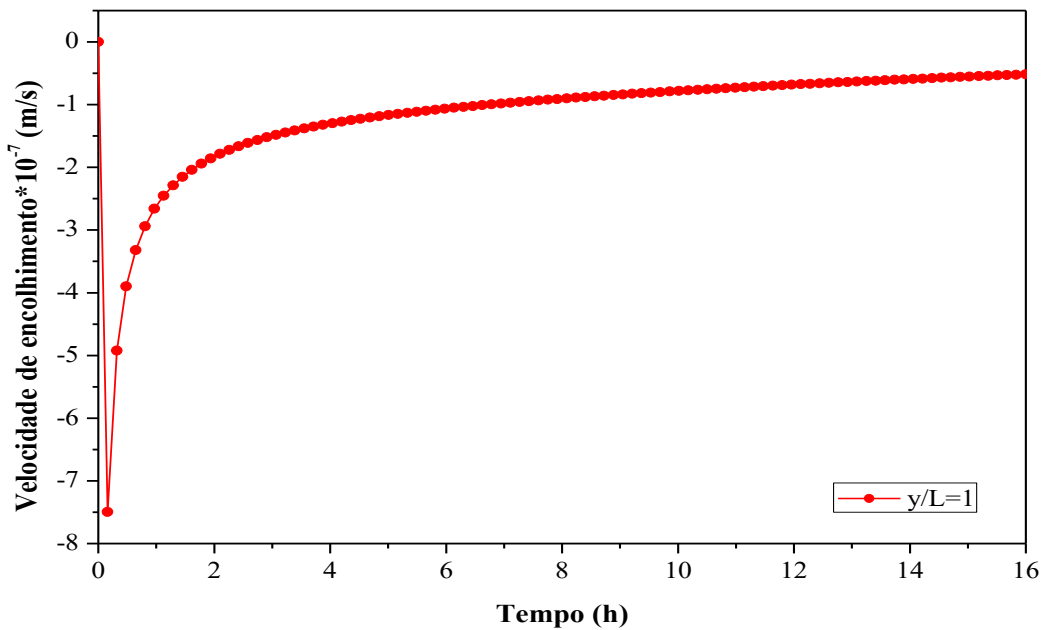
Decorrida meia hora de secagem, observa-se que a velocidade de encolhimento nas camadas internas é nula e aumenta até a camada próxima a superfície até atingir seu máximo valor em $y/L = 0,87$. A velocidade de encolhimento em uma hora de secagem é maior do que a

ocorrida em meia hora nas camadas internas até $y/L = 0,75$ e alcança seu valor máximo em $y/L = 0,82$. O valor máximo da velocidade de encolhimento em 2,0 h de secagem é alcançado em $y/L = 0,75$. De modo geral, com o decorrer da secagem a velocidade de encolhimento na superfície do leito ($y/L = 1$) diminui.

A Figura 5.11 (a) apresenta a velocidade de encolhimento ao longo do tempo de secagem para as posições $y/L=0; 1/5; 1/3; 1/2$ e $2/3$ no leito e a Figura 5.11 (b) para a posição $y/L=1$.



(a)



(b)

Figura 5.11 – Perfil da velocidade de encolhimento ao longo do tempo de secagem em (a) $y/L=0; 1/5; 1/3; 1/2$ e $2/3$ e (b) $y/L=1$ para 16 horas de secagem

A camada mais externa do leito ($y/L=1$) apresenta a maior variação na velocidade de encolhimento, mais pronunciada durante as 3 horas de secagem. Para as camadas intermediárias, observa-se novamente que a velocidade de encolhimento atinge valores máximos que tendem a um valor aproximadamente constante na etapa final da secagem, e o comportamento da curva de velocidade de encolhimento para as camadas mais externas vai se aproximando ao comportamento da curva $y/L=1$.

Não foram encontrados registros na literatura para o comportamento da velocidade de encolhimento em frutas que pudessem ser comparados com o obtido nessa dissertação.

Considerada a complexidade dos fenômenos de transferência de massa e de calor, a geometria do material a ser seco, o número de parâmetros a serem determinados por correlações ou determinados experimentalmente, a complexidade da solução numérica de um modelo com fronteira móvel cuja localização está acoplada a cálculos de umidade e de temperatura na superfície, os erros experimentais, a configuração da bandeja de secagem que é perfurada e com circulação de ar com escoamento paralelo às superfícies superior e inferior, considera-se que o modelo matemático desenvolvido foi capaz de representar qualitativamente a variação de umidade e de temperatura e o encolhimento de um leito com propriedades constantes e iguais à da uva Crimson.

A avaliação da qualidade das uvas-passas produzidas através da aplicação de técnicas de análise sensorial será apresentada no próximo capítulo.

6. ANÁLISE SENSORIAL

Almeida (2013a) estudou a produção de uvas-passas da variedade Crimson em estufas de circulação a 50°C e a 60°C e também em estufa solar. Uma análise sensorial das passas obtidas pelos três métodos experimentais foi realizada em comparação com outros dois tipos de passas encontradas no mercado, sultanas prestas da marca Auchan e uva-passa sem semente da marca Ferbar.

Numa primeira fase foram aplicados testes das características sensoriais das uvas-passas, através de uma análise descritiva do produto com 15 provadores consumidores não treinados, sendo seis homens e nove mulheres com idades entre 22 e 55 anos. Nessa fase, foram avaliados os seguintes atributos sensoriais: tonalidade da cor, uniformidade da cor, doçura, acidez, dureza, elasticidade e apreciação global, utilizando uma escala numérica crescente de um a cinco. Essa escala numérica crescente foi convertida em termos descritivos: 1 – pouco; 2 – ligeiramente; 3 – razoavelmente; 4 – bom; 5 – muito, exceto para a apreciação global na qual foi utilizada outra escala: 1 – muito fraca; 2 – fraca; 3 – suficiente; 4 – boa; 5 – muito boa (ALMEIDA, 2013a).

Numa segunda fase, os mesmos provadores efetuaram uma prova de ordenação de preferência às amostras secas em estufas e às duas obtidas em mercado. Devido à alta umidade contida nas passas obtidas por secagem solar, as mesmas se deterioraram e não fizeram parte da avaliação nessa fase do estudo. Os seguintes atributos foram avaliados nessa fase: cor, textura, doçura e apreciação global. As amostras foram apresentadas aos provadores de forma aleatória que as organizaram conforme sua preferência e para cada atributo avaliado. Todos os testes foram realizados em sala adequada para análise sensorial.

Os resultados foram obtidos através de valores médios para cada atributo avaliado e para a maioria dos casos não se verificou muita oscilação entre os valores obtidos para as diferentes amostras. Ao nível da apreciação global os resultados obtidos indicaram que todas as amostras apresentam a classificação “bom”.

A amostra seca em estufa solar foi caracterizada como a menos ácida, dura e elástica de todas as amostras. Quanto à amostra seca a 50 °C os provadores consideraram que a cor e a apreciação global foram consideradas bons enquanto para os outros fatores foram considerados razoáveis. As amostras secas a 60 °C foram consideradas boas no que diz respeito à apreciação global e atributos como tonalidade, acidez e elasticidade foram consideradas razoáveis. O

atributo sabor foi considerado semelhante para todas as amostras, já o atributo textura foi atribuído o maior nível de dureza para as amostras secas a 60 °C.

A análise de preferência mostrou que não há diferença estatística para os atributos estudados, ou seja, as amostras, tanto comerciais quanto as secas no estudo, não se diferenciam entre si, podendo ser comercializadas.

6.1. Materiais e métodos

Depois das uvas passarem pelo processo de secagem, elas foram embaladas à vácuo e foram submetidas à análise sensorial, através de testes de aceitação e Check-all-that-apply (CATA). Para esse procedimento, o projeto foi submetido à aprovação pelo Comitê de Ética em Pesquisa e todos os participantes foram orientados e assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (Apêndice C).

A análise sensorial foi realizada no laboratório de Análise Sensorial da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus Patos de Minas. Através de mídia eletrônica e presencialmente foram convidados alunos dos cursos de Engenharia de Alimentos e de Telecomunicações, assim como os funcionários dos laboratórios.

6.1.1. Teste de aceitação

A avaliação sensorial foi realizada para determinar impressão global da uva-passa (aparência, textura, sabor, aroma, impressão global). Participaram 50 provadores, pertencentes a ambos os sexos, não treinados e com faixa etária compreendida entre 18 e 60 anos que preferivelmente gostavam de uvas-passas.

