

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

WEBBER TAVARES DE CARVALHO

**SECAGEM DE POLPA RESIDUAL OBTIDA NA
INDUSTRIALIZAÇÃO DE BATATA FRITA**

GOIÂNIA
2012

WEBBER TAVARES DE CARVALHO

**SECAGEM DE POLPA RESIDUAL OBTIDA NA
INDUSTRIALIZAÇÃO DE BATATA FRITA**

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Goiás, como exigência para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Soares Soares Júnior

Comitê de Orientação: Prof. Dr. Flávio Alves da Silva
Prof. Dr. Márcio Caliari

GOIÂNIA
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

WEBBER TAVARES DE CARVALHO

**SECAGEM DE POLPA RESIDUAL OBTIDA NA
INDUSTRIALIZAÇÃO DE BATATA FRITA**

Dissertação DEFENDIDA e APROVADA em 12 de abril de 2012, pela
Banca Examinadora constituída pelos membros:

Prof^ª. Dr^ª. Araceli Aparecida Seolatto
IQ/UFG

Prof^ª. Dr^ª. Orlene Silva da Costa
UEG

Prof. Dr. Manoel Soares Soares Júnior
Orientador - EA/UFG

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Maria Lúcia e Iremar, ao meu irmão Luan, a minha amada avó Benedita e ao querido Rafael.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meus pais, Maria Lúcia e Iremar, e meu irmão, pelo alicerce que formam em minha vida diária, construído pelo incentivo, confiança, apoio, força e amor em todos os momentos.

Ao Rafael, pelo grande carinho e importante presença ao meu lado nos últimos meses do trabalho, cujo incentivo, força e “puxadas de orelha” foram de imprescindível valia.

Ao Professor Manoel Soares Soares Júnior, admirado orientador, pela confiança, amizade, paciência e orientação, sem as quais nada poderia ter sido feito.

Aos professores Flávio Alves da Silva e Márcio Caliari pelas orientações e conselhos, contribuindo para a realização deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos técnicos da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da UFG, Ana Paula e Deivis, e à colega Divina Vilhalva, pelo auxílio durante as análises laboratoriais.

A todo o pessoal do Centro de Treinamento da EMATER pela disponibilização do local para realização do experimento e toda ajuda estrutural envolvida, em especial à amiga Ivanete pelo carinho, suporte, amizade e companheirismo.

A empresa Cicopal Ltda. pela concessão do material de estudo (polpa residual de batata) e abertura da indústria, bem como o auxílio oferecido pela Eng^a. Monalisa e pela Eng^a. Thays Lima durante a realização do experimento.

Aos colegas da pós-graduação e a todos os amigos que direta ou indiretamente me acompanharam por esse caminho e se regozijam com a conclusão desta etapa.

A todos vocês, muito obrigado!

RESUMO

A industrialização da batata, tubérculo que é o quarto alimento mais consumido no mundo, se apresenta em ascensão no Brasil, dentre a qual se encontra a produção de batatas fritas, processo que gera um resíduo líquido (polpa residual de batata - PRB), durante a lavagem da matéria-prima, rico em material amiláceo. O aproveitamento desse material poderia gerar benefícios que abrangeriam questões ambientais e também econômicas das empresas, já que acarretaria na utilização de um resíduo como ingrediente para outros produtos, inserindo valor agregado ao mesmo. O alto conteúdo de água da PRB é um fator dificultante de sua utilização, uma vez que a torna altamente perecível e de difícil aplicabilidade. Nesse aspecto, operações de sedimentação e secagem foram estudadas, onde a primeira diminui a umidade a ponto de ser possível ser levada para a realização da segunda em secador de circulação forçada de ar, trazendo a polpa a um nível de umidade baixo e estável. Os objetivos deste trabalho foram determinar o tempo ótimo de sedimentação para a PRB, verificar a influência da temperatura e do fluxo de ar nas características da PRB seca, determinar as condições de temperatura e fluxo de ar que geraram maior desejabilidade da PRB seca quanto as suas propriedades e caracterizar a polpa seca obtida sob essas condições, obter a cinética da secagem nas condições experimentais, bem como realizar a modelagem matemática da secagem levando-se em conta o modelo teórico difusional de Fick e sete modelos empíricos. A sedimentação ótima foi obtida com 15 min e um modelo exponencial de quinta ordem apresentou melhor ajuste para representar essa operação. O ensaio de secagem seguiu um delineamento composto central com fatorial completo de 2^2 , 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 experimentos, onde as variáveis independentes temperatura e fluxo de ar variaram de 50 a 70 °C e 0,015 a 0,023 $\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Durante o estudo das características da PRB seca, a temperatura (x_1) e fluxo de ar (x_2) não se mostraram significativos para a luminosidade (L^*), índice de solubilidade em água (ISA) e capacidade de absorção de óleo (CAO). Quanto maiores os valores de x_1 , menores os de tempo de secagem e atividade de água. O aumento da temperatura diminuiu os valores de pH e aumentou os de acidez titulável. O fluxo de ar apresentou influência quadrática para estas respostas, comportamento semelhante ao observado nos parâmetros de cor a^* e b^* e no índice de absorção de água (IAA). A temperatura afetou estas últimas respostas linearmente, onde quanto maiores valores de x_1 , maiores os das respostas. O teste de desejabilidade para a PRB seca levou em conta os modelos ajustados dos parâmetros de cor a^* e b^* , pH, acidez titulável, com o qual determinou-se que os experimentos realizados no ponto central, tanto para temperatura, quanto para fluxo de ar, obtiveram a maior desejabilidade. Foram realizadas análises de composição centesimal da PRB obtida nesses experimentos e apresentou elevado teor de carboidratos totais e valor energético total e baixos valores de cinzas, lipídeos e proteínas. Um método para determinação de qual modelo empírico seria mais adequado à secagem foi criado, tendo como critério de avaliação a comparação, concomitantemente, dos fatores estatísticos coeficiente de regressão (R^2), erro médio relativo [$P(\%)$], raiz do quadrado médio do erro (RQME) e qui-quadrado reduzido (χ^2). Verificou-se que os modelos de Midilli e Aproximação da difusão foram os que melhor ajustaram os dados experimentais. Quanto à cinética da secagem, observou-se que a temperatura foi o fator que mais afetou na diminuição dos tempos de secagem, enquanto o fluxo de ar se mostrou influente quando apresentava grande discrepância entre seus valores. A difusividade efetiva (D_{ef}) variou entre 7,337 e $12,935 \times 10^{-11} \text{m}^2.\text{s}^{-1}$ e a temperatura se mostrou mais importante para sua determinação que o fluxo de ar.

Palavras-chave: *Solanum tuberosum* L., modelagem matemática de secagem, cinética de secagem, polpa residual de batata.

ABSTRACT

The potato is the fourth food more consumed around the world and its industrialization is rising in Brazil. One of the products is the french fries whose process generate a liquid waste (potato residual pulp - PRP) during the washing of the raw material. This liquid is rich in starch. The use of this material could generate benefits that would reach environmental and economic issues of the companies, considering the insertion of aggregate value in a waste as using it as an ingredient in other products. The high content of water of the PRP makes it highly perishable and difficult its use. In this aspect, sedimentation and drying operations were studied, where the sedimentation reduce the moisture of the pulp making possible to lead it to drying in a forced circulation air stove, bringing the pulp to a stable and low moisture level. The aims of this work were to determine the optimum time of sedimentation to the PRP, verify the influence of temperature and air flow in the dried PRP characteristics, determine the temperature and air flow conditions that generated the greater desirability of the dried PRP about its properties and characterize the dried pulp obtained in those conditions, obtain the drying kinetic in the experimental conditions, as also realize the mathematical modeling of drying taking into account the theoretical diffusion model of Fick and seven empirical models. The optimized time of decantation was 15 min and a fifth-order exponential model was set to represent the process. The drying test followed a central composite design with complete factorial of 2^2 , 4 axial points and 4 repeats in central point, resulting 12 experiments. Air temperature ranged from 50 °C to 70 °C while air flow ranged from 0,015 m³.kg.s⁻¹ to 0,023 m³.kg.s⁻¹. The air temperature (x_1) and air flow (x_2) were not significant to luminosity (L^*), water solubility index (WSI) and oil absorption capacity (OAC). The increase of values of x_1 led to decrease of the values of drying time and water activity. The increase of air temperature decreased values of pH and, consequently, increased titratable acidity. Air flow showed quadratic influence to those responses as occurred to color parameters a^* and b^* and water absorption index (WAI). The air temperature affected those last responses linearly, where higher values of x_1 led to higher values of the responses. The desirability test for dried PRP taking to account the adjusted models of color parameters a^* and b^* , pH and titratable acidity. That test revealed higher desirability to experiments realized in central points of air temperature and air flow. It was realized analysis of centesimal composition of the residual pulp obtained in those experiments. They showed high total carbohydrate content and energetic value while low values of ash, lipids and proteins. It was created a method to determinate which empirical model showed better fit to drying data. The method had as criteria the concomitant comparison of the following statistic factors: regression coefficient (R^2), relative mean error [$P(\%)$], root mean square error ($RMSE$) and chi-square (χ^2). It was determined that the Midilli and the Diffusion approximation models had the best fit. About kinetic of drying it was observed that air temperature was the factor that more affect the increase of drying rates and decrease of drying time, while the air flow only showed influence when its values were distant. The effective diffusivity (D_{ef}) ranged from 7,337 e 12,935x10⁻¹¹ m².s⁻¹ and the air temperature was more important than air flow for its determination.

Palavras-chave: *Solanum tuberosum* L., mathematical modeling of drying, drying kinetic, potato residual pulp.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.	Cálculo de atividade de água em função da pressão de vapor e da fugacidade.....	26
Equação 2.	Fluxo de massa de acordo com a teoria da difusão.....	32
Equação 3.	Fluxo de massa difusional em sistema de coordenadas esféricas	33
Equação 4.	Condição inicial admitida durante processo de secagem de material esférico	33
Equação 5.	Condição de contorno 1, teor de água constante na superfície, admitida durante processo de secagem de material esférico.....	33
Equação 6.	Condição de contorno 2, teor de água máximo no centro, admitida durante processo de secagem de material esférico	33
Equação 7.	Equação difusional para secagem de material esférico levando-se em conta as condições inicial e de contorno.....	34
Equação 8.	Cálculo do erro médio relativo em função do teor de sólidos totais.....	43
Equação 9.	Cálculo do nível dos pontos axiais do delineamento composto central.....	44
Equação 10.	Determinação do fluxo de ar em função da velocidade do ar medida pelo anemômetro	44
Equação 11.	Fórmula geral de modelo preditivo de segunda ordem em função de duas variáveis independentes.....	46
Equação 12.	Cálculo da umidade em base úmida no instante t durante secagem	47
Equação 13.	Cálculo do índice de absorção de água (IAA).....	50
Equação 14.	Cálculo do índice de solubilidade em água (ISA).....	50
Equação 15.	Cálculo da capacidade de absorção de óleo (CAO).....	51
Equação 16.	Cálculo do adimensional de umidade no instante t	52
Equação 17.	Cálculo do adimensional de umidade simplificado no instante t	52
Equação 18.	Cálculo do erro médio relativo em função do adimensional de umidade	54
Equação 19.	Cálculo da raiz do quadrado médio do erro.....	54
Equação 20.	Cálculo do qui-quadrado reduzido	54
Equação 21.	Cálculo do número de classes da distribuição de frequências de Sturges.....	56
Equação 22.	Cálculo da amplitude da classe da distribuição de frequência de Sturges	57
Equação 23.	Cálculo do adimensional de umidade para secagem de material com geometria esférica segundo Crank (1975) - Classe completa.....	57