As amostras foram apresentadas com códigos de três dígitos, em ordem balanceada e aleatória. Foi utilizada escala hedônica não estruturada de nove centímetros (Apêndice D), variando de: 1 (desgostei extremamente) a 9 (gostei extremamente) segundo Freitas *et al.* (2013).

6.1.2. Check-all-that-apply (CATA)

Na mesma ficha foram apresentados também 14 descritores sensoriais selecionados em artigos científicos (FREITAS *et al.*, 2013, SOUZA *et al.*, 2015), conforme a metodologia

Check-all-that-apply (CATA), para que os consumidores assinalassem aquelas que eram pertinentes a cada amostra (ARES *et al.*, 2010).

Porções com cinco unidades foram apresentadas em copos descartáveis de 50 mL, codificados com números de três algarismos e servidos à temperatura ambiente. A ordem de apresentação das amostras foi balanceada estatisticamente.

6.2. Resultados da análise sensorial

Os nove intervalos de notas da escala hedônica foram subdivididos em três partes: 0 a 3, representando julgamentos desfavoráveis ao produto; 3 a 6, com julgamentos neutros; e 6 a 9, com julgamentos favoráveis. Se a porcentagem de notas no intervalo de 6 a 9 for superior a 70%, diz-se que o produto teve boa aceitação para o parâmetro em questão. Em Teixeira *et al.* (1987), é importante que o produto obtenha um índice de aceitação de no mínimo 70% para que o produto seja considerado aceito por suas propriedades sensoriais. A Tabela 6.1 apresenta a porcentagem para cada atributo de acordo com os três intervalos indicados acima.

Tabela 6.1 – Porcentagem das notas dos atributos referentes a uva-passa nos intervalos da escala

| Intervalos | Aparência | Textura | Aroma | Sabor | Impressão Geral |
|-------------------|------------------|----------------|--------------|--------------|------------------------|
| 0 a 3 | 4% | 12% | 0% | 2% | 0% |
| 3 a 6 | 12% | 22% | 40% | 14% | 20% |
| 6 a 9 | 84% | 66% | 60% | 84% | 80% |

Da Tabela 6.1, pode-se dizer que segundo os atributos aparência, sabor e impressão geral com porcentagens iguais a 84%, 84% e 80%, respectivamente, houve boa aceitação da uva-passa da variedade Crimson entre os julgadores. Já os atributos textura e aroma tiveram porcentagens iguais a 66% e 60%, respectivamente, apresentando um julgamento neutro.

Foram elaborados histogramas dos testes de aceitação referentes aos atributos: aparência, textura, aroma, sabor e impressão geral, este último refere-se à avaliação geral do produto. As distribuições de frequência absoluta de notas para análise destes cinco atributos de uvas-passas estão apresentadas na Figura 6.1.

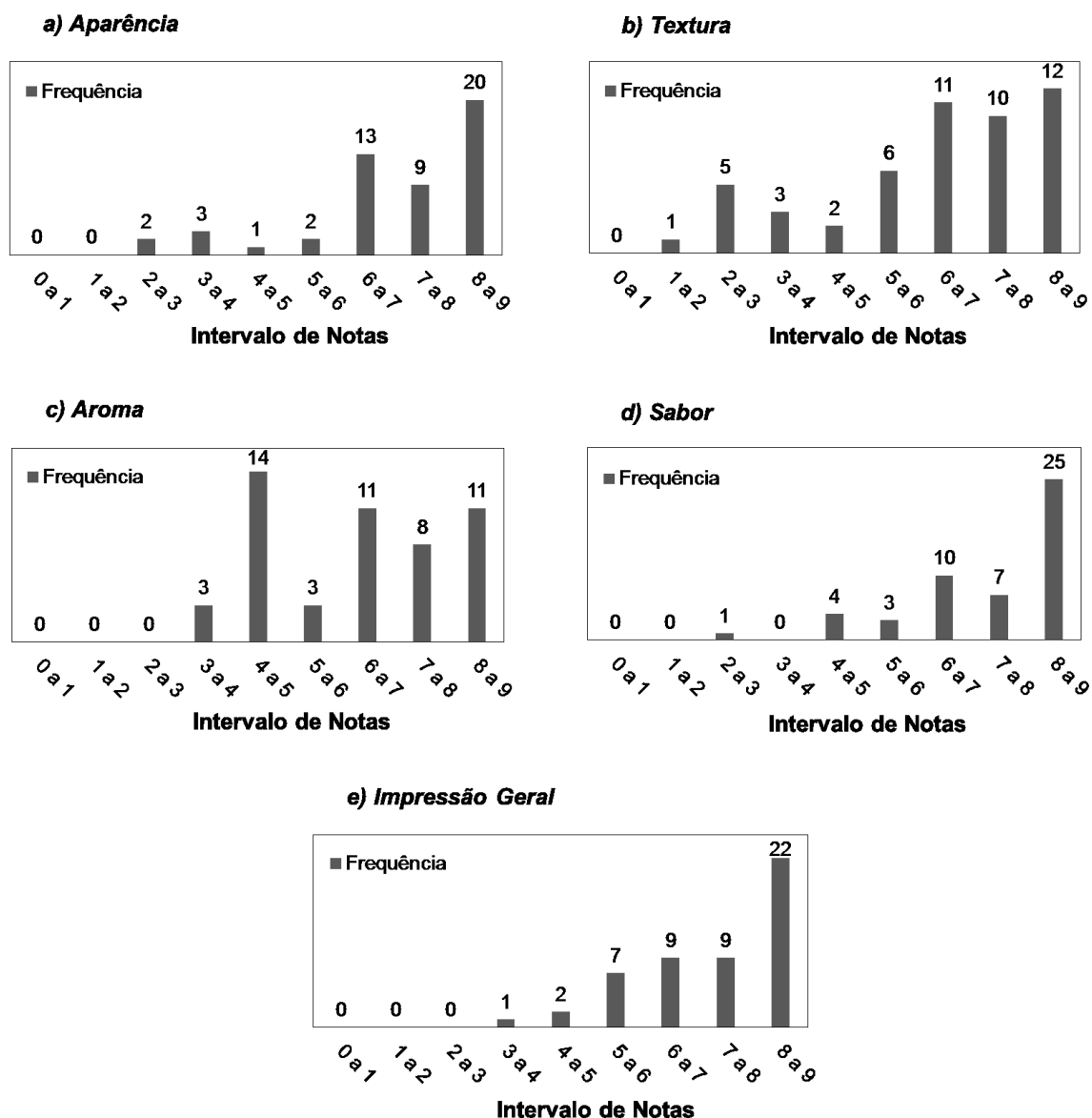


Figura 6.1 – Histogramas das uvas-passas com distribuição de notas dos atributos: a) aparência, b) textura, c) aroma, d) sabor e e) impressão geral

Para o atributo aparência, pode-se concluir que a frequência foi observada a maior para as notas entre 8 e 9 e a segunda maior obtida para esse atributo é apresentada pelas notas entre 6 a 7. Assim, o julgamento favorável, que considera notas entre 6 e 9, apresentou 84% de aceitação, conforme mostra a Tabela 6.1. Esse mesmo comportamento foi observado nos atributos sabor e impressão geral.

O atributo textura e aroma apresentam uma distribuição mais uniforme de notas, caracterizando o julgamento neutro apresentado pelas suas porcentagens na Tabela 6.1, conforme apresentado anteriormente. Observa-se pelas barras que as notas entre 3 e 6 tiveram frequência similares às das notas positivas (entre 6 e 9). Conforme apresentado em literaturas

de análise sensoriais específicas (ALMEIDA, 2013a) para avaliar esses atributos seria interessante provadores treinados, que consigam identificar pequenas variações nas amostras como dureza, elasticidade, etc, o que não ocorre em testes de aceitação.

Almeida (2013a) observou que para amostras secas a altas temperaturas, como o caso de 60 °C utilizada pelo autor, o atributo textura apresentou o maior número de citações, sendo avaliada com uma textura mais dura em relação às amostras secas em estufa solar, em estufa de circulação a 50°C e de marcas comerciais.

Dessa forma, pelos resultados apresentados pelas porcentagens das notas dos atributos assim como dos gráficos do teste de aceitação, a impressão geral do produto (80%) ficou muito próxima à nota máxima mostrando que os possíveis consumidores aprovam as uvas-passas da variedade Crimson obtidas nesse estudo.