Equação 24. Variável z , aplicada à equação difusional de Crank (1975), em função da difusividade efetiva (D_{ef}).....	58
Equação 25. Cálculo do adimensional de umidade para secagem de material com geometria esférica segundo Crank (1975), com substituição da variável z	58
Equação 26. Equação do modelo de Midilli ajustada para os dados do experimento 4	84
Equação 27. Equação do modelo de Midilli ajustada para os dados do experimento 12.....	84
Equação 28. Equação do modelo de Aproximação da difusão ajustada para os dados do experimento 4.....	86
Equação 29. Equação do modelo de Aproximação da difusão ajustada para os dados do experimento 12.....	86
Equação 30. Cálculo do adimensional de umidade para secagem de material com geometria esférica segundo Crank (1975), com substituição da variável z - Classe até $n=4$	89
Equação 31. Equação ajustada de modelo quadrático para estimativa da difusividade efetiva (D_{ef}) em função das variáveis temperatura e fluxo do ar de secagem ..	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Fluxograma do processamento industrial de batatas fritas (palha ou <i>chips</i>) e valores de perdas durante o processo.	24
Figura 2.	Curvas de secagem características para propriedades do ar constantes.	30
Figura 3.	Esquema do ensaio de sedimentação da polpa residual líquida obtida durante a lavagem de batatas da linha de produção de batatas fritas.	42
Figura 4.	Secadora utilizada durante ensaio de secagem da polpa residual de batata. Vista externa (A); vista interna com as bandejas (B); caixa de controle da temperatura e velocidade do ar (C); vista lateral com detalhe do orifício de saída do ar (D).....	48
Figura 5.	Teor de sólidos totais da polpa sedimentada (A) e do sobrenadante (B) em função do tempo de sedimentação da polpa residual de batata, ajustado a um modelo polinomial de quinta ordem.....	62
Figura 6.	Tempo de secagem (min) (A) e atividade de água – A_w (B) da polpa residual de batata seca em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).	65
Figura 7.	pH (A) e acidez titulável (%) (B) da polpa residual de batata seca em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).....	68
Figura 8.	Parâmetros de cor a^* (A) e b^* (B) e índice de absorção de água – IAA [$\text{g}_{\text{gel}}.(\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$] (C) da polpa residual de batata seca em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).	71
Figura 9.	Teste de desejabilidade realizado para a polpa residual de batata seca, levando-se em conta as propriedades parâmetros instrumentais de cor a^* e b^* , pH e acidez titulável.	77
Figura 10.	Adimensional de umidade em função do tempo para os experimentos 4 (A) e 12 (B), comparando os ajustes obtidos pelos modelos de Midilli e Aproximação da difusão.....	85
Figura 11.	Adimensional de umidade em função do tempo para os experimentos de 1 a 4 (pontos fatoriais) (A), 5 a 8 (pontos axiais) (B) e 9 a 12 (pontos centrais) (C) durante modelagem da cinética de secagem de polpa residual de batata. Linhas contínuas representam o ajuste dos dados preditos pelo modelo de Midilli.	88

Figura 12. Gráfico de superfície de resposta e curvas de contorno obtidas para a difusividade efetiva (D_{ef}) em função da temperatura e fluxo do ar de secagem de polpa residual de batata. 93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Condições inicial e de contorno durante processo de secagem de material em geometria esférica.....	33
Tabela 2.	Níveis codificados e reais de temperatura (x_1) e fluxo de ar (x_2) utilizadas no experimento de secagem.....	45
Tabela 3.	Delineamento experimental para secagem da polpa residual de batata em função das variáveis de secagem, em valores codificados e reais.	45
Tabela 4.	Modelos matemáticos teóricos considerados durante a cinética de secagem de polpa residual de batata.....	53
Tabela 5.	Teores de sólidos totais da polpa sedimentada (STP) e do sobrenadante (STS) obtidos nos tratamentos de sedimentação da polpa residual de batata ¹	59
Tabela 6.	Ajuste (Coeficiente de regressão, R^2 , e erro médio relativo, $P(\%)$) dos modelos polinomiais ao processo de sedimentação de resíduo de lavagem de batatas quanto ao teor de sólidos totais da polpa sedimentada (STP) e do sobrenadante (STS) em função do tempo de sedimentação (t).....	60
Tabela 7.	Modelos de regressão múltipla, coeficiente de regressão (R^2) e ajustado (R^2 ajustado) para o tempo de secagem (min), atividade de água – Aw, pH, acidez titulável (%), parâmetros de cor a^* e b^* e índice de absorção de água – IAA [$(g_{gel} \cdot (g_{matéria\ seca})^{-1})$] das polpas residuais de lavagem de batatas secas em função da temperatura (x_1) e do fluxo de ar (x_2).	64
Tabela 8.	Umidade (b.u.), cinzas, lipídeos, proteínas e carboidratos (b.s.) e valor energético total da polpa residual de batata seca obtida por secagem na condição de temperatura do ar de 60 °C e fluxo do ar de 0,019 m ³ .kg.s ⁻¹	78
Tabela 9.	Limites inferiores e superiores das classes em que foram divididos os valores obtidos para cada fator estatístico aplicado aos dados de adimensional de umidade encontrados durante modelagem da cinética de secagem de polpa residual de batata.	82
Tabela 10.	Somatório dos <i>scores</i> obtidos para os fatores estatísticos avaliados para os modelos teóricos avaliados durante a secagem do resíduo da lavagem de batatas.....	83
Tabela 11.	Valores dos fatores z e difusividades efetivas (D_{ef}) encontradas para os experimentos de secagem de polpa residual de batata, em função da temperatura (x_1) e fluxo do ar (x_2).	90

Tabela 12.	Análise dos coeficientes de regressão de modelo matemático codificado para a variável difusividade efetiva (D_{ef}).	92
Tabela 13.	Análise dos coeficientes de regressão de modelo matemático codificado para a variável difusividade efetiva (D_{ef}), após ignorância dos fatores x_2 quadrática (a_{22}) e interação x_1x_2 (a_{12}).....	92

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A	Modelo de planilha preenchida durante experimento de secagem da polpa residual de batata sedimentada	107
Apêndice B	Propriedades da polpa residual de batata seca nas condições experimentais variáveis quanto à temperatura e ao fluxo de ar, de acordo com os experimentos no delineamento composto central	108
Apêndice C	Tabelas de ANOVA dos modelos ajustados para as variáveis dependentes em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).....	110
Apêndice D	Valores obtidos para o fator estatístico erro relativo médio ($P(\%)$), raiz quadrada média do erro ($RQME$), qui-quadrado reduzido (χ^2) e coeficiente de regressão (R^2) durante modelagem de cinética do ensaio de secagem de polpa residual de batata	112
Apêndice E	Constantes experimentais (coeficientes das equações) obtidas para os modelos teóricos estudados em cada experimento do ensaio de secagem de polpa residual de batata	116

LISTA DE ABREVEATURAS E UNIDADES

<i>a, b, c, e</i>	constantes experimentais dos modelos de secagem
<i>A_w</i>	atividade de água
<i>b.s.</i>	base seca
<i>b.u.</i>	base úmida
<i>CAO</i>	capacidade de absorção de óleo
<i>D_{ef}</i>	difusividade efetiva (m ² .s ⁻¹)
<i>exp</i>	função exponencial natural
<i>f</i>	número de fatores do experimento
<i>g</i>	grama
<i>IAA</i>	índice de absorção de água
<i>ISA</i>	índice de solubilidade em água
<i>k</i>	constante de secagem
<i>K</i>	kelvin
<i>kcal</i>	quilocaloria
<i>kg</i>	quilograma
<i>kJ</i>	quilojoule
<i>L</i>	litro
<i>min</i>	minuto
<i>mm</i>	milímetro
<i>mL</i>	mililitro
<i>mol</i>	mol
<i>MS</i>	matéria seca
<i>MSR</i>	Metodologia de Superfície de Resposta
<i>n</i>	número de observações ou nível de somatório da equação de Crank (1975)
<i>N</i>	número de pontos experimentais ou número de classes de Sturges
<i>PEAD</i>	polietileno de alta densidade
<i>PVC</i>	policloreto de vinila
<i>ppm</i>	partes por milhão
<i>P (%)</i>	erro relativo médio
<i>r e R_{esf}</i>	raio esférico
<i>RQME</i>	raiz do quadrado médio do erro
<i>R²</i>	coeficiente de regressão
<i>s</i>	segundos
<i>ST_{exp,t}</i>	sólidos totais observados experimentalmente no tempo <i>t</i>
<i>ST_{pre,i}</i>	sólidos totais preditos pelo modelo para o tempo <i>t</i>
<i>STP</i>	sólidos totais da polpa sedimentada
<i>STS</i>	sólidos totais do sobrenadante
<i>t</i>	tempo

<i>UFG</i>	Universidade Federal de Goiás
<i>v</i>	número de coeficientes e constantes
x_1	variável independente temperatura do ar (°C)
x_2	variável independente fluxo do ar (m ³ .kg.s ⁻¹)
<i>X</i>	umidade
X_{BU}	umidade em base úmida
X_0	umidade inicial
X_{eq}	umidade de equilíbrio
X_t	umidade média no tempo <i>t</i>
<i>y</i>	variável dependente (resposta)
<i>Y</i>	adimensional de umidade
$Y_{exp,i}$	adimensional de umidade observado experimentalmente
$Y_{pre,i}$	adimensional de umidade predito pelo modelo
α	nível do ponto axial do delineamento composto central
χ^2	qui-quadrado reduzido
$\frac{\partial X}{\partial t}$	fluxo mássico de água em função do tempo
$\frac{\partial X}{\partial r}$	fluxo mássico de água em função da distância radial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1.	BATATA.....	21
2.2.	RESÍDUOS INDUSTRIAIS	24
2.3.	SECAGEM.....	28
2.3.1.	Cinética de secagem	29
2.3.2.	Modelo difusional	32
2.3.3.	Modelos empíricos	34
2.3.4.	Influência da temperatura e velocidade / fluxo do ar	36
2.3.5.	Difusividade efetiva	37
3	OBJETIVOS	39
4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1.	MATERIAL	40
4.2.	MÉTODOS.....	40
4.2.1.	Sedimentação do resíduo	40
4.2.1.1.	Determinação do tempo ótimo de sedimentação.....	40
4.2.1.2.	Modelagem da sedimentação	41
4.2.1.3.	Sedimentação dos resíduos para secagem.....	43
4.2.2.	Secagem do resíduo	43
4.2.2.1.	Determinação da umidade inicial do resíduo sedimentado.....	43
4.2.2.2.	Delineamento experimental da secagem.....	44
4.2.2.3.	Ensaio de secagem	46
4.2.3.	Influência da temperatura e fluxo de ar nas propriedades da polpa residual de batata	49
4.2.3.1.	Atividade de água	49
4.2.3.2.	Cor	49
4.2.3.3.	pH	49
4.2.3.4.	Acidez titulável.....	49
4.2.3.5.	Índice de absorção de água e índice de solubilidade em água	50
4.2.3.6.	Capacidade de absorção de óleo.....	50
4.2.4.	Teste de desejabilidade	51
4.2.5.	Composição centesimal da polpa residual de batata seca	51
4.2.6.	Cinética e modelagem matemática da secagem	52
4.2.6.1.	Modelos empíricos.....	52
4.2.6.2.	Ajuste dos modelos matemáticos	53
4.2.6.3.	Determinação do modelo mais adequado à secagem	54
4.2.7.	Cálculo da Difusividade efetiva (D_{ef})	57
4.2.7.1.	Determinação do raio esférico médio	58
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1.	SEDIMENTAÇÃO DO RESÍDUO.....	59
5.1.1.	Determinação do tempo ótimo de sedimentação	59
5.1.2.	Modelagem da sedimentação	60
5.2.	SECAGEM DA POLPA RESIDUAL DE BATATA.....	63

5.2.1.	Influência da temperatura e fluxo de ar nas propriedades da polpa residual de batata	63
5.2.1.1.	Tempo de secagem	64
5.2.1.2.	Atividade de água	66
5.2.1.3.	pH e acidez titulável	67
5.2.1.4.	Luminosidade (L*) e parâmetros de cor (a* e b*).....	69
5.2.1.5.	Índice de absorção de água, índice de solubilidade em água e capacidade de absorção de óleo	72
5.3.	TESTE DE DESEJABILIDADE E COMPOSIÇÃO CENTESIMAL.....	77
5.3.1.	Teste de desejabilidade	77
5.3.2.	Composição centesimal	78
5.4.	MODELAGEM DA SECAGEM	81
5.5.	CINÉTICA DE SECAGEM.....	86
5.6.	CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA (D_{ef})	89
6	CONCLUSÕES	94
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICES	107

1 INTRODUÇÃO

A batata (*Solanum tuberosum* L.) é um tubérculo de enorme importância na economia e alimentação humana mundial. Caracteriza-se como o quarto produto agrícola mais produzido no planeta e no Brasil está entre os dez mais consumidos, sendo a hortaliça mais relevante economicamente (PINELI et al., 2006). É muito importante na dieta da população, pois além de ser bastante nutritiva ao ser fonte de amido (alimento energético) e de proteínas de boa qualidade, apresenta enorme abrangência em termos de área cultivada, o que reduz os custos de produção. É muito consumida *in natura* e sua industrialização está em ascensão, principalmente na produção de fécula e de batatas fritas (AGRIANUAL, 2011). No entanto, um problema aparente desse tipo de industrialização é sua grande produção de resíduos de alto poder poluidor.

A geração de resíduos industriais se caracteriza como grande problema no desenvolvimento das empresas. Para se produzir, variados são os dejetos indesejáveis gerados que representam, além de perda de matéria-prima, gastos adicionais com seu tratamento para futuro descarte no ambiente.

Resíduos muito importantes da indústria de processamento de batatas fritas são obtidos após o descascamento, corte e lavagem das batatas (MAYER, 1998). Após o peneiramento da água de lavagem, são gerados dois resíduos: o retido denominado de casca e o permeado, após sedimentação, denominado de polpa residual de batata. Ambos são ricos em compostos orgânicos que, se lançados indiscriminadamente como efluentes no solo e rios, podem acarretar sérios problemas ambientais (WANG et al., 2009).

Atualmente, a casca depois de separada é compostada ou deixada em zonas de sacrifício, enquanto que, a água rica em fécula geralmente é despejada em um saco trançado de polipropileno tipo “*big bag*”, onde sofre um processo natural de sedimentação e é vendida para ração animal. Ambos são rotulados de resíduos, não são tratados e normalmente sofrem fermentações naturais. O possível aproveitamento desses resíduos na geração de subprodutos estáveis e sua posterior utilização como ingrediente de outro produto alimentício, pode trazer benefícios que permeiam várias vertentes (PELIZER; PONTINERI; MORAES, 2007).

Consegue-se aumentar o valor agregado do subproduto, que antes era apenas resíduo, tornando-o apto a ser embutido em outras cadeias produtivas. Além dos benefícios econômicos triviais decorrentes desta medida, importante também passa a ser o impacto social, uma vez que o reaproveitamento de resíduos pode levar a uma diminuição de preço dos produtos que passariam a utilizar tais ingredientes ou componentes, aumentando a

competitividade do mercado, conseguindo, portanto, atingir camadas sociais de renda mais baixa com produtos mais baratos, sem perda de qualidade.

A vertente ambiental é outra que pode ser atingida favoravelmente com tais medidas, uma vez que tais materiais residuais deixam de ser eliminados no meio ambiente, ou pelo menos, têm tal quantidade consideravelmente reduzida. O grau de poluição dos recursos ambientais é afetado positivamente, cumprindo, em termos gerais, os requisitos da sustentabilidade.

Os resíduos mencionados têm como importante característica seu elevado teor de água que, juntamente com o amido e as fibras, alicerçam sua composição (MAYER; HILLEBRANDT, 1997). Isso faz com que ele seja um material altamente perecível e instável microbiologicamente, praticamente inutilizável se mantido em seu estado original por poucas horas. A desidratação (secagem) é um método pelo qual se executa a extração da água livre no alimento, o que contribui diretamente na estabilidade, tanto microbiologicamente, quanto em termos de reações enzimáticas deteriorantes, tais como escurecimento e rancificação. Ao diminuir-se o teor de água, essas reações são desaceleradas, quando não evitadas, garantindo uma vida útil maior ao produto (COSTA, 2007).

Portanto, a realização de secagem dos resíduos se perfaz como uma alternativa para aproveitamento e agregação de valor aos mesmos. O estudo de tal operação, por meio da cinética e modelagem da secagem, se torna uma saída relevante para otimização e elucidação a respeito de todas as variáveis envolvidas, acarretando diminuição de riscos na implantação de um projeto e elevando a possibilidade de obtenção de bons resultados práticos.

Vários são os fatores relevantes nos processos de secagem, dentre os quais estão as condições externas a que os produtos são expostos, onde a temperatura e fluxo do ar (velocidade) apresentam grande importância ao influenciarem os processos de migração e fluxo de água do produto para o meio de secagem, afetando a difusividade e a taxa de remoção de umidade. Condições internas dos produtos, como composição da matriz sólida e teor inicial de umidade, também se revelam importantes, já que determinam as condições iniciais da secagem, determinam o grau de resistência aos movimentos difusionais de umidade e dão indicativos das características desejadas ao produto final (VALENTE, 2007).

As características finais do material, que podem também ser fortemente influenciadas pelas condições de secagem, são requisitos importantes para determinação do destino de aproveitamento a ser dado ao produto, dentre as quais se encontram a atividade de água, cor, pH, acidez e propriedades funcionais, tais como índice de absorção e solubilidade em água e capacidade de absorção de óleo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BATATA

A batata (*Solanum tuberosum* L.), planta originária da América do Sul, possui um tubérculo que é o produto olerícola de maior expressão como alimento no mundo e o quarto alimento mais consumido mundialmente (atrás dos três principais cereais: trigo, arroz e milho). É considerada um dos dez principais produtos agrícolas brasileiros e a hortaliça mais importante para a economia nacional, representando faturamento superior a R\$ 1,4 bilhão (PINELI et al., 2006). Além disso, sua eficiência produtiva garante elevado aproveitamento de áreas destinadas à produção de alimentos, característica importante em um cenário mundial de constante crescimento populacional e insegurança alimentar (FERNANDES et al., 2010).

No Brasil, a batata é uma das principais hortaliças cultivadas e, principalmente, consumidas, constituindo-se em um dos alimentos mais importantes na dieta humana, em virtude de sua disponibilidade e características nutricionais (MACHADO; TOLEDO, 2004). Quanto ao aspecto nutricional, 100 g de batata suprem cerca de 10% das necessidades de um adulto em tiamina, niacinas, vitamina B6, ácido fólico e proteínas e 50% da vitamina C. Quando comidas com casca, são ricas em carboidratos complexos e fibras (PEREIRA; LUZ; MOURA, 2005).

No ano de 2008, a produção mundial deste tubérculo ultrapassou os 332 milhões de toneladas, abrangendo uma área plantada de pouco mais de 18 milhões de hectares. Têm-se observado um grande aumento dos níveis de produção de batata na América Latina e Ásia, sendo que este último continente já conta com a maior produção mundial, com destaque para China (maior produtora) e Índia, que juntas plantam quase um terço da batata consumida no mundo (AGRIANUAL, 2011). O Brasil ocupa a décima quinta posição entre os países produtores, sendo o primeiro na América Latina (FAO, 2008).

No biênio 2008-2009 a produção total nacional de batata foi de 3,55 milhões de toneladas por ano, com produtividade de 25 toneladas por hectare. A região Sudeste participou com 53,4% do total, a Sul 32,3%, a Nordeste 8,3% e a Centro-Oeste 6,3%. A alteração de participação no abastecimento brasileiro ocorreu devido à melhoria da tecnologia de produção e também pela presença de áreas novas em Goiás e na Bahia, que apresentam menores custos de produção, clima mais estável e uso da irrigação (CAMARGO FILHO; CAMARGO, 2011). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, no ano

de 2011 a produção de batata inglesa no Brasil subiu para 3,94 milhões de toneladas (IBGE, 2012).

Por seu elevado conteúdo de amido (da ordem de 20%), o tubérculo de batata é um alimento energético, menos consumido como tal e muito mais como hortaliça de acompanhamento ou em forma de produtos transformados (ELLISSÈCHE, 2002). Apesar da incontestável importância da cadeia da batata para o agronegócio brasileiro, a industrialização desta hortaliça ainda tem muito a expandir, já que ainda há margem a um grande volume de importações do produto processado, principalmente as batatas congeladas pré-fritas. No período 2005-2009 a quantidade média importada foi 6.345 t/ano, o principal país fornecedor foi a Argentina. No entanto, a quantidade importada tende a diminuir, uma vez que o Brasil tem expandido o processamento de batata (AGRIANUAL, 2011).

Embora a batata não seja uma fonte protéica importante do ponto de vista quantitativo, em termos nutricionais a qualidade de sua proteína é elevada, pois contém metionina e cisteína, aminoácidos limitantes para os requerimentos nutricionais humanos. Aproximadamente 80% do peso dos carboidratos da batata são formados pelo amido, que é composto de amilopectina (75-79%) e amilose (21-25%). Além disso, tem representação de peso sob aspectos econômicos e sociais no agronegócio (OLIVEIRA; REIS; PEREIRA, 2006; TORRES, 1999).

No Brasil, o consumo de batata industrializada aumentou nos últimos anos. No entanto, a produção nacional está concentrada em um número restrito de cultivares. As cultivares Ágata, Asterix, Atlantic, Markies e Mondial estão entre as mais plantadas no Brasil e representam a maior parcela de toda a área plantada com batata no país. Contudo, apenas a cultivar Atlantic tem sido utilizada em grande escala na indústria de processamento (FERNANDES et al., 2010).

Os principais produtos industrializados derivados de batata são os desidratados e congelados. Os produtos obtidos a partir da desidratação das batatas tais como fécula, flocos e farinha são utilizados pela indústria alimentícia na fabricação de pães, bolos, como agentes espessantes em sopas e molhos, na formulação de produtos instantâneos (pudim, macarrão), entre outros. Outros exemplos de produtos desidratados são os cubos de batata desidratados e a batata frita (*chips* ou palha). A maior parte da batata industrializada no Brasil é processada desta forma, em fábricas de pequeno a grande porte, sendo a batata frita de ótima aceitação pelo mercado nacional. O principal segmento de mercado para a batata *chips* é o consumidor direto, enquanto que para a batata palha são os restaurantes e lanchonetes (BERBARI; AQUIRRE, 2002).

Durante a produção de derivados de batata, tais como batatas fritas, há a produção de uma grande quantidade de um resíduo líquido proveniente da lavagem da matéria prima, que consiste basicamente de água, restos celulares, moléculas de amido intacto e pequenas partes da casca da batata (MAYER, 1998). Em algumas indústrias, parte desse resíduo é retido em um saco trançado de polipropileno tipo “*big bag*”, que separa o líquido da fração particulada (polpa). Este resíduo é composto de amido, celulose, hemicelulose, pectina, proteínas, aminoácidos livres e sais, exibindo propriedades físicas e físico-químicas de um colóide típico (MAYER; HILLEBRANDT, 1997).

O resíduo amiláceo de batata é uma importante fonte de poluição, pois contém alta concentração de contaminantes orgânicos, tais como amido, sacarídeos, proteínas e outras substâncias solúveis (WANG et al., 2009). Processos e produtos poderiam ser estabelecidos para a utilização do resíduo de industrialização de batata frita. Uma estratégia seria converter a polpa residual de batata fresca na forma modificada e de baixo custo, que poderia ser armazenada, como uma espécie de farinha, o que a tornaria adequada para várias aplicações (MAYER; HILLEBRANDT, 1997).

O processamento de batatas fritas (palha ou *chips*) está esquematizado na figura 1, onde se têm alguns dados relativos à quantidade de resíduos produzidos nas etapas de descascamento (7,5%) e corte/lavagem (0,5%).

Na etapa de descascamento, as batatas são colocadas em equipamentos específicos, tais como máquinas descascadoras nas grandes indústrias. Para pequenos e médios produtores, o descascamento é efetuado em equipamento com disco abrasivo giratório que também permite a lavagem dos tubérculos por meio de jato de água acoplado ao equipamento. As batatas são cortadas em processador de acordo com o produto desejado: batata *chips* lisa, batata *chips* ondulada ou batata palha (TFOUNI et al., 2003).

Após o corte, as fatias devem ser lavadas com jatos d’água ou por imersão para remoção do amido liberado na superfície, de modo a evitar que elas grudem umas às outras durante a fritura. No caso de batata palha, o processo de lavagem deve ser cuidadoso, porque há maior liberação de amido e os pedaços são mais frágeis e mais susceptíveis à quebra (TFOUNI et al., 2003).

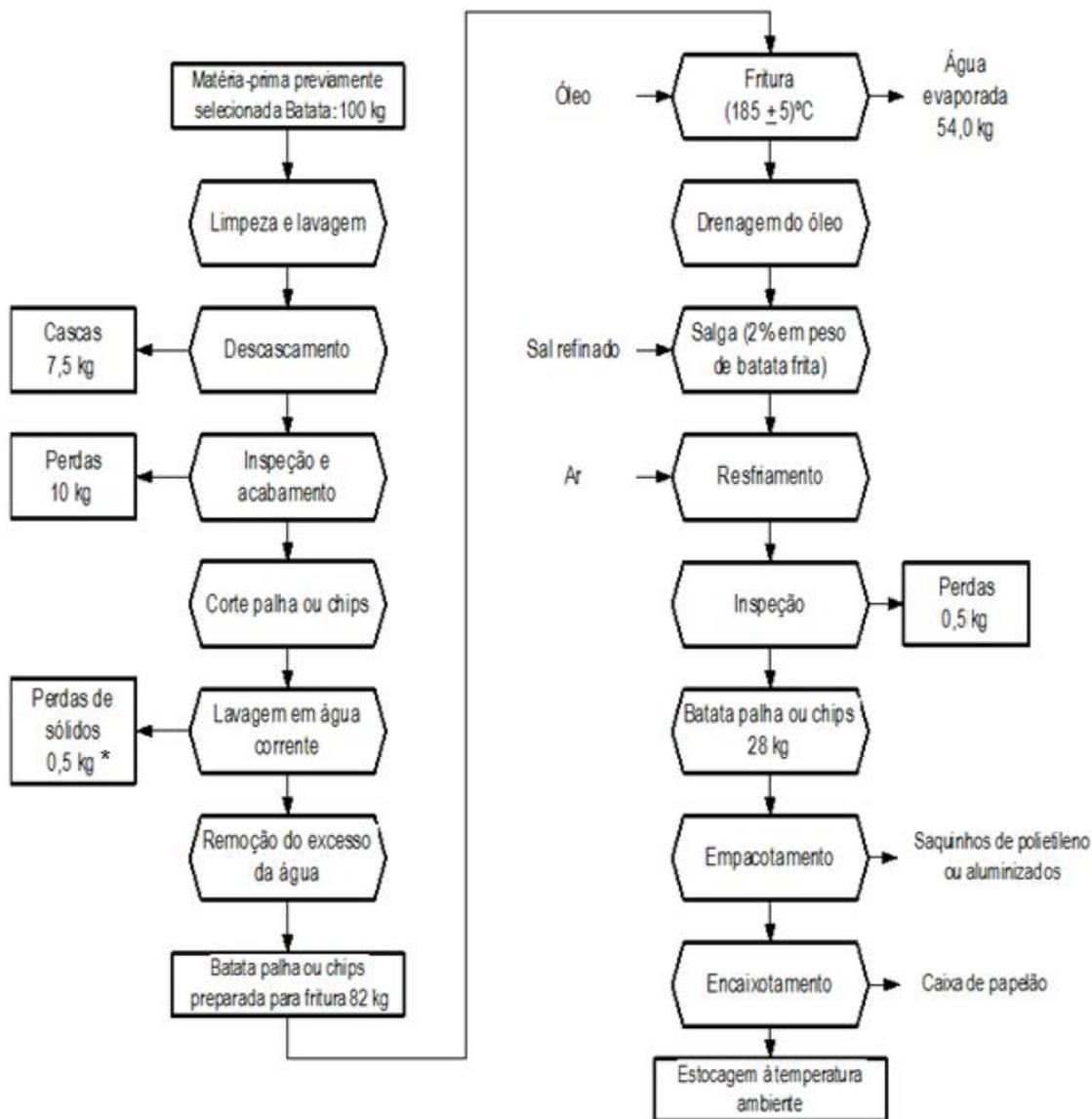


Figura 1. Fluxograma do processamento industrial de batatas fritas (palha ou *chips*) e valores de perdas durante o processo.