Além do teste de aceitação, os provadores assinalaram a presença ou ausência de atributos característicos e agradáveis. Tais atributos podem ser observados na Tabela 6.2, bem como o número de citações que cada um apresentou ao final do teste.

Tabela 6.2 – Número de citações de atributos sensoriais

| Atributos Sensoriais | Número de citações | Porcentagem (%) |
|-----------------------------|---------------------------|------------------------|
| Aparência boa | 46 | 92 |
| Aroma característico | 41 | 82 |
| Aroma doce | 39 | 78 |
| Saborosa | 46 | 92 |
| Sabor característico | 48 | 96 |
| Doce | 44 | 88 |
| Suculenta | 29 | 58 |
| Macia | 34 | 68 |
| Aroma ruim | 0 | 0 |
| Sabor fermentado | 10 | 20 |
| Amarga | 4 | 8 |
| Dura | 14 | 28 |
| Ressecada | 20 | 40 |

Da Tabela 6.2, considerando a mesma classificação de Teixeira *et al.* (1987) para julgamentos neutros, favoráveis e desfavoráveis, observa-se que os atributos aparência boa, aroma e sabor característico, aroma doce, saborosa e doce tiveram parecer favorável no número de citações, ficando acima de 70%. Já os atributos uva suculenta, macia e ressecada apresentam porcentagens iguais 58%, 68% e 40%, respectivamente, caracterizando um julgamento neutro.

Os atributos rejeitados, ou seja, notas abaixo de 30%, foram aroma ruim, sabor fermentado, amarga e dura. Isto mostra que essas características foram menos citadas mostrando que, não só os provadores gostaram do produto como o mesmo apresentou boa qualidade.

Segundo Souza *et al.* (2015) apresentaram resultados para oito cultivares diferentes de uvas, a variedade *BRS Clara* obteve o maior número de citações dos atributos de aroma e sabor característicos e agradáveis, ficando em torno de 50%. Almeida (2013a) que trabalhou com a secagem de uvas Crimson em secador solar e em estufa a 50°C e 60°C, em sua análise sensorial, com provadores treinados, obteve maior número de citações para o atributo dureza nas uvas secas a 60°C, já o sabor com relação à doçura do produto, as três amostras tiveram resultados semelhantes de acordo com o número de citações.

Almeida (2013a) conclui que as uvas-passas produzidas a partir da variedade de uvas de mesa Crimson secas em estufa de circulação apresentaram boas características químicas, físicas e sensoriais, podendo ser uma boa forma de aproveitamento das uvas que eventualmente não reúnam as condições exigidas para a comercialização *in natura*. No perfil sensorial todas as amostras tiveram uma boa aceitação por parte dos provadores e os resultados assemelham-se aos obtidos para amostras comerciais concluindo, assim, boa aceitação das passas variedade Crinsom por futuros consumidores.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foi utilizada uma abordagem global para estudo da secagem de uvas Crimson para produção de uvas-passas, considerando três eixos principais:

1. Produção das uvas em estufa com recirculação de ar com determinação experimental da densidade do sólido seco, do coeficiente de encolhimento, da condutividade térmica, da umidade de equilíbrio e do calor específico. Nesta etapa foram feitas medições da umidade de um conjunto de cinco uvas, calculada pela diferença de massa ao longo do tempo de secagem de 16 horas;
2. Desenvolvimento de um modelo matemático unidimensional e transiente representativo do processo de secagem de um leito com propriedades constantes e iguais às das uvas, associado à análise de sensibilidade do modelo frente a variação nos parâmetros. O modelo é formado por equações diferenciais parciais, com uma das condições de contorno definida em fronteira móvel localizada na superfície do leito devido ao encolhimento, cuja posição é calculada simultaneamente com a umidade e a temperatura ao longo da altura do leito e com o tempo. Os resultados simulados de umidade e de encolhimento são comparados com os dados experimentais;
3. Análise sensorial das uvas-passas produzidas para verificação da qualidade do produto e avaliação do nível de aceitação pelo consumidor.

As propriedades do ar e das uvas Crimson obtidas experimentalmente ou calculadas através de correlações foram devidamente comparadas com propriedades para outras espécies de uvas ou de frutas em geral disponíveis na literatura, apresentando valores consistentes.

O modelo matemático formado pelas equações de balanço de massa e de energia e pela equação constitutiva que representa o encolhimento, associado às condições iniciais e às condições de contorno foi resolvido pelo método das linhas, aplicando a discretização por diferenças finitas nos termos de derivadas com relação à posição, e esta discretização mostrou-se adequada para garantir a precisão dos resultados. O sistema de equações diferenciais ordinárias resultantes da discretização com uma malha de 80 pontos foi resolvido pelo integrador LSODA. Foram obtidos valores da umidade e da temperatura no interior do leito sólido e da altura do leito sólido decorrente do encolhimento com o tempo. O comportamento da umidade, da temperatura e do encolhimento representam qualitativamente o fenômeno de secagem e são consistentes. Há que se considerar, entretanto que a adoção de parâmetros

constantes, que de fato são dependentes da umidade ou da temperatura, influenciam na precisão dos resultados obtidos. Avaliando especificamente a umidade do sólido, há uma boa representação dos valores experimentais pela simulação enquanto para o encolhimento a representação foi aceitável para um período de 8 horas de secagem. Novamente credita-se à adoção de propriedades constantes e à representação de um conjunto de uvas por um leito sólido, que se torna menos adequada à medida que a variação no volume das bagas aumenta significativamente os espaços vazios no leito, a previsão de menor encolhimento na etapa final da secagem obtida pelo modelo matemático. Ressalte-se ainda que o encolhimento é medido no próprio bago de uva.

A análise sensorial indica que as uvas-passas da variedade Crimson produzidas tiveram uma boa avaliação pelo consumidor, com atributos sensoriais aceitáveis.

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- a) Modelagem matemática considerando propriedades variáveis com a umidade e com a temperatura e representação mais adequada do conjunto de uvas por um leito considerando variações bidimensionais;
- b) Modelagem macroscópica da secagem de uvas utilizando um carrinho com bandejas sobrepostas e considerando diferentes formas de circulação do ar;
- c) Avaliação dos atributos sensoriais de uvas produzidas com diferentes condições operacionais como velocidade e temperatura do ar;
- d) Estudo da influência do tipo de pré-tratamento, da altura e da disposição das uvas nas bandejas sobre o tempo de secagem;
- e) Solução numérica dos modelos matemáticos usando métodos de volumes finitos para avaliação da precisão dos resultados e visando a redução do esforço computacional.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIR PROPERTIES. Disponível em: http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html. Acesso em: 17 de outubro de 2016.
- AKHIJAHANI, H. S.; KHODAEI, J. Investigation of specific heat and thermal conductivity of rasa grape (*Vitis vinifera* L.) as a function of moisture content. *World Applied Sciences Journal*, v. 22, n. 7, 939-947, 2013. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.22.07.3447>
- ALMEIDA, I. C. Desenvolvimento de produtos de uva-passa a partir da uva de mesa variedade Crimson. 2013. 79 f. Dissertação (Mestrado em Qualidade e Tecnologia Alimentar) – Escola Superior Agrária de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal. 2013a.
- ALMEIDA, L. C. P. Desidratação osmótica e secagem convectiva de uvas do cultivar Crimson. 2013. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2013b.
- ANDRADE, P. F. S. Fruticultura: Análise da conjuntura agropecuária. SEAB/DERAL – Departamento de Economia Rural, 2012. Disponível em: http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/fruticultura_2012_13.pdf Acesso: 01 de jun. de 2016.
- AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International. 16th ed., Gaithersburg, 1999.
- APRAJEETA, J.; GOPIRAJAH, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Shrinkage and porosity effects on heat and mass transfer during potato drying. *Journal of Food Engineering*, v.144, p.119-128, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.08.004>
- ARES, G., BARREIRO, C., DELIZA, R., GIMÉNEZ, A.; GÁMBARO, A. Application of a check-all-that-apply question to the development of chocolate milk desserts. *Journal of Sensory Studies*, v. 25, p. 67–86, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-459X.2010.00290.x>
- ARRIECHE, L. S. Modelagem matemática de processor de secagem por convecção forçada de sistemas simuladores de alimentos esféricos e deformáveis. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2007. 129 f.
- ASHRAE. ASHRAE Handbook – Refrigeration Chapter: Thermal Properties of Foods, p. 1-31, 2006.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. *Journal of Food Engineering*, v. 55, p. 323-330, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00109-7](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00109-7)
- BARRET, D. M.; SOMOGYI, L.; RAMASWAMY, H. Processing Fruits. 2ª Ed. Nova Iorque: CRC Press LLC, 2004. 841p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420040074>
- BARROZO, M. A. S. Transferência de Calor e Massa entre o Ar e Sementes de soja em Leito Deslizante e Escoamentos Cruzados. Tese de Doutorado. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UFSCar, São Carlos, SP, 1995.
- BARROZO, M. A. S.; HENRIQUE, H. M.; SARTORI, J. M. D.; FREIRE, J. T. Drying of soybean seeds in a crossflow moving bed. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 77, 1999.