*Material objeto deste estudo.

Fonte: TFOUNI et al. (2003).

2.2. RESÍDUOS INDUSTRIAIS

A geração de resíduos nas indústrias de alimentos se caracteriza como uma das grandes preocupações do século, em virtude dos conceitos cada vez mais difundidos de sustentabilidade. Os resíduos representam perdas de matérias-primas e energia, exigindo investimentos significativos em tratamentos para controlar a poluição. Muitos dos tratamentos

“fim de tubo” não eliminam realmente os resíduos gerados, apenas os transferem para outro meio que não os esperava (TIMOFIECSYK; PAWLOWSKY, 2000).

A Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) postulou que é necessário identificar e difundir amplamente tecnologias e procedimentos adequados para reduzir ao mínimo os resíduos, trabalho que deve ser coordenado pelos governos, com a cooperação e colaboração de organizações não-governamentais, instituições de pesquisa e organismos competentes da Organização das Nações Unidas (ONU). A tais entidades, portanto, compreende, entre outras coisas, facilitar a transferência de tecnologias de redução dos resíduos para a indústria, principalmente nos países em desenvolvimento (MMA, 1992).

As instituições de pesquisa, em parcerias com as indústrias produtoras de resíduos, se tornaram criadoras e difusoras de tecnologias e processos adequados para tratamento e aproveitamento destes resíduos. Pelizer, Pontineri e Moraes (2007) reportaram que se forem empregadas tecnologias adequadas, os resíduos agroindustriais poderiam ser convertidos em produtos comerciais ou matérias-primas para processos secundários. Visando diminuição dos custos nos processos de agroindustrialização de matérias-primas vegetais, investigações têm sido realizadas para a transformação de resíduos em subprodutos e, deste modo, agregar valor ao sistema como um todo (SAITO; CABELLO; FUKISHIMA, 2006).

A preocupação com o meio ambiente tem levado à viabilização de projetos que permitam a sustentabilidade do sistema de produção industrial. A indústria de alimentos produz uma série de resíduos com alto valor de utilização. Inúmeros estudos utilizando resíduos industriais do processamento de alimentos têm sido realizados com objetivo de desenvolver novos produtos. Com isso, minimiza-se o impacto ambiental destes tipos de indústrias nas regiões onde estão situadas e ainda agrega-se valor aos resíduos (PELIZER; PONTINERI; MORAES, 2007). Ao se realizarem estudos para aproveitamento de resíduos, muitas características estruturais e funcionais dos materiais devem ser estudadas, principalmente para sua caracterização e, conseqüentemente, tomar decisões a respeito de suas aplicabilidades.

A água é, provavelmente, o fator individual que mais influi na alteração dos alimentos, afetando sua natureza física e suas propriedades. Este tipo de influência mútua é complicado devido à interação entre a água e o meio em que se encontra o produto, o que envolve a estrutura física e a composição química dos diversos solutos incluindo polímeros e colóides ou partículas dispersas (SILVA et al., 2010b).

Segundo Park, Bin e Brod (2001) é possível estabelecer uma relação estreita entre o teor de água livre no alimento e sua conservação, em que o teor de água livre é expresso pela

atividade de água (A_w), dada pela relação entre a pressão de vapor de água em equilíbrio (P_w) sobre o alimento e a pressão de vapor de água pura (P_v), a mesma temperatura. A atividade de água é também definida como uma função termodinâmica, definida também como a razão entre a fugacidade da água na mistura (f_w) e a fugacidade da água pura no estado padrão (f_0), ambas à mesma temperatura (Equação 1). Essa grandeza pode ser interpretada como a tendência da água líquida em escapar para o estado gasoso (GAL, 1975). A equação 1 mostra estas relações.

$$A_w = \frac{P_w}{P_v} = \frac{f_w}{f_0} \quad (\text{Equação 1})$$

Na qual:

P_w : pressão de vapor parcial no alimento;

P_v : pressão de vapor de saturação na mesma temperatura;

f_w : fugacidade da água na mistura;

f_0 : fugacidade da água pura no estado padrão;

A atividade de água é uma das propriedades mais importantes para o processamento, conservação e armazenamento de alimentos. Ela quantifica o grau de ligação da água contida no produto e, conseqüentemente, sua disponibilidade para agir como solvente e participar das transformações químicas, bioquímicas e microbiológicas (LABUZA, 1995).

O valor máximo de atividade de água é 1, na água pura. Nos alimentos ricos em água ($A_w > 0,90$) podem-se formar soluções diluídas com componentes do alimento em que micro-organismos podem crescer bem. Nessa diluição, as reações químicas e enzimáticas podem ter sua velocidade diminuída devido à baixa concentração de reagentes, mas sofrem facilmente contaminação microbiológica. Quando a atividade de água está entre 0,40 e 0,80, há possibilidade de reações químicas e enzimáticas rápidas pelo aumento das concentrações dos reagentes, enquanto que para atividade de água próxima de 0,60, tem-se pequeno ou nenhum crescimento microbiano. Em regiões de atividade de água inferior a 0,30, a água está fortemente ligada ao alimento, não sendo utilizada pelos micro-organismos e para dissolver componentes do alimento, o que leva as reações a terem velocidade tendendo a zero, com exceção da oxidação de lipídios, que é consideravelmente mais rápida (BOBBIO; BOBBIO, 2001).

A cor é um dos parâmetros de qualidade (atributos) mais importantes para avaliação de ingredientes e produtos alimentícios, a qual é influenciada pelas condições operacionais e composição da matéria-prima. É uma característica que pode ser diretamente alterada durante o processo de aquecimento e secagem, já que muitas reações, tais como as de escurecimento não enzimático e degradação de pigmentos, podem ser favorecidas pela elevação da temperatura. Se o escurecimento é muito intenso, cores e sabores indesejáveis podem aparecer. Também, mudanças de cor durante as operações unitárias aplicadas podem ser um indicador para avaliar a intensidade do processo em relação às mudanças químicas e nutricionais dos alimentos (TROMBINI, 2010).

A concentração hidrogeniônica, que determina o pH dos alimentos, é um dos principais fatores que exercem influência sobre o crescimento, a sobrevivência ou a destruição dos micro-organismos (SILVA, 2000). Ele determina ainda o grau de deterioração potencial do meio pelos processos de fermentação e atividade enzimática. A acidez titulável, por sua vez, quantifica os ácidos orgânicos presentes nos alimentos. A acidez dos produtos alimentícios está também diretamente ligada aos seus aspectos sensoriais, já que a alta acidez e baixo pH pode conferir sabor azedo (FELTRAN; LEMOS; VIEITES, 2004).

Propriedades como absorção de água e de óleo e solubilidade em água são características importantes a serem avaliadas em um produto que intente ser utilizado como ingrediente para aplicação alimentar (MIZUBUTI et al., 2000), uma vez que estão relacionados à fatores como a capacidade de produtos em se dissolver em água a temperatura ambiente ou aquecida, absorção de óleo durante fritura, entre outros.

A capacidade de absorção de água representa a quantidade de água que permanece ligada nas proteínas e carboidratos após exposição a um excesso de água e aplicação de uma força de centrifugação ou pressão. Solubilidade é a medida da capacidade de uma determinada substância dissolver-se em um líquido e é influenciada pela quantidade de grupos hidrofílicos e hidrofóbicos presente na superfície dos compostos a serem solubilizados, das interações entre as próprias biomoléculas e entre essas moléculas e o líquido (ALONSO et al., 2000; HERNANDÉS-DIAS et al., 2007).

O índice de solubilidade em água (ISA) está relacionado à quantidade de sólidos solúveis em água de uma amostra seca, permitindo verificar o grau de severidade do tratamento (altas temperaturas e baixas umidades), em função da degradação, gelatinização, dextrinização e consequente solubilização do amido (LEONEL et al., 2006).

Os tratamentos térmicos podem ocasionar alterações na capacidade de absorção de óleo (CAO) por afetarem a estrutura proteica. Processos que ocasionam alterações de

proteínas podem alterar a hidrofobicidade e afetar sua interação com as moléculas lipídicas (ZHENG et al., 2008). Da mesma forma que o índice de absorção de água (IAA) está relacionado com os grupos hidrofílicos dos produtos, a CAO está relacionado com os grupos hidrofóbicos e com a capacidade de manter em sua estrutura certa quantidade de óleo (LEORO, 2007).

2.3. SECAGEM

A secagem tem como objetivo primordial a eliminação de umidade de um produto, sendo uma operação unitária bastante utilizada nos processos industriais. Embora seja grande o interesse em sua compreensão, ela ainda é uma das operações menos entendidas em função da complexidade dos fenômenos envolvidos na transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido durante o processo (KINGSLEY et al., 2007). De maneira geral, esse processo é uma operação na qual calor é fornecido a um dado material que contém água, a fim de se vaporizar certo conteúdo de água deste material, obtendo-se um produto sólido seco. Portanto, trata-se de um processo com transporte simultâneo de calor e massa, acompanhado de mudança de fase (BARBANTI; MASTROCOLA; PIZZARANI, 1995). A transferência de calor ocorre durante a evaporação da água removida da amostra, enquanto que a transferência de massa acontece durante a remoção da água da superfície desta amostra por meio, geralmente, de uma corrente de ar (DINCER; DOST, 1995).

Mais de duzentos tipos diferentes de secadores têm sido aplicados na indústria, porém cerca de vinte tipos básicos são mais comumente utilizados. A grande quantidade de tipos de secadores existentes é devido à diversidade de formas físicas dos materiais a serem desidratados, às taxas de produção desejadas e às características dos produtos finais. Os principais tipos são: de bandeja, túnel (que pode ser duplo ou triplo), à vácuo, tambor rotativo, liofilizador e *spray dryer* (GREENSMITH, 1998).

A desidratação de alimentos deve ser vista não apenas como operação unitária, mas também como método potencial que produz estruturas únicas, mesmo que estas sejam provenientes da mesma matéria-prima. Ela oferece propriedades que não são comparadas a nenhuma outra tecnologia de conservação, como por exemplo, ótima estabilidade a temperatura ambiente, conveniência, versatilidade do produto, redução de custos e impacto ambiental mínimo (AGUILERA; CHIRALT; FITO, 2003).

Quando um material biológico qualquer é submetido ao processo de secagem convectiva, alguns conceitos diferentes de umidade são explorados. A umidade que esta amostra possui quando é posta no secador, é chamada de umidade total. A diferença entre a umidade total e a umidade de equilíbrio, dá-se o nome de umidade livre. A umidade de equilíbrio, por sua vez, é a umidade que o material possui, a uma dada temperatura e pressão, em equilíbrio com a umidade da fase gasosa insaturada, ou seja, com o ar de secagem (FRUTHOTEC, 2001).

Existe a necessidade de compreensão do mecanismo real do processo de secagem para alcançar melhor qualidade dos produtos alimentícios (SILVA et al., 2010a). Os mecanismos de transferência de água no produto que está sendo seco podem se resumir ao movimento por forças capilares, à difusão do líquido por gradientes de concentração, à difusão superficial, à difusão do vapor de água nos poros preenchidos com ar, ao fluxo devido ao gradiente de pressão e ao fluxo devido à vaporização/condensação do vapor de água. O tipo de material que se deseja secar é também um fator muito importante em todos os processos de secagem, já que suas propriedades físicas e químicas desempenham papel importante devido às possíveis alterações que podem ocorrer e ao efeito dessas mudanças na eliminação da água do produto (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 2000).

A taxa de remoção de água como vapor da superfície do alimento depende de condições externas tais como: temperatura, umidade e fluxo do ar, área de superfície do produto e pressão. A taxa de migração de umidade no interior do alimento para a superfície é função de condições internas, tais como a natureza estrutural do material, a temperatura e a quantidade de umidade do produto (VALENTE, 2007).

A taxa de secagem também afeta o conteúdo final de nutrientes e a qualidade final desejada para o produto. As operações de secagem envolvem a difusão da umidade e/ou compostos orgânicos voláteis do material úmido para a superfície externa, seguida pela evaporação dos mesmos através da interfase de transferência entre o material e o agente gasoso de secagem (FERNANDO; AHMAD; OTHMAN, 2011).

2.3.1. Cinética de secagem

Quando determinado material é seco em equipamento com corrente de ar, podem ser observados três períodos distintos, que são representados na cinética de secagem: 1) período de pré-aquecimento, no qual a temperatura do material cresce rapidamente, até a evaporação da água em taxa suficiente para dissipar todo o calor transferido ao sólido pela corrente de ar e manter uma temperatura constante de evaporação (área 0 da figura 2); 2) período de taxa de

secagem constante, que começa quando é atingida a temperatura de equilíbrio na superfície, no qual a quantidade de água disponível no interior do sólido é grande, fazendo com que o movimento de água em seu interior ocorra com velocidade suficiente para manter as condições de saturação na superfície, e a evaporação continua nessa temperatura até a superfície da partícula não compensar a taxa de evaporação, quando a temperatura da partícula começa a aumentar devido a falta de água para evaporar (área 1 da figura 2); 3) período de taxa de secagem decrescente, em que a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa e o movimento do líquido do interior do sólido é insuficiente para manter a taxa de evaporação na superfície deste, portanto, a migração interna de água é o fator limitante, e também a temperatura da partícula aproxima-se daquela da corrente do ar com redução da evaporação e a transferência de calor entre o gás e a partícula cai (área 2 da figura 2) (PARK; BROD, 1998).

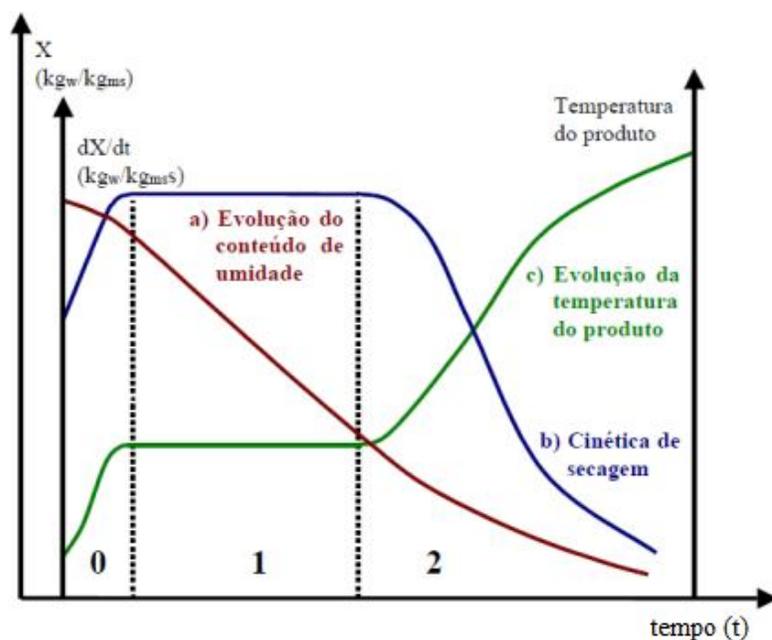


Figura 2. Curvas de secagem características para propriedades do ar constantes.

Fonte: Park e Brod (1998).

O período de pré-aquecimento é insignificante em relação ao período total de secagem, enquanto que o período de taxa constante de secagem é dificilmente observado na secagem dos materiais biológicos, dentre os quais estão os produtos alimentícios (VALENTE, 2007).

O cálculo da cinética de secagem está relacionado à predição do tempo de secagem, que representa um dado fundamental para o dimensionamento e a otimização de uma planta industrial envolvendo este processo. As taxas de secagem devem ser relacionadas para um determinado produto e para uma determinada operação (processo e equipamento), podendo ser estabelecidas mediante estudos de transferência de calor e massa, além dos possíveis mecanismos de migração interna de umidade. Sendo assim, pode-se avaliar, projetar e/ou otimizar a qualidade do produto em função das variáveis do processo de secagem (PARK; BROD, 1998).

Outras análises podem ser feitas através das curvas de secagem que são fundamentadas na comparação da velocidade de secagem e conteúdo de umidade do alimento ao longo do tempo, cuja finalidade principal é compreender o comportamento que o equipamento apresenta durante o processo de secagem (CHIACHUNG, 2003).

A velocidade do processo de secagem durante o período à taxa constante depende dos coeficientes de transferência de calor e massa, da área exposta ao meio de secagem, da geometria da amostra e da diferença de temperatura e umidade entre o vapor e a superfície úmida do sólido. O mecanismo interno de migração de água não afeta a velocidade de secagem deste período (FORTES; OKOS, 1980). Neste, a água evapora em compasso com o fornecimento de calor para o sólido úmido. Como todo calor transferido é convertido em calor latente, a taxa de secagem pode ser representada através das equações de transferência de massa ou de calor. A pressão de vapor de água na superfície do material é constante e, conseqüentemente, a temperatura do material é igual à temperatura de bulbo úmido (KUROZAWA, 2005).

O período de taxa decrescente se inicia quando o período de taxa constante termina, e a migração interna de umidade controla o processo de secagem. Se a umidade inicial estiver abaixo da umidade crítica, toda a secagem ocorrerá no período de taxa decrescente (KUROZAWA, 2005).

No período de taxa decrescente de secagem a resistência ao transporte interno de água é maior do que a de remoção de água na superfície, diminuindo assim a taxa de secagem. Os principais mecanismos de transporte interno de massa de água são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

É interessante salientar que a possibilidade de simular processos de secagem sem que seja necessário construir e testar diversos protótipos de secadores traz diversos benefícios, além da redução no tempo necessário para o seu desenvolvimento. Os modelos de simulação permitem avaliar o efeito de qualquer combinação das variáveis envolvidas no grau de

uniformidade, no teor de água final do produto, na eficiência do processo em termos energéticos (kJ.kg^{-1} de água evaporada) e na relação custo/benefício dos diversos métodos de secagem (CARLESSO et al., 2007).

2.3.2. Modelo difusional

As difusões de líquido e vapor são mecanismos importantes de transferência de umidade que ocorrem durante a secagem de materiais biológicos. Difusão é o processo pelo qual uma matéria é transportada de uma parte do sistema para outra, como resultado de um movimento molecular aleatório (CRANK, 1975). Fick (1855) foi o primeiro a propor uma analogia entre a transferência de massa e calor por difusão, visto que a transferência de calor por condução também ocorre pelo movimento molecular aleatório. Dessa forma, ele descreveu matematicamente a teoria de difusão em substâncias isotrópicas, baseado na hipótese de que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração (Equação 2):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \times (D_{ef} \times \nabla X) \quad (\text{Equação 2})$$

Na qual:

$\frac{\partial X}{\partial t}$: fluxo de massa de água em função do tempo;

D_{ef} : difusividade efetiva;

X : concentração de água.

Tal fórmula de Fick é simplificada, já que despreza a interdifusão, mas sua hipótese é justificada, uma vez que a água migra dentro de uma matriz fixa. Independentemente dos trabalhos sobre secagem, Crank (1975) calculou um grande número de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos, placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água. Em sistema de coordenadas esféricas (levando-se em conta a forma geométrica de uma esfera), onde a transferência interna de umidade durante a secagem é radial, pode ser descrita a equação 3, de acordo com Crank (1975).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(D_{ef} \times r^2 \times \frac{\partial X}{\partial r} \right) \right\} \quad (\text{Equação 3})$$

Na qual:

$\frac{\partial X}{\partial t}$: fluxo de massa de água em função do tempo;

r : raio da esfera;

D_{ef} : difusividade efetiva;

$\frac{\partial X}{\partial r}$: concentração de água em função da distância radial.

Quando a difusividade efetiva (D_{ef}) for considerada constante, a umidade inicial X_0 é distribuída uniformemente no interior do produto e, desprezando as resistências externas à transferência de massa, a umidade na superfície da amostra permanece constante durante o processo, e seu valor corresponde ao termo umidade de equilíbrio X_{eq} do produto. Desprezando também o encolhimento do produto durante a secagem, as condições inicial e de contorno são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Condições inicial e de contorno durante processo de secagem de material em geometria esférica.

Condição	Umidade	Posição na partícula	Tempo	
Teor de água inicial uniforme	$X = X_0$	$0 \leq r \leq R_{esf}$	$t = 0$	(Equação 4)
Contorno 1: Teor de água constante na superfície	$X = X_{eq}$	$r = R_{esf}$	$t > 0$	(Equação 5)
Contorno 2: Teor de água máximo no centro	$\frac{\partial X}{\partial r} = 0$	$r = 0$	$t > 0$	(Equação 6)

X : umidade; X_0 : umidade inicial; X_{eq} : umidade de equilíbrio; r : posição radial na partícula; R_{esf} : raio da partícula esférica; t : tempo.

Fonte: Crank (1975).

A medida espacial da solução da equação 3, com as condições dadas pelas equações 4, 5 e 6, foi usada por Lescano e Tobinaga (2004) ao avaliarem variações de difusividade efetiva da secagem de “okara”, e por Doymaz e Ismail (2010), em estudo de secagem de cerejas

doces, cuja caracterização geométrica é também esférica, e foi dada originalmente por Crank (1975) (Equação 7).

$$Y = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef}}{r^2} t\right] \quad (\text{Equação 7})$$

Na qual:

X_t : umidade média no tempo t ($\text{g}_{\text{água}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$);

X_{eq} : umidade de equilíbrio ($\text{g}_{\text{água}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$);

X_0 : umidade inicial da amostra ($\text{g}_{\text{água}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$);

$Y = \frac{X_t - X_{eq}}{X_0 - X_{eq}}$: adimensional de umidade;

D_{ef} : difusividade efetiva ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

t : tempo (s);

r : raio médio da esfera (m).

2.3.3. Modelos empíricos

Nos estudos de desenvolvimento de novos tipos de secadores para produtos agropecuários e da indústria de alimentos é de grande importância a utilização de modelos matemáticos que possam descrever a taxa de transferência de massa que ocorre entre o ar de secagem e o produto (ERENTURK; GULABOGLU; GULTEKIN, 2004).

Sabe-se que a velocidade das reações que ocorrem no interior dos alimentos é fortemente influenciada pela variação de umidade durante a desidratação. Assim, numerosos estudos têm sido realizados para representar o período de taxa decrescente de secagem. O que pode ser feito de duas maneiras: a primeira forma é assumir que um determinado mecanismo de movimento prevalece no interior do material e desenvolver modelos para representar esse mecanismo; a segunda forma é construir a curva de secagem do material e ajustar modelos já existentes a essa curva (LUCCAS, 1996).

Em consonância, Queiroz, Pereira e Melo (1995) assumiram que são dois os métodos comumente utilizados para analisar a secagem de produtos biológicos: o empírico e o teórico. O método empírico consiste em formar grupos físicos adimensionais que podem ser facilmente investigados por experimentos de laboratório e baseia-se nas condições externas,

como temperatura e velocidade do ar de secagem, apresentando relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem, cujos parâmetros não têm significado físico (MARTINAZZO et al., 2007). Entretanto, apesar de poder descrever a curva de secagem para as condições do experimento, não fornece indicação sobre o transporte de energia e de água no interior dos produtos.

Já os modelos teóricos utilizam os fundamentos da matemática da difusão e da transferência de calor e massa e podem descrever de forma aceitável o perfil da distribuição de água no interior de determinado produto agrícola, desde que seja possível correlacionar sua forma à geometria de um sólido perfeito, além da exigência do estabelecimento de uma relação funcional entre o coeficiente de difusão, o teor de água e a temperatura (QUEIROZ; PEREIRA; MELO, 1995).

O modelo teórico de difusão líquida, segundo a Lei de Fick, é um dos modelos teóricos mais utilizados para descrição da secagem de materiais alimentícios, apresentando bons resultados, tanto para produtos vegetais, quanto animais. Porém, vários modelos empíricos também têm se mostrado eficientes para descrição dos processos de secagem. Esses modelos empíricos são ferramentas úteis para estimar o tempo para redução do conteúdo de umidade sob diferentes condições e também para aumentar a eficiência do processo (ANDRADE; BORÉM; HARDOIM, 2003).