- BORTOLOTTI, C. T. Estudo experimental da fluidodinâmica de uma mistura de resíduo de acerola e soja em leito de jorro. Tese de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2012.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos / Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária – Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1018 p. (Série A. Normas e Manuais Técnicos). Cap VI – Análise Sensorial.
- BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. On a theory of the van der Waals adsorption of gases. *Am. Chem. Soc. J.*, v.62, p.1723–1732, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1021/ja01864a025>
- CÁCERES-HUAMBO, B. N. Simulação e otimização de um secador industrial de túnel para frutas. 2002. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2002.
- CANOVAS, G. V. B.; MERCADO, H. V. Dehydration of foods, Chapman and Hall, New York, NY, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2456-1>
- CARMO, J.E.F.do; LIMA, A. G. B. de. Drying of lentil including shrinkage: A numerical solution. *Drying Technology*, v. 23, p.1977-1992, 2005 DOI: <https://doi.org/10.1080/07373930500210424>
- CARVALHO, C. C.; TREICHEL, M.; KIST, B. B.; SANTOS, C. E.; FILTER, C. F. Anuário brasileiro de fruticultura 2017. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, Santa Cruz do Sul, RS, 2017. 88 p.
- CARVALHO, C.R.L.; MANTOVANI, D.M.B.; CARVALHO, P.R.N.; MORAES, R.M.N. Análises Químicas de Alimentos. Campinas: ITAL, 1990. 121p.
- CELESTINO, S. M. C. Princípios de Secagem de Alimentos. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, Documentos 276, 2010.
- CHEMKHI, S.; ZAGROUBA, F.; BELLAGI, A. Modelling and simulation of drying phenomena with rheological behavior. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 2, p. 153-163, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-66322005000200001>
- CHOI, Y.; OKOS, M. R.. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In *Food Engineering and Process Applications*, vol. 1, pp. 93-101, 1986.
- CINAR, I. D. Mathematical modeling and computer simulation of simultaneous heat and mass transfer during drying of food particles. Tese (Doutorado) – Universidade da Georgia, Atenas, 2002.
- CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; CHRIST, D.; MANTOVANI, B. H. M. Curvas de dessecção e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca (Zeamays). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, n. 1, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v2n1p75-79>
- DUTCOSKY, S.D. Análise sensorial de alimentos. Curitiba: Ed. DA Champagnat, 1996. 123.p.
- EBERLY, D. Derivative approximation by Finite Differences. Disponível em: <http://www.geometrictools.com/>. Acesso em: novembro de 2016.
- FELDBERG, N.P.; REGINA, M.A.; DIAS, M.S.C. Desempenho agrônomo das videiras ‘Crimson Seedless’ e ‘Superior Seedless’ no norte de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, p.777-783, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600003>
- FERREIRA, L. F. D.; PIROZI, M. R.; RAMOS, A. M.; PEREIRA, J. A. M. Modelagem matemática da secagem em camada delgada de bagaço de uva fermentado. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v.47, n.6, p.855-862, 2012.

- FREITAS, D. G. C.; MACHADO, J. A.; MATTOS, C. T. G. B.; NOGUEIRA, R. I.; CORNEJO, F. E. P.; SOUZA, R. T.; MAIA, J. D.G.; RITSCHER, P. S. Aceitação de uvas-passas brasileiras e suas características sensoriais segundo a percepção do consumidor. Rio de Janeiro: Embrapa Uva e Vinho, 2013. 5p. (Embrapa Uva e Vinho. Comunicado Técnico, 192).
- GABAS, A. L. Secagem de uva Itália em leito fixo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998. 153 f.
- GUIGON, S. M. da S. Aproximações analíticas e solução exata das equações de Luikov para secagem em meios porosos capilares. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 90 f, 1995.
- HINDMARSH, A. C. Brief description of ODEPACK – A sustematized collection of ODE Solvers single precision version. Disponível em: www.netlib.org/odepack/opks-sum. Acesso em: 09 de maio de 2017.
- HUSSAIN, M. M.; DINCER, I. Analysis of two-dimensional heat and moisture transfer during drying of spherical objects. International Journal of Research, v. 27, p. 703-713, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.906>
- IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. Handbook of food isotherms: Water sorption parameters for food and food components. EUA: Academic Press, 1982. 347 p.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Métodos físico-químicos para análise de alimentos, 4. ed. 2009.
- IRUDAYARAJ, J.; HAGHIGHI, K.; STROSHINE, R. L. Finite element analysis of drying with application to cereal grains. J. agric. Engng Res., v.53, p.209-229, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(92\)80084-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(92)80084-6)
- IRUDAYARAJ, J.; WU, Y. Analysis and application of Luikov's heat, mass and pressure transfer model to capillary porous media. Drying Technology, v.14, p. 803-824, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939608917125>
- IRUDAYARAJ, J.; WU, Y. Heat and mass transfer coefficients in drying of starch based food systems. Journal of food Science, v. 64, n.2, p.323-327, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1999.tb15892.x>
- KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, p. 4914-4925, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.035>
- KATEKAWA, M. E. Análise teórico-experimental do encolhimento: Estudo da secagem de banana. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2006. 151 f.
- KIRANOUDIS, C. T.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D.; TSAMPARLIS, M. Design of tray dryers for food dehydration. Journal of Food Engineering, v. 32, p. 269-261, 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00010-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00010-1)
- LEÃO, P. C. de S. Principais variedades de uvas de mesa e porta-enxertos. In: Acesso Livre à Informação Científica da Embrapa, 2006. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/157815/1/OPB707.pdf> Acesso em: 24 de out. de 2016.
- LENH, D. N.; PINTO, L. A. A.. Isotermas de Equilíbrio e Curvas de Secagem para Arroz em Casca em Silos de Armazenagem. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.12, n.3, p. 177-191, 2004.

- LEWIS, M. J. Physical Properties of Foods and Food Processing Systems. Cambridge Inglaterra: Woodhead Publishing Limited. Inglaterra, 1996.
- LIMA, L. F. Físico Química – Alimentos. Notas de Aula - Anexos. Disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/lisandra/fisico-quimica-alimentos/anexos> Acesso em: 7 de nov. 2016.
- LUIKOV, A. V. Heat and mass transfer in capillary-porous bodies. Pergamon Press, Oxford, 1966. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-0065-1.50010-6>
- LUIKOV, A. V. System of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. International Journal Heat and Mass Transfer, v.18, p. 1-14, 1975. DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(75\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0017-9310(75)90002-2)
- MABROUK, S. B.; KHIARI, B.; SASSI, M. Modelling of heat and mass transfer in a tunnel dryer. Applied Thermal Engineering, v. 26, p. 2110-2118, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.007>
- MACHADO, A. V.; SOUZA, J. A.; NOVAES, R. S. Estudo cinético da secagem da uva Isabel para produção de uva-passa. Revista Verde, Pombal, v. 10, n. 1, p. 47-51, 2015.
- MAROULIS, Z. B.; DROUZAS, A. E.; SARAVACOS, G. D. Modeling of thermal conductivity of granular starches, Journal of Food Engineering, v.11, p.255-271, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(90\)90042-7](https://doi.org/10.1016/0260-8774(90)90042-7)
- MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M.; ZANINI, H. L. H. T. Calor específico e densidade da polpa de cajá (*Spondias lutea* L.) com diferentes concentrações de sólidos solúveis sob baixas temperaturas. Eng. Agríc., Japoticabal, v.25, n.2, p.488-498, 2005.
- MELLO, L. M. R. de. Produção e comercialização de uvas. In: NACHTIGAL, J.C.; CAMARGO, U.A.; CONCEICAO, M.A.F. (Ed.). Uvas sem sementes: cultivares BRS Morena, BRS Clara e BRS Linda. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, 2004. p.11-14. (Embrapa Uva e Vinho. Sistemas de produção, 1).
- MELO FILHO, A. B. DE; VASCONCELOS, M. A. DA S. Produção Alimentícia. Recife, 2011 78 p.
- MUJUMDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying, 3ª ed., Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420017618>
- MUÑOZ, A. M.; CIVILLE, G. V.; CARR, B. T. Sensory evaluation in quality control. New York: Van Nostrand Reinhold; 1993. p. 240.
- NIELSEN, S.S. Análisis de los alimentos. Manual de laboratório. Zaragoza: Acribia, 2003. p. 39-42.
- NOGUEIRA, G. D. R. Estudo de técnicas híbridas de desidratação de resíduos de acerola. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.
- OUESLATI, H.; MABROUK, S. B.; MAMI, A. Dynamic modelling and performance study of solar gas tunnel dryer. Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, v. 20, n. 2, p. 130-145, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/13873954.2013.819020>
- PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO; I. M. Secagem: Fundamentos e Equações. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014. DOI: <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127>
- PENOV, N.; ROYTCHEV, V.; CHRISTOV, C.H. Influence of osmotic treatment in the drying of sultanina grapes (*Vitis vinifera* L.). Bulgarian Journal of Agricultural Science, v. 15, n.5, p.386-392, 2009.
- PERRY, R. H.; GREEN, D. W. Perry's Chemical Engineers Handbook. 7th Ed. USA: McGraw-Hill, 1997.

- PFEIFER, A. A. Análise da modelagem, simulação e otimização da secagem em leito deslizante com escoamentos paralelos. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2011. 203f.
- PUHL, J.; NITZKE, J. A. Secagem de vegetais: Secador de Esteira. Disponível em: http://www.ufrgs.br/alimentus1/objetos/veg_desidratados/c_esteira.html. Acesso em 24 de outubro de 2016.
- RAHMAN, M. S. Food Properties Handbook. 2ªEd. Nova Iorque: CRC Press, Nova Iorque, 2009. p.n/a.
- RAMOS, I. N; BRANDÃO, T. R. S.; SILVA, C. L. M. Simulation of solar drying of grapes using na integrated heat and mass transfer model. Renewable Energy, v. 81, p. 896-902, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.011>
- RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H., DATTA, A. K. Engineering properties of foods. 3ª Ed. Nova York: CRC Press, 1996. 738p.
- RATHORE, N. S.; PANWAR, N. L. Experimental studies on hemi cylindrical walk-in type solar tunnel dryer for grape drying. Applied Energy, v. 87, p. 2764-2767, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.03.014>
- REETZ, E. R.; KIST, B. B.; SANTOS, C. E.; CARVALHO, C.; DRUM, M. Anuário Brasileiro de fruticultura 2015. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz LTDA, Santa Cruz do Sul, RS, 2015. 104p.
- REYES, A.; ALVAREZ, P. I.; MARQUARDT, F. H. Drying of carrots in a fluidized bed. I. Effects of drying conditions and modelling. Drying Technology, v.20, n. 7, p.1463-1483, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1081/DRT-120005862>
- REZENDE, D. R. Modelagem e simulação da secagem de frutos de café em um secador de bandejas vibradas. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2011, 115f.
- RIBEIRO, V. S.; SOBRAL, M. C.; ALMEIDA, M. M.; SILVA, G. F. Propriedades físicas de produtos agrícolas. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.4, n.1, p. 1-6, 2002. DOI: <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v4n1p1-6>
- SFREDO, M. A. Secagem de café para obtenção de bebidas finas. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2002. 197 f.
- SILVA, C. K. F. da. Estimção de parâmetros de secagem de alimentos – Formulação de Luikov e uso da transformada integral generalizada. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba, 126 f., 2010.
- SOUZA, A. M. Estudo Fluidodinâmico e Transferência de Calor e Massa em Leito Deslizante Contracorrente. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- STONE, H. S.; SIDEL, J. L. Sensory evaluation practices. San Diego, CA: Academic Press; 1992.
- SWEAT, V. E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables. Journal of Food Science, v. 39, p. 1080- 1083, 1974. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1974.tb07323.x>
- TEIXEIRA E.; MEINERT E. M.; BARBETTA P. A. Análise sensorial de alimentos. Florianópolis (SC): Editora da UFSC; 1987.
- TEIXEIRA, L. V. Sensory analysis in the food industry Rev. Inst. Latic. “Cândido Tostes”, Jan/Fev, nº 366, 64: 12-21, 2009.

- TELES, A. R. S.; CONCEIÇÃO, A. M.; SILVA, G. S.; SANTOS, S. P. S.; SANTOS, R. G.; SILVA, G. F. Cinética e modelagem da secagem da uva Crimson em secador convectivo. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados – ENEMP, 2015, São Carlos – SP. ENEMP, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5151/ENEMP2015-MS-625>
- TELIS, V. R. N.; LOURENÇON, V. A.; GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J. Drying rates of Rubi grapes submitted to chemical pretreatments for raisin production. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.41, n.3, p.503-509, 2006.
- THOMPSON, J. 'Tunnel dehydration' in: Raisin production manual, pp. 224-227, ed: P. Christensen, University of California, Agriculture and Natural Resources, Oakland, CA, USA, 2000.
- VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G. D. Thermal Properties of Raisins. *Journal of Food Engineering*, v. 11, p. 147-158, 1990a. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(90\)90050-l](https://doi.org/10.1016/0260-8774(90)90050-l)
- VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D.; SARAVACOS, G. D. An analysis of mass transfer in air-drying of foods. *Drying Technology*, v. 8, n. 2, p. 323-342, 1990b. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939008959886>
- VAGENAS, G. K.; MARINOS-KOURIS, D. The design and optimization of an industrial dryer for sultana raisins. *Drying Technology*, v. 9, n. 2, p.439-461, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939108916675>
- ZOGZAS, N. P.; MAUROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. *Drying Technology*, New York, v.14, n.10, p. 2225- 2253, 1996. DOI: <https://doi.org/10.1080/07373939608917205>