Muita ênfase se tem dado ao desenvolvimento de modelos semi-teóricos, pois eles contribuem para que haja harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. Tais modelos se baseiam, de modo geral, na Lei de Newton para resfriamento, aplicada à transferência de massa. Quando se aplica essa Lei, presume-se que as condições sejam isotérmicas e que a resistência à transferência de umidade se restrinja apenas à superfície do produto. Entre os modelos semi-teóricos, os modelos de Henderson e Pabis, Lewis e Page têm sido amplamente utilizados (PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002).

A cinética de secagem de alimentos é um fenômeno complexo e requer representações simples para prever o comportamento da secagem e otimizar seus parâmetros. Modelos matemáticos para secagem em camada delgada descrevem o processo de forma unificada, independentemente dos mecanismos de controle. As cinéticas de secagem de frutas, grãos, raízes e outros materiais alimentícios não podem ser descritos pela mesma equação, devido às diferenças no conteúdo de umidade e, principalmente, aos fenômenos de transporte, típicos para cada matriz durante a secagem (KINGSLEY et al., 2007). Por isso, é sempre interessante avaliar vários modelos ao mesmo tempo, para obter informações comparativas a respeito da eficiência de cada um para representar o processo em estudo.

Geralmente, os modelos empíricos são derivações obtidas por simplificação das séries da Segunda Lei de Fick. O modelo de Henderson e Pabis, por exemplo é o primeiro termo de uma série de soluções desta lei. Ele foi utilizado inicialmente para prever características da secagem de milho (HENDERSON; PABIS, 1961). O modelo de Lewis é um caso especial baseado no modelo de Henderson e Pabis, onde o coeficiente de intersecção é a unidade. Ele foi usado para descrever a secagem de grãos de cevada e sementes de uva (ROBERTS; KIDD; PADILLA-ZAKOUR, 2008).

Já o modelo empírico de Page é uma modificação do modelo de Lewis, para superar suas deficiências. Ele foi usado com sucesso para descrever características de secagem de variados produtos agropecuários (HASSAN-BEYGI et al., 2009; JANGAN et al., 2008).

Outro modelo largamente utilizado para estudos de secagem em camada delgada é o modelo Logarítmico. Ele obteve sucesso em processos de secagem de pêssegos, cogumelos e tomate, entre outros (KINGSLEY et al., 2007; XANTHOPOULOS; LAMBRINOS; MANOLOPOULOU, 2007; KHAZAEI; CHEGINI; BAKHSHIANI, 2008).

Wang e Singh criaram um modelo de segunda ordem que foi inicialmente utilizado para cinética de secagem de arroz integral (WANG; SINGH, 1978). Midilli, Kucuk e Yapar (2002) apresentaram uma proposta de modelo após levarem em consideração outros modelos exponenciais existentes, que consideravam a umidade de equilíbrio. Esses autores obtiveram ótimos ajustes para cogumelo, pistache e pólen, e concluíram que o modelo em questão era bastante conveniente para aplicações práticas.

2.3.4. Influência da temperatura e velocidade / fluxo do ar

A aplicação de temperaturas elevadas aumenta a velocidade de secagem pelo ar, pois eleva sua capacidade de transportar umidade. Além disso, com o aquecimento do ar, o produto também é aquecido, aumentando sua pressão de vapor e facilitando a saída de umidade do interior do produto para a superfície (POTTER; HOTCHKISS, 1995).

Apesar do aumento da temperatura responder positivamente ao aumento da taxa de secagem, a temperatura elevada pode causar injúrias aos produtos. Ao escolher a temperatura do processo é preciso ter o conhecimento prévio do comportamento do material nessa temperatura escolhida, de acordo com os objetivos pretendidos para ele. Dependendo do tipo de alimento, as temperaturas elevadas podem causar alterações na estrutura, perda de nutrientes voláteis, reações de escurecimento, mudanças sensoriais e até funcionais, como queda da capacidade de solubilização em água. Embora a temperatura tenha maior influência sobre a cinética de secagem, a taxa de evaporação também é influenciada pela velocidade e/ou

fluxo do ar de secagem, principalmente na fase inicial. A velocidade do ar de secagem é importante para a remoção do vapor de água no ambiente ao redor do produto, evitando a saturação do ar e resultando num diferencial de pressão de vapor de água entre a superfície do material e o ambiente, o que favorece a transferência de massa do sólido para o ar (VALENTE, 2007).

Esta influência da velocidade do ar no potencial de secagem foi comprovada por Nicoletti, Telis-Romero e Telis (2001), ao secarem fatias de abacaxi, uma vez que o aumento da velocidade de ar de $1,5 \text{ m.s}^{-1}$ para $2,5 \text{ m.s}^{-1}$ resultou no aumento da difusividade da água, reduzindo o tempo de secagem. Porém, para uma variação pequena na velocidade do ar ($1,5 \text{ m.s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m.s}^{-1}$), no experimento e condições experimentais testadas, praticamente não houve diferença na difusividade da água.

2.3.5. Difusividade efetiva

Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), e não é intrínseca ao material, convencionou-se chamar de difusividade efetiva. A difusividade efetiva de umidade é uma importante propriedade de transporte, sendo útil na análise das operações de processamento de produtos alimentícios, como a secagem (KUROZAWA, 2005). O coeficiente de difusão (D_{ef}) é considerado uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais (OLIVEIRA; OLIVEIRA; PARK, 2006).

O mecanismo pelo qual ocorre a difusão da água nos materiais alimentícios é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Na literatura sobre secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, são encontradas grandes variações nos valores do coeficiente de difusividade, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e a metodologia utilizada para sua obtenção (GONELI et al., 2007).

Embora os dados para difusividade efetiva de umidade sejam escassos na literatura, é possível salientar que para sistemas alimentares eles variam entre 10^{-8} e $10^{-11} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. As difusividades reportadas se mostram menores do que aquelas registradas para materiais inorgânicos, o que reflete a complicada estrutura bio-polimérica dos alimentos e sua elevada capacidade de retenção de água. Além disso, a magnitude da gama de variação desses valores

dá indícios também da dependência na composição e estrutura do produto (MCMINN; MAGEE, 1999).

3 OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GERAL

- Verificar a viabilidade da secagem da polpa residual de batata alterando sua estabilidade durante o armazenamento e a sustentabilidade da agro industrialização de produtos do resíduo.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos deste trabalho foram:

- Determinar o tempo ótimo de sedimentação para a polpa residual de batata;
- Verificar a influência da temperatura e do fluxo de ar nas características da polpa residual de batata seca;
- Determinar as condições de temperatura e fluxo de ar que geraram maior desejabilidade da polpa residual de batata seca quanto as suas propriedades;
- Caracterizar a polpa seca, quanto à composição centesimal, obtida sob as condições de maior desejabilidade;
- Obter a cinética da secagem nas condições experimentais;
- Realizar a modelagem matemática da secagem levando-se em conta o modelo teórico difusional de Fick e sete modelos empíricos;
- Determinar os valores de difusividade efetiva para cada experimento de secagem.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. MATERIAL

Foram utilizados resíduos líquidos oriundos da lavagem de batatas da cultivar *Atlantic*, da linha de produção de batatas fritas (*chips* e palha) da empresa Cicopal Ltda., situada no município de Senador Canedo-GO. Esse resíduo foi chamado aqui de polpa residual de batata.

4.2. MÉTODOS

Os experimentos foram realizados nos laboratórios do Setor de Engenharia de Alimentos da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da UFG e também na área de Agroindústria da EMATER (Agência Goiana de Assistência Técnica, Extensão Rural e Pesquisa Agropecuária), localizada no Centro de Treinamento desta Agência, ambos situados em Goiânia-GO.

A polpa residual de batata, caracterizada como a água descartada durante a lavagem das batatas que entram na linha de produção de batatas fritas (*chips* e palha) após seu descasque, foi cedida pela indústria nos meses de janeiro e fevereiro de 2011. Uma tubulação sai do tanque de lavagem das batatas e conduz o resíduo a dois destinos: a estação de tratamento e ao saco trançado de polipropileno tipo “*big bag*”. A coleta foi realizada no fim da tubulação que desemboca nesse saco, em recipientes de polietileno de alta densidade (PEAD) com capacidade para 50 L, que foram transportados até o Centro de Treinamento da EMATER, onde foi realizada, de imediato, a etapa de sedimentação da polpa residual de batata.

4.2.1. Sedimentação do resíduo

4.2.1.1. Determinação do tempo ótimo de sedimentação

Inicialmente, as amostras tiveram que ser homogeneizadas, por apresentarem forte tendência à sedimentação natural da porção amilácea no fundo do recipiente.

Foram realizados seis tratamentos de sedimentação, diferenciados pelo tempo em que cada um permaneceu em repouso: 5, 10, 15, 20, 25 e 30 min, para determinar o tempo ótimo de sedimentação, levando-se em consideração a eficiência e o tempo do processo.

Foi realizado procedimento experimental semelhante ao usado por Cardoso et al. (2008) ao realizarem ensaios com “*jar test*”. Utilizaram-se béqueres de 1 L, que foram cheios com a polpa íntegra líquida até este volume. Manteve-se o líquido em estado de repouso pelo tempo estabelecido de cada tratamento. Esse procedimento foi realizado em triplicata. O resíduo sofreu grau de sedimentação proporcional ao tempo de repouso, onde se formaram duas fases distinguíveis, uma porção amilácea concentrada ao fundo (denominada aqui como “polpa sedimentada”) e uma porção sobrenadante, com alta concentração de água (“sobrenadante”). Ao fim do tempo de cada tratamento, a porção sobrenadante foi retirada com auxílio de um sifão, restando no béquer somente a “polpa sedimentada”.

Foi realizada análise de sólidos totais nas duas porções, para se determinar o quanto de material sólido realmente decantou e, conseqüentemente, o quanto foi “perdido” no líquido sobrenadante. Esta análise seguiu metodologia da AOAC International (2006), com modificações, onde ao invés de elevar o material à temperatura de 105 °C, utilizou-se 50 °C, por se tratar de um material amiláceo úmido que, quando exposto a altas temperaturas, sofre processo de gelatinização que pode dificultar a saída de umidade do material e acarretar erros nos resultados. O material foi deixado então em estufa a 50 °C por 24 h ou até alcançar peso constante. Para determinação dos sólidos solúveis na porção sobrenadante utilizou-se uma alíquota de 20 mL em uma placa de Petri, enquanto que para a “polpa sedimentada” utilizaram-se aproximadamente 10 g. Um diagrama esquemático destas etapas analíticas foi representado na figura 3.

Os dados obtidos foram avaliados por análise de variância e as médias comparadas pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$), seguindo delineamento inteiramente casualizado, com 6 tratamentos (tempos de sedimentação) e 3 repetições originais.

4.2.1.2. Modelagem da sedimentação

Foram testados três modelos matemáticos polinomiais, de terceiro, quarto e quinto graus, para verificar se algum deles descreveria satisfatoriamente o processo de sedimentação quanto aos teores de sólidos totais. Os valores de tempo de sedimentação foram usados como variável independente e o teor de sólidos totais do sobrenadante (STS) e da polpa sedimentada (STP) como variáveis dependentes.

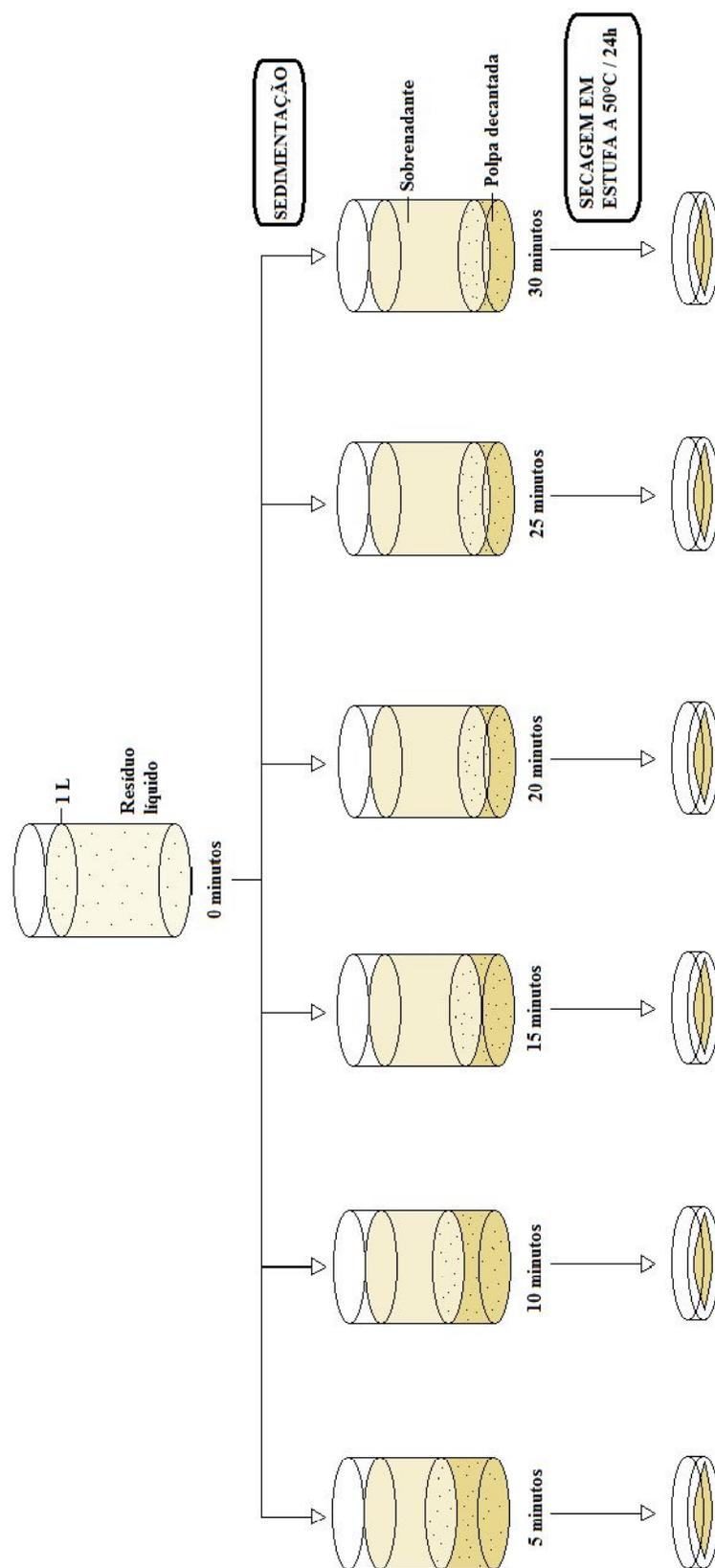


Figura 3. Esquema do ensaio de sedimentação da polpa residual líquida obtida durante a lavagem de batatas da linha de produção de batatas fritas.