APÊNDICES

**APÊNDICE A – GRÁFICOS DE RESÍDUOS: MODELOS DE
ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO**

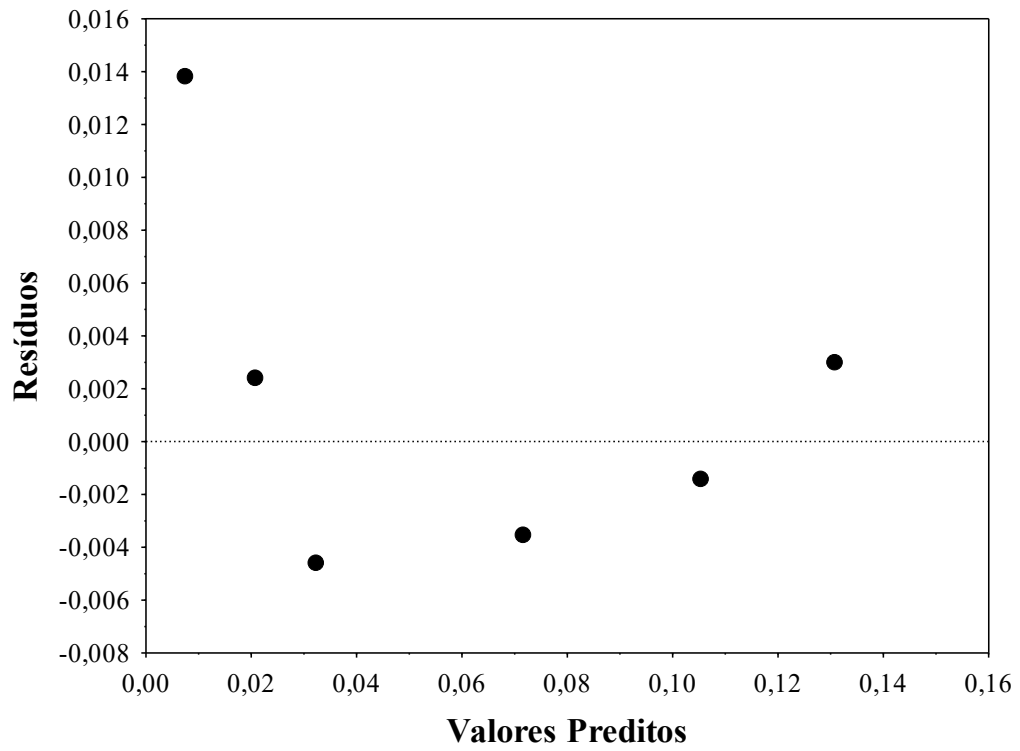


Figura A 1 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo Henderson

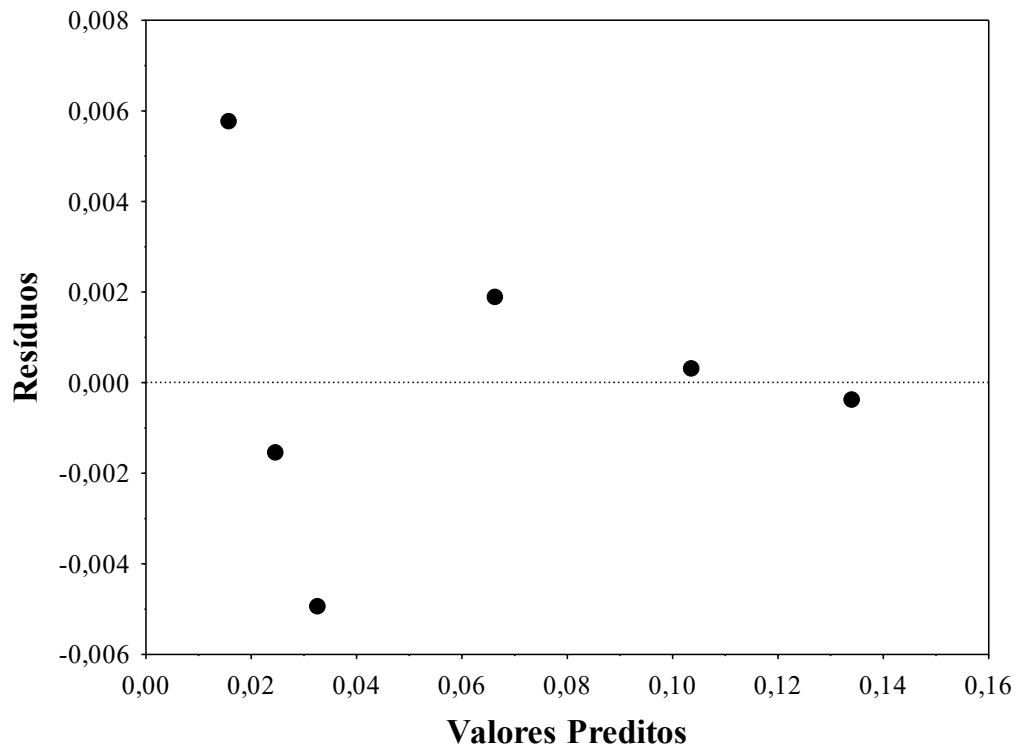


Figura A 2 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Halsey modificado

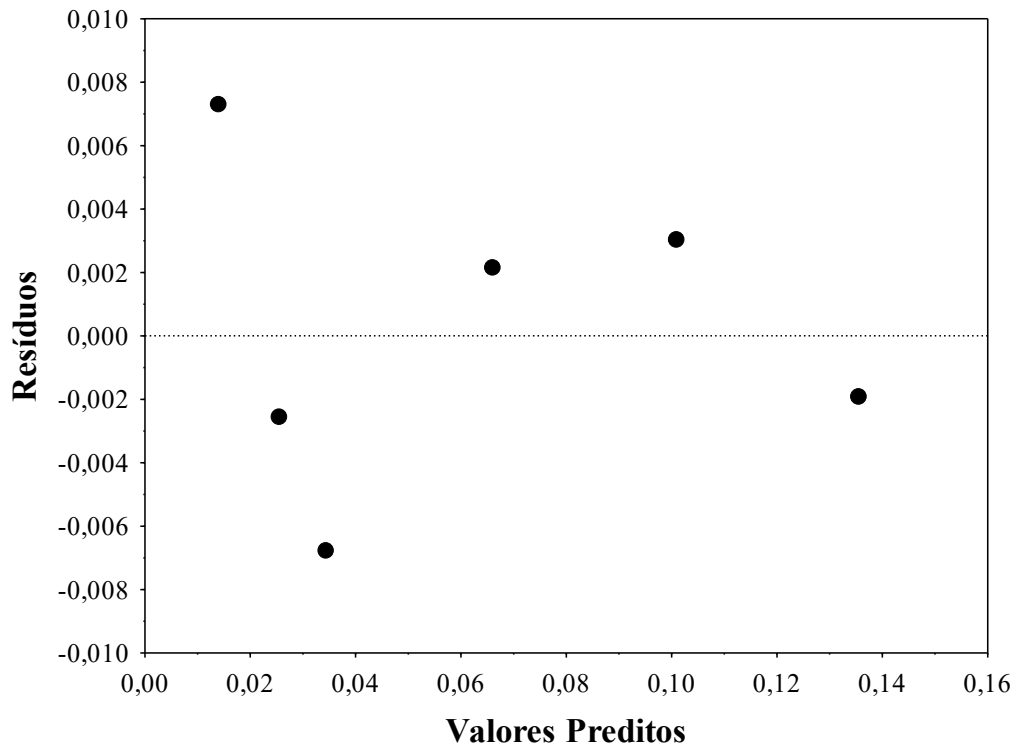


Figura A 3 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Oswin

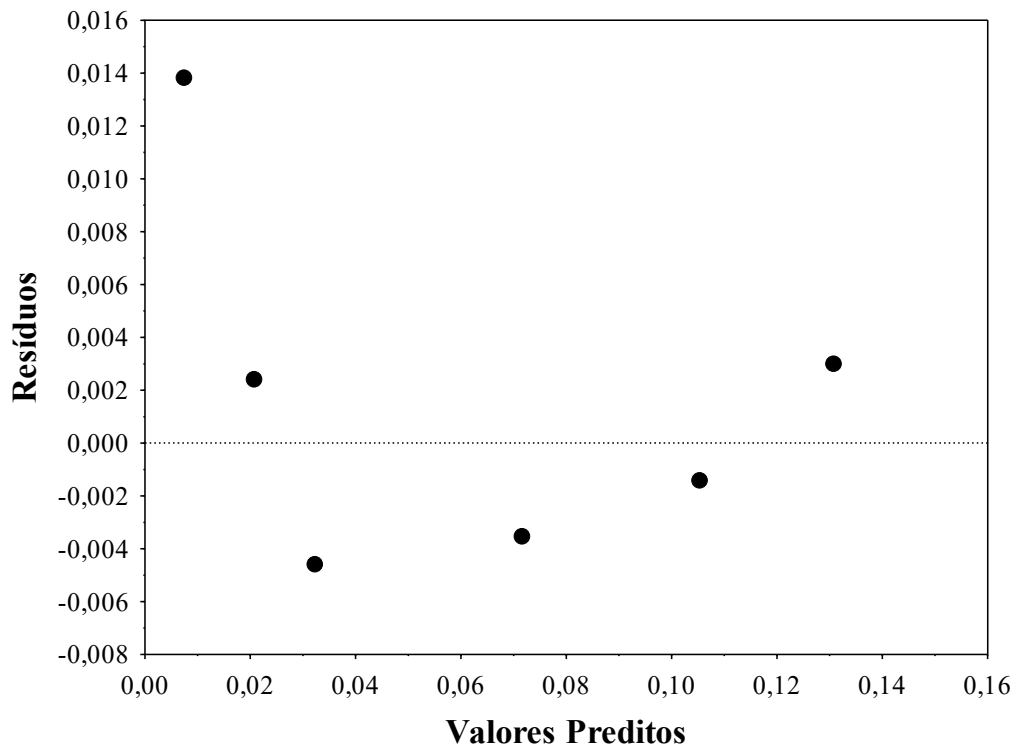


Figura A 4 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Henderson modificado