Os critérios de avaliação dos ajustes dos modelos foram o coeficiente de regressão (R^2) e o módulo do erro médio relativo [P (%)], obtidos na função de análise de regressão não linear do *software* Statística (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA). A equação que determinou P (%) (Equação 8) levou em consideração os teores de sólidos totais obtidos experimentalmente e preditos pelo modelo, em função do tempo (t).

$$P = \frac{100}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|ST_{pre,t} - ST_{exp,t}|}{ST_{exp,t}} \quad (\text{Equação 8})$$

Na qual:

P = erro médio relativo;

N = número de pontos experimentais;

$ST_{exp,t}$ = sólidos totais observados experimentalmente no tempo t;

$ST_{pre,i}$ = sólidos totais preditos pelo modelo para o tempo t.

4.2.1.3. Sedimentação dos resíduos para secagem

Determinado o tempo ótimo de sedimentação, foi realizada nova coleta de resíduos na indústria, sendo transportados novamente nos recipientes de PEAD de 50 L. O material foi homogeneizado, colocado em recipientes de PEAD com capacidade para 10 L, homogeneizado novamente e deixado para decantar pelo tempo determinado nos tratamentos de sedimentação. Em seguida, o sobrenadante foi retirado. A porção sedimentada foi colocada em sacos de PEAD. Estes foram selados, congelados e armazenados a -18°C .

4.2.2. Secagem do resíduo

4.2.2.1. Determinação da umidade inicial do resíduo sedimentado

Determinou-se o teor de umidade inicial do resíduo sedimentado e, conseqüentemente, o teor de matéria seca, informações estas importantes para análise da cinética de secagem do resíduo. Esta análise seguiu metodologia da AOAC International (2006), com modificações, onde ao invés de elevar o material à temperatura de 105°C , utilizou-se 50°C . O material foi deixado em estufa a 50°C por 24 h ou até alcançar peso constante.

4.2.2.2. Delineamento experimental da secagem

Partindo-se de um delineamento fatorial 2^2 (quatro tratamentos) a fim de otimizar o processo de secagem do resíduo, inseriu-se o ponto central com quatro repetições (temperatura de 60 °C e fluxo de ar de 0,019 m³.kg.s⁻¹) para estimativa do erro experimental. Adicionando-se quatro pontos axiais no experimento, gerou-se um delineamento denominado Composto Central, em que há várias possibilidades para a escolha dos níveis nos pontos axiais. Neste contexto foram utilizados pontos do tipo $\pm \alpha$, que se relacionam com o número de fatores do experimento (Equação 9) (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

$$\alpha = (2^f)^{\frac{1}{4}} = \pm 1,4142 \quad (\text{Equação 9})$$

Na qual:

f = número de fatores do experimento, neste caso, igual a 2.

Os níveis de temperatura a serem trabalhados foram estabelecidos buscando-se um intervalo que abrangesse valores tanto abaixo, quanto acima da faixa de gelatinização do amido encontrado na batata, que varia entre 62 e 68 °C (WASZCZYNSKYJ, 1985), a fim de verificar se as temperaturas acima deste ponto prejudicariam ou não o processo. Por isso, intentou-se por um intervalo de temperatura entre 50 e 70 °C.

Os valores de fluxo de ar foram obtidos através da equação 10. Esta equação leva em consideração a velocidade de escoamento do ar pela saída da câmara (valor medido pelo anemômetro); a área de abertura de medição do anemômetro (área perpendicular ao fluxo de saída do ar da câmara de secagem) e a massa do produto colocado para secar na bandeja. A velocidade do ar em cada nível foi: 4,0 m.s⁻¹ para o nível -1,41; 4,29 m.s⁻¹ para o nível -1; 5,0 m.s⁻¹ para o nível 0; 5,71 m.s⁻¹ para o nível +1; e 6,0 m.s⁻¹ para o nível +1,41.

$$FA = V_{AR} \times A_{AN} \times M_P \quad (\text{Equação 10})$$

Na qual:

FA : fluxo de ar (m³.kg.s⁻¹);

V_{AR} : velocidade do ar;

A_{AN} : área de abertura de medição do anemômetro = 3,84845 x 10⁻³ m²;

M_P : massa do produto na bandeja = 1 kg.

Sendo assim, os pontos axiais foram fixados em 50°C e 70°C para temperatura e 0,015 e 0,023 m³.kg.s⁻¹ para o fluxo de ar, sendo os menores valores fixados para os níveis de -1,41 e os maiores para +1,41. Para definir valores de -1 e +1 foram feitas interpolações, resultando em 52,9°C e 67,1°C para temperatura e 0,016 e 0,022 m³.kg.s⁻¹ para fluxo de ar, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2. Níveis codificados e reais de temperatura (x_1) e fluxo de ar (x_2) utilizadas no experimento de secagem.

Variável Independente	Níveis Codificados e Reais				
	$-\alpha = -1,41$	-1	0	1	$+\alpha = 1,41$
x_1 (°C)	50,0	52,9	60,0	67,1	70,0
x_2 (m ³ .kg.s ⁻¹)	0,015	0,016	0,019	0,022	0,023

Portanto, foi utilizado delineamento composto central rotacional, com um fatorial completo 2², com 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 experimentos, conforme a tabela 3.

Tabela 3. Delineamento experimental para secagem da polpa residual de batata em função das variáveis de secagem, em valores codificados e reais.

Experimento	Variáveis independentes			
	Temperatura (x_1)		Fluxo do Ar (x_2)	
	Codificada	Real (°C)	Codificada	Real (m ³ .kg.s ⁻¹)
1	-1	52,9	-1	0,016
2	+1	67,1	-1	0,016
3	-1	52,9	+1	0,022
4	+1	67,1	+1	0,022
5	-1,41	50	0	0,019
6	1,41	70	0	0,019
7	0	60	-1,41	0,015
8	0	60	1,41	0,023
9	0	60	0	0,019
10	0	60	0	0,019
11	0	60	0	0,019
12	0	60	0	0,019

A Metodologia de Superfície de Resposta (*MSR*) foi empregada para a análise do efeito combinado das variáveis independentes (x_1 e x_2) nas respostas avaliadas (y_i). A resposta pôde ser escrita como sendo função de x : $y_i = f(x_1, x_2)$. As médias dos dados de cada um dos 12 experimentos para cada resposta foram tratadas por análise de regressão múltipla da *MSR*,

para desenvolver modelos matemáticos de segunda ordem, contendo termos lineares, quadráticos e de interação das 2 variáveis independentes, com o emprego do *software* Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA). A fórmula geral deste modelo preditivo é representada pela equação 11.

$$y_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{Equação 11})$$

Na qual:

y_i = variável dependente ou função resposta;

x = variáveis independentes (temperatura e fluxo de ar);

a = coeficientes do modelo;

a_0 = média geral do modelo;

a_1 = fator 1 do modelo (variável independente temperatura);

a_2 = fator 2 do modelo (variável independente fluxo de ar).

O modelo preditivo para cada resposta ou variável dependente pode ser empregado somente dentro da área experimental, não podendo ser feitas extrapolações. O modelo ideal deve ter: boa significância ($p \leq 0,05$), alta confiabilidade (dados dentro do intervalo de confiança de 95%) e baixa variabilidade ($R^2 \geq 70\%$) (MIRANDA, 1998).

4.2.2.3. Ensaio de secagem

Na secagem, foi utilizado 1 kg da polpa residual de batata sedimentada, mantida em bandeja de aço inox perfurada e telada com nylon, a temperatura de 20 °C, até o total descongelamento.

Após determinada randomicamente a ordem de realização dos experimentos de secagem, a bandeja foi levada ao secador convectivo já estabilizado quanto aos valores de temperatura (variável independente x_1) e fluxo de ar (variável independente x_2) do experimento em questão (Tabela 3).

A unidade experimental utilizada para a secagem do material foi uma estufa de circulação forçada de ar com altura de 1,90 m e largura de 0,80 m (Figura 4A). A câmara interna, com 1,18 m de altura, 0,70 m de largura e 0,65 m de profundidade, possuía um suporte com capacidade para 5 bandejas quadradas feitas em aço inoxidável, com medidas de 0,48 x 0,48 m (Figura 4B). A estufa possuía, basicamente: 1) um soprador do tipo ventilador

axial, cujo botão de controle de vazão (Figura 4C) determinava a velocidade de circulação do ar; 2) um aquecedor elétrico equipado com um variador de voltagem e válvulas gaveta para controle de vazão, onde a temperatura era determinada por um termostato e controlada através de termômetros internos (Figura 4C). Na parte superior da estufa existia uma abertura para saída do ar, de dimensões 0,10 x 0,10 m (Figura 4D), na qual foi acoplada um medidor de vazão do tipo anemômetro de hélice de fricção super baixa equipado com sensor de temperatura termopar tipo K (ICEL, NA-3070, Manaus, Brasil).

Foram feitas pesagens da bandeja contendo o material que estava sendo seco em intervalos de 5 em 5 min, até alcançar 60 min do processo, depois passou a intervalos de 10 em 10 min até alcançar 130 min e, daí para frente, as pesagens se deram de 20 em 20 min.

A cada pesagem, o valor de umidade do material no instante foi calculado, levando-se em conta a massa de amostra presente na bandeja (Equação 12)

$$X_{BU}(t)(\%) = \left(\frac{M_A(t)}{M_T(t)} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 12})$$

Na qual:

$$M_A(t) = M_T(t) - M_{MS};$$

$$M_{MS} = [1 - X_{BU}(0)] \times M_T(0);$$

$X_{BU}(t)(\%)$ = umidade em porcentagem, em base úmida, no tempo t;

$M_A(t)$ = massa de água contida na amostra, no tempo t;

$M_T(t)$ = massa total da amostra sendo seca, no tempo t;

M_{MS} = massa de matéria seca da amostra, que é constante em todo o processo;

$X_{BU}(0)$ = umidade inicial da amostra, em base úmida;

$M_T(0)$ = massa total da amostra, no início.

A umidade inicial da polpa residual de batata levada para secagem era de 54,20 g.(100g)⁻¹ (b.u.), ou 118,34 g.(100g)⁻¹ (b.s.). A secagem foi interrompida quando o material alcançou o primeiro valor de umidade em base úmida [$X_{BU}(t)(\%)$] inferior a 12 g.(100g)⁻¹, patamar este abaixo do máximo estipulado pela legislação brasileira para a fécula de batata [14 g.(100g)⁻¹] (BRASIL, 1978).



Figura 4. Secadora utilizada durante ensaio de secagem da polpa residual de batata. Vista externa (A); vista interna com as bandejas (B); caixa de controle da temperatura e velocidade do ar (C); vista lateral com detalhe do orifício de saída do ar (D).

Para cada condição experimental foi preenchida uma planilha (Apêndice A), na qual foi anotado o peso da bandeja contendo o material em processo de secagem (obtido por pesagem em balança digital). O material seco foi armazenado em potes rosqueados de polipropileno, selados com filme de PVC, e armazenados a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.2.3. Influência da temperatura e fluxo de ar nas propriedades da polpa residual de batata

Foram avaliadas as respostas (y_n): tempo de secagem, atividade de água (A_w), parâmetros instrumentais de cor, acidez titulável, pH, índice de absorção de água (IAA), índice de solubilidade em água (ISA) e capacidade de absorção de óleo (CAO).