**APÊNDICE B – GRÁFICOS DE RESÍDUOS: MODELOS DE CINÉTICA
DE SECAGEM**

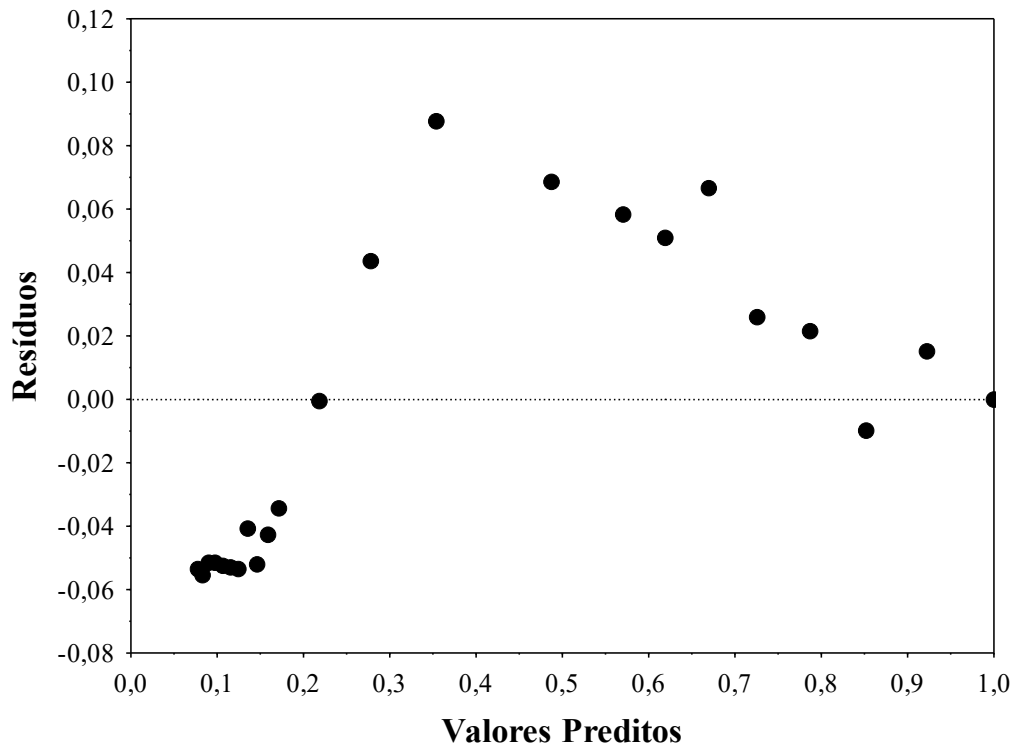


Figura B 1 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Newton

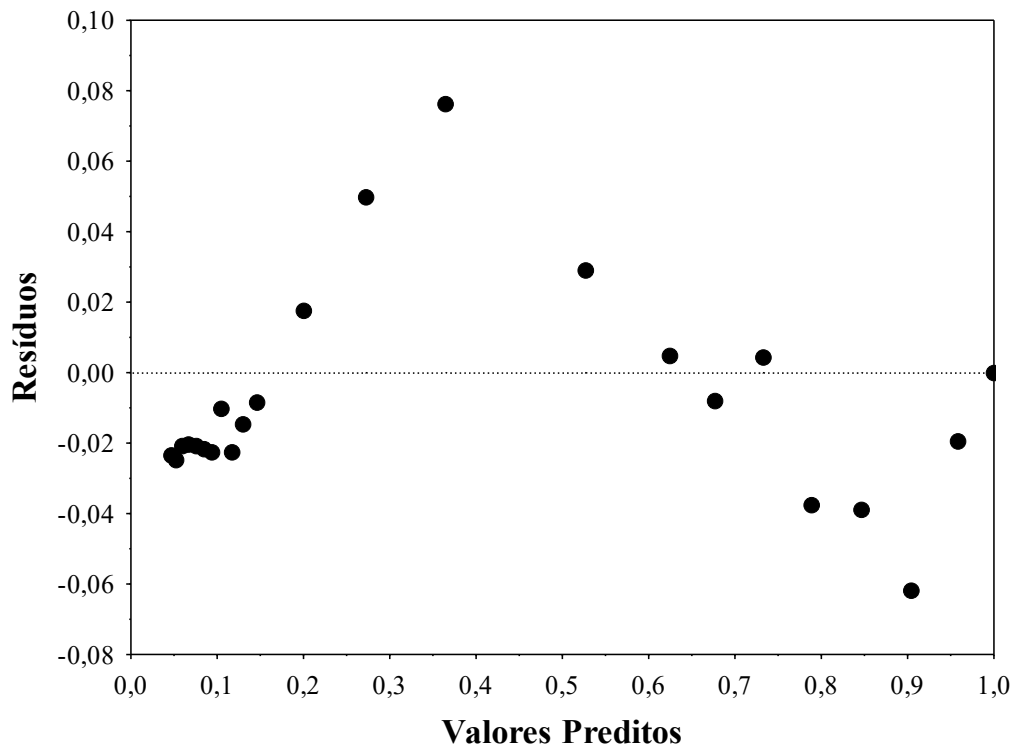


Figura B 2 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Page

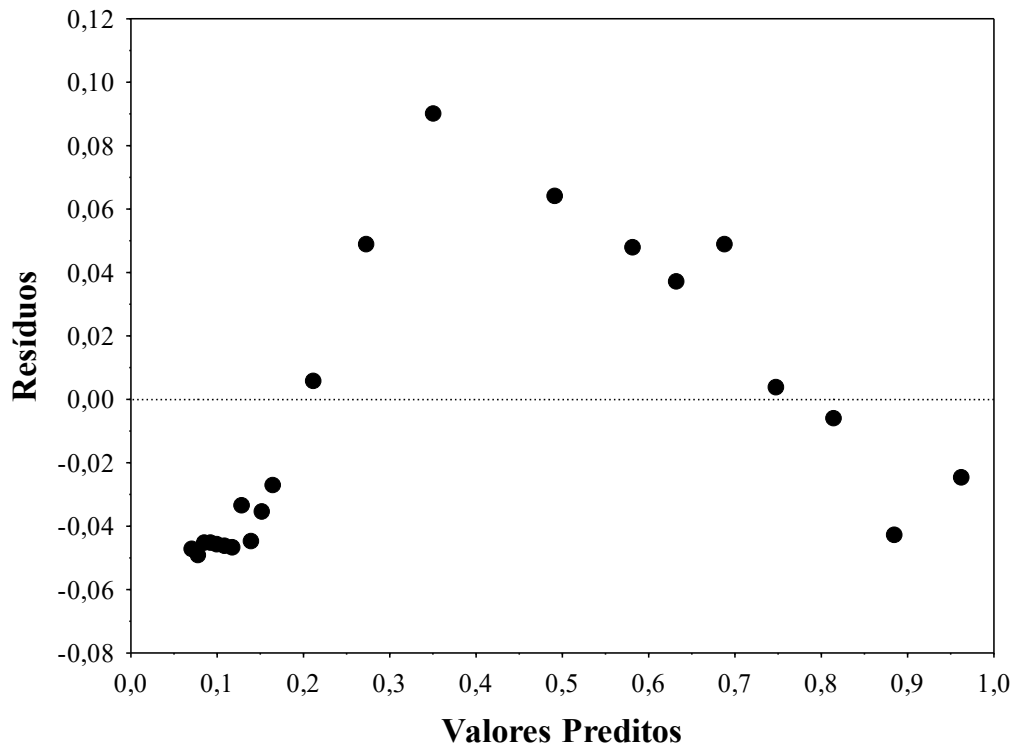


Figura B 3 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Henderson e Pabis

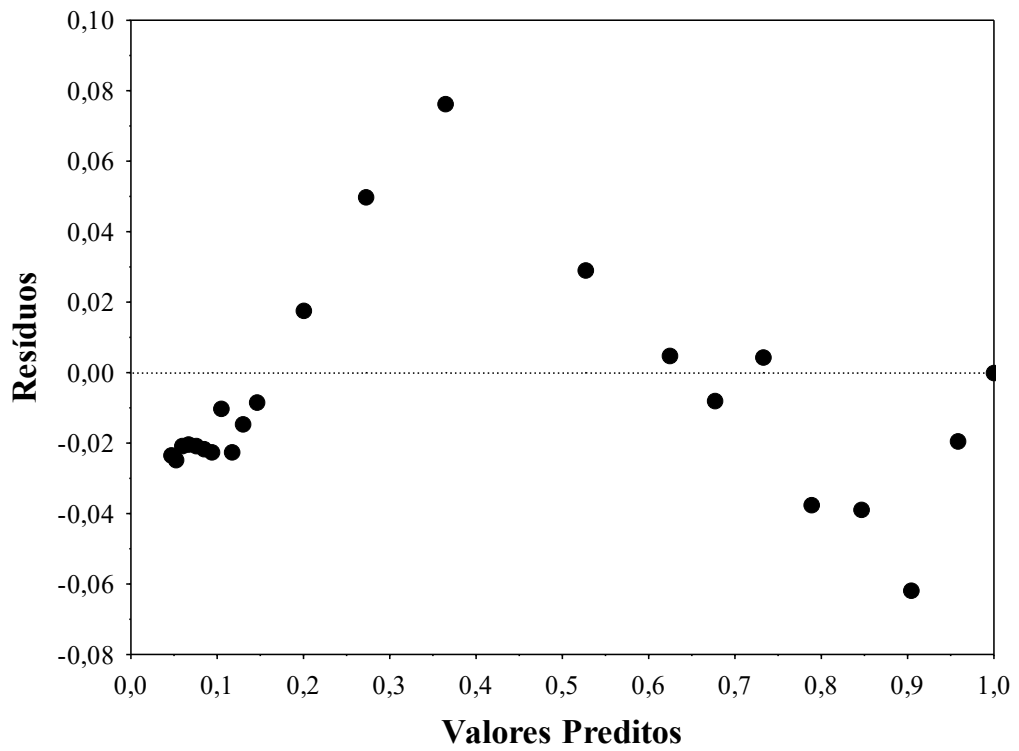


Figura B 4 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo de Overhults

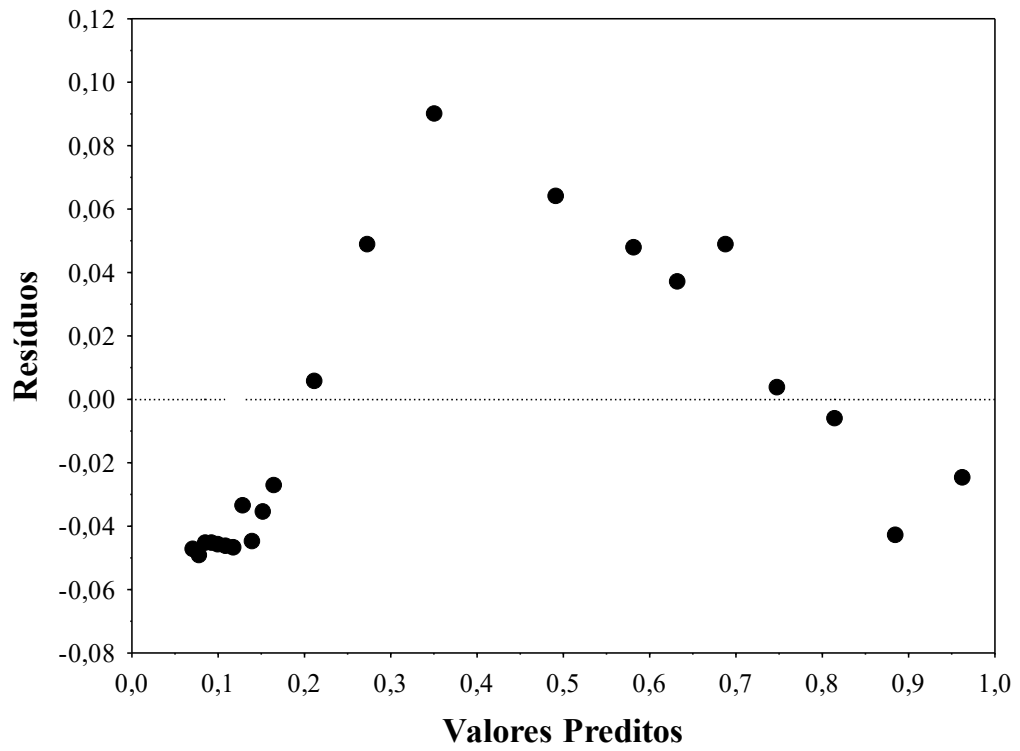


Figura B 5 – Valores preditos *versus* resíduos obtidos pelo modelo chamado Dois termos

**APÊNDICE C – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E
ESCLARECIDO**

TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Você está sendo convidado (a) para participar da pesquisa intitulada “Avaliação sensorial de uvas-passas”, sob a responsabilidade dos pesquisadores Profa. Valeria Viana Murata, Luis Claudio Oliveira Lopes, Vivian Consuelo Reolon Schmidt, Marielle Francisquetti e Ana Luiza Guimaraes Borges. Nesta pesquisa nós estamos buscando verificar a aceitação de uvas-passas no mercado.

O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido será obtido pela pesquisadora Ana Luiza Guimaraes Borges, antes de servir a amostra de uvas-passas para degustação.

Na sua participação você deverá ingerir uma amostra de 2 uvas e preencher na escala da ficha de avaliação a sua opinião.

Você não terá nenhum gasto e ganho financeiro por participar da pesquisa. Os riscos consistem em possível efeito diurético e ocasional alergia a uvas-passas, provocando diarreia, flatulência e/ou coceira. Caso algum destes sintomas seja observado durante a execução da pesquisa, você será encaminhado a um médico, com os custos pagos pela equipe executora do projeto. Você poderá ser beneficiado com os efeitos positivos das uvas-passas, como redução do risco de diabetes, ingestão de quantidades significantes de minerais e aminoácidos, atividade antioxidante e potenciais atividades antibacteriana, antiviral e anti-hipertensiva. A equipe executora reconhece que há risco de sua identificação durante a realização da pesquisa. Contudo, para minimizá-lo, a equipe executora do projeto se compromete a não identificar com seu nome as fichas de coleta de dados. Para evitar qualquer associação visual, as fichas serão recolhidas da cabine e imediatamente colocadas com o anverso em branco para cima. Ao final de cada sessão as fichas serão misturadas e só então os dados serão tabulados.

Você é livre para deixar de participar da pesquisa a qualquer momento sem nenhum prejuízo ou coação. Esta pesquisa poderá ser encerrada ou suspensa quando: a) o laboratório não fornecer condições higiênico-sanitárias para a realização dos testes; b) as amostras não estiverem em condições de teste; c) não houver quantidade suficiente de amostra; d) não houver provadores para avaliação.

Uma via original deste Termo de Consentimento Livre e Esclarecido ficará com você.

Qualquer dúvida a respeito da pesquisa, você poderá entrar em contato com: Prof^a. Valeria Viana Murata, Prof^o Luis Claudio Oliveira Lopes, Prof^a Vivian Consuelo Reolon Schmidt, Marielle Francisquetti e Ana Luiza Guimaraes Borges, na Av. Getúlio Vargas, 230, Patos de Minas, MG, ou pelo telefone (34) 3823-3714. Poderá também entrar em contato com o Comitê de Ética na Pesquisa com Seres-Humanos – Universidade Federal de Uberlândia: Av. João Naves de Ávila, nº 2121, bloco A, sala 224, Campus Santa Mônica – Uberlândia –MG, CEP: 38408-100; fone: (34) 3239-4131.

Patos de Minas, 28 de abril de 2017


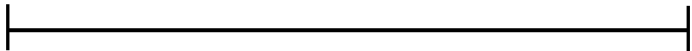
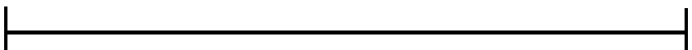


Assinatura dos pesquisadores

Eu aceito participar do projeto citado acima, voluntariamente, após ter sido devidamente esclarecido.

Participante da pesquisa

**APÊNDICE D – FICHA DE COLETA DE DADOS: TESTE DE
ACEITAÇÃO**

Avalie a amostra de uva passa e indique o quanto você gostou ou desgostou utilizando a escala abaixo, para os seguintes parâmetros:

| | |
|-------------------------|--|
| APARÊNCIA: |  |
| | Desgostei Gostei |
| TEXTURA: |  |
| | Desgostei Gostei |
| AROMA: |  |
| | Desgostei Gostei |
| SABOR: |  |
| | Desgostei Gostei |
| IMPRESSÃO GERAL: |  |
| | Desgostei Gostei |

Avalie as características abaixo e assinale se elas estão presentes na uva passa:

- | | | |
|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| Aparência boa: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Aroma característico | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Aroma doce: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Saborosa: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Sabor característico: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Doce: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Suculenta: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Macia: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Aroma ruim: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Sabor fermentado: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Amarga: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Dura: | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |
| Ressecada | <input type="checkbox"/> SIM | <input type="checkbox"/> NÃO |