4.2.3.1. Atividade de água

Este parâmetro foi avaliado em medidor de atividade de água portátil (Aqualab, CX-2-Decagon, Washington, EUA). As amostras foram ambientadas a temperatura de 24 °C (± 1 °C) e só então colocadas no aparelho. As medidas foram realizadas em triplicata.

4.2.3.2. Cor

Os parâmetros instrumentais de cor foram determinados segundo o método descrito por Paucar-Menacho et al. (2008), utilizando colorímetro Colorquest (Color Quest, XE, Reston, EUA), de acordo com o sistema CIELab. Foi fixado ângulo de observação em 10° e o iluminante padrão como D65, que corresponde à luz natural do dia. Os resultados foram expressos em valores L^* , a^* e b^* , onde L^* (luminosidade ou brilho) varia do preto (0) ao branco (100), a^* do verde (-60) ao vermelho (+60) e b^* do azul (-60) ao amarelo (+60) (HUNTERLAB, 1998). As análises foram realizadas em triplicata.

4.2.3.3. pH

Para a medida do pH das amostras foi utilizado potenciômetro (Hanna Instruments, HI9224, Smithfield, EUA), seguindo o método 943.02 da AOAC (2006).

4.2.3.4. Acidez titulável

A determinação de acidez titulável foi feita segundo método do Instituto Adolfo Lutz (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008). Utilizou-se solução de hidróxido de sódio (0,1 mol.L⁻¹) para neutralização e fenolftaleína como indicador.

Necessitou-se da ajuda de um potenciômetro, pois a solução amostral era turva, o que dificultou a identificação visual do ponto de viragem do indicador. A titulação era interrompida quando o potenciômetro registrava pH 8,2, que é o potencial hidrogênio iônico característico inicial da viragem da fenolftaleína.

4.2.3.5. Índice de absorção de água e índice de solubilidade em água

O índice de absorção de água (IAA) e o índice de solubilidade em água (ISA) foram determinados conforme método descrito por Anderson et al. (1969). Em tubos de centrífuga, previamente tarados, foram colocados aproximadamente 2,5 g da amostra peneirada (60 *mesh*) após secagem e 30 mL de água destilada a 28 °C. Os tubos permaneceram sob agitação mecânica em banho-maria por 30 min e depois foram centrifugados (Interprise USA Corp, TG16-W5, Miami, EUA), a 5.300 rpm / 2.500 G, por 10 min. Do líquido sobrenadante, uma amostra de 10 mL foi pipetada cuidadosamente, depositada em placas de Petri previamente taradas e levadas a estufa a 105 °C, por 8 h. Após esse período, o material foi resfriado em dessecador e pesado em balança analítica. A diferença de massa (g) foi multiplicada por 3, sendo o valor obtido o resíduo da evaporação. O líquido restante no tubo de centrífuga foi cuidadosamente descartado, o gel remanescente (resíduo de centrifugação) pesado e o IAA calculado conforme a equação 13. O índice de solubilidade em água foi calculado pela relação entre a massa do resíduo da evaporação e a massa seca da amostra, conforme a equação 14.

$$IAA = \frac{M_{RC}}{M_A - M_{RE}} \quad (\text{Equação 13})$$

$$ISA = \frac{M_{RE}}{M_A} \times 100 \quad (\text{Equação 14})$$

Nas quais:

IAA = índice de absorção de água [(g_{gel}·(g_{matéria seca})⁻¹];

ISA = índice de solubilidade em água (%);

M_{RC} = massa do resíduo da centrifugação (g);

M_{RE} = massa do resíduo da evaporação (g);

M_A = massa da amostra (g) em base seca.

4.2.3.6. Capacidade de absorção de óleo

Para a determinação da capacidade de absorção de óleo (CAO) utilizou-se a metodologia de Castilho, Fontanari e Batistuti (2010), onde 2,0 g de amostra foram homogeneizados em 10 mL de óleo de soja em tubo de centrífuga por 2 min. As amostras

permaneceram em repouso à temperatura ambiente por 15 min e depois foram centrifugadas a 8.000 G, por 10 min.

Após a centrifugação, o sobrenadante foi retirado e o tubo contendo o decantado formado pela amostra e o óleo absorvido foi pesado. Os resultados foram calculados utilizando a equação 15.

$$CAO = \frac{M_{RG}}{M_A} \quad \text{(Equação 15)}$$

Na qual:

CAO = capacidade de absorção de óleo [$\text{g} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$];

M_{RG} = massa do resíduo da centrifugação (g);

M_A = massa da amostra (g) em base seca.

4.2.4. Teste de desejabilidade

Com os modelos matemáticos obtidos para as características da polpa residual de batata seca gerados no planejamento experimental e com o auxílio da função “Response desirability profiling”, do programa Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA), realizou-se o cálculo para determinação da condição de secagem, em função das variáveis independentes temperatura e fluxo do ar, que gera a polpa residual de batata seca com as melhores propriedades combinadas.

4.2.5. Composição centesimal da polpa residual de batata seca

Foram determinados os teores de umidade, cinzas, proteínas, lipídeos e carboidratos totais na polpa residual de batata seca obtida pelo experimento de secagem no do ponto ótimo determinado no teste de desejabilidade. Além disso, também foi determinado o valor energético total.

A umidade foi determinada com a perda de peso da amostra, quando aquecida a 105 °C, de acordo com o método 931.04, da AOAC International (2006), o teor de cinzas por carbonização seguida de incineração completa em mufla a 550 °C até peso constante, segundo o método 972.15, da AOAC International (2006) e o extrato etéreo (teor de lipídeos) após a extração com éter de petróleo durante 4 h e posterior evaporação do solvente, de acordo com o método 963.15, da AOAC International (2006).

O teor de proteínas foi obtido pela determinação de nitrogênio total pela técnica de micro Kjeldahl, baseada em hidrólise e posterior destilação da amostra, de acordo com o método 970.22, da AOAC International (2006), sendo o valor convertido em proteína bruta pelo fator 6,25, como utilizado por Quadros et al. (2009) ao trabalharem com tubérculos de batata para processamento e Leonel e Cereda (2002) ao analisarem várias tuberosas amiláceas. O teor de carboidratos foi estimado por diferença, diminuindo-se de cem os valores, em base úmida, de umidade, cinzas, extrato etéreo e proteínas, em acordo com o estipulado na Resolução RDC nº 360 de 2003 que trata sobre rotulagem de alimentos (BRASIL, 2003). As análises foram realizadas em triplicata.

O valor energético total foi estimado seguindo os valores de conversão de Atwater, no qual se multiplicou o conteúdo de carboidratos e proteína por 4 kcal.g⁻¹ e o de extrato etéreo por 9 kcal.g⁻¹ (MERRIL; WATT, 1973).

4.2.6. Cinética e modelagem matemática da secagem

4.2.6.1. Modelos empíricos

Foram levados em consideração sete modelos matemáticos empíricos de ampla utilização na literatura em experimentos com material alimentício (Page, Lewis, Wang e Singh, Henderson e Pabis, Midilli, Aproximação da Difusão e Logarítmico), cujas equações constam na tabela 4.

O valor adimensional de umidade foi calculado pela equação 16. Porém, simplificou-se tal equação, pois a umidade relativa do ar de secagem era continuamente flutuante, impossibilitando o ponto de alcance da umidade de equilíbrio [$X_{BS}(eq)$] (BOZKIR, 2006), o que levou à utilização da equação 17.

$$Y(t) = \frac{X_{BS}(t) - X_{BS}(eq)}{X_{BS}(0) - X_{BS}(eq)} \quad (\text{Equação 16})$$

$$Y(t) = \frac{X_{BS}(t)}{X_{BS}(0)} \quad (\text{Equação 17})$$

Nas quais:

Y = adimensional de umidade no tempo t ;

$X_{BS}(t)$ = umidade no tempo t , em base seca;

$X_{BS}(0)$ = umidade inicial, em base seca;

$X_{BS}(eq)$ = umidade de equilíbrio, em base seca.

Tabela 4. Modelos matemáticos teóricos considerados durante a cinética de secagem de polpa residual de batata.

Nome do modelo	Equação	Referência
Lewis	$Y = \exp(-kt)$	Lewis (1921); Aghbashlo, Kianmehr e Arabhosseini (2009)
Page	$Y = \exp(-kt^e)$	Page (1949); Erenturk, Gulaboglu e Gultekin (2004)
Henderson e Pabis	$Y = a \times \exp(-kt)$	Henderson e Pabis (1961); Goyal et al. (2007)
Wang e Singh	$Y = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh (1978); Akpinar, Midilli e Bicer (2003)
Midilli	$Y = a \times \exp(-kt^e) + bt$	Midilli, Kucuk e Yapar (2002); Barbosa et al. (2007)
Aproximação da Difusão	$Y = a \times \exp(-kt) + (1 - a) \times \exp(-kbt)$	Yaldiz, Ertekin e Uzum (2001); Wang et al. (2007)
Logarítmico	$Y = a \times \exp(-kt) + c$	Togrul e Pehlivan (2002); Martinazzo et al. (2007)

Y : adimensional de umidade; k : constante de secagem (min^{-1}); t : tempo (min); a , b , c : constantes experimentais (adimensionais); e : expoente.

4.2.6.2. Ajuste dos modelos matemáticos

Os ajustes dos modelos aos dados experimentais de secagem foram realizados mediante procedimento de regressão não linear do pacote Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA). O critério de escolha dos melhores ajustes se baseou na determinação do coeficiente de regressão (R^2) (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995), gerado pelo próprio *software* estatístico, e do valor de outros três critérios, que foram os do módulo do erro médio relativo (P (%)), da raiz do quadrado médio do erro ($RQME$) e do qui-quadrado reduzido (χ^2), que levam em consideração as respostas observadas experimentalmente e os valores preditos pelo modelo (DEMIR et al., 2004; DOYMAZ; ISMAIL, 2010), como mostram as equações 18, 19 e 20.

$$P(\%) = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_{pre,i} - Y_{exp,i}|}{Y_{exp,i}} \quad (\text{Equação 18})$$

$$RQME = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_{pre,i} - Y_{exp,i})^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Equação 19})$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{exp,i} - Y_{pre,i})^2}{N - \nu} \quad (\text{Equação 20})$$

Nas quais:

χ^2 = qui-quadrado reduzido;

$RQME$ = raiz do quadrado médio do erro;

P = desvio relativo médio;

$Y_{exp,i}$ = adimensional de umidade observado experimentalmente;

$Y_{pre,i}$ = adimensional de umidade predito pelo modelo;

N = número de pontos experimentais;

ν = número de coeficientes e constantes.

Referencialmente, para ser considerado de bom ajuste, o modelo deve alcançar valores de coeficiente de regressão linear (R^2) mais elevados e próximos possíveis da unidade (1,0) e, concomitantemente, os valores de P (%), $RQME$ e χ^2 mais baixos e próximos de zero.

4.2.6.3. Determinação do modelo mais adequado à secagem

Com os dados obtidos no processo de secagem foi possível calcular os valores de adimensional de umidade em cada tempo de medição, para cada um dos doze experimentos. Diante desses valores, procedeu-se a análise de estimativa não linear, para por em prova cada um dos sete modelos testados.

Para tanto, criou-se uma matriz (*Spreadsheet*) no programa Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA), onde na coluna das abscissas foram colocados os dados de tempo de secagem (t) e na coluna das coordenadas os valores de adimensional de umidade relacionados (Y).

Esta matriz foi trabalhada através dos seguintes passos:

- a. Na barra de trabalho principal do software optou-se pela aba “Statistics”;
- b. Escolheu-se a opção “Advanced Linear/Nonlinear models”;
- c. Dentre as novas opções, clicou-se em “Nonlinear estimation”;
- d. Ao surgir uma janela, optou-se por “User-specified regression, custom loss function” e então “OK”;
- e. Dentro da aba “Quick”, clicou-se em “Function to be estimated & loss function”;
- f. No campo “Estimated function” escreveu-se a equação do modelo a ser testado, obedecendo às regras descritas na própria janela quanto aos formatos de equações. A cada teste, neste campo foi escrita a equação do modelo de acordo com a tabela 4;
- g. Clicou-se em “OK” e depois em “OK” novamente;
- h. Uma nova janela apareceu, contendo os resumos da operação. Dentro da aba “Advanced”, na opção “Estimation method” escolhe-se “Quasi-Newton”.
- i. Clicou-se em “OK” mais uma vez;
- j. Surge uma janela intitulada “Results:” seguida do nome do arquivo *Spreadsheet* que contem a matriz, por exemplo: “Results: Adimensional de Umidade do Experimento 1”;
- k. Dentro da janela existe a aba “Quick”, que possui quatro botões nomeados:
 - I. Summary: Parameters estimates
 - II. Observed, predicted, residual vals
 - III. Fitted 2D function & observed values
 - IV. Fitted 3D function & observed values
- l. Para a presente análise, utilizaram-se os resultados dos três primeiros botões, os quais geram os seguintes dados:
 - k-I. Gera o valor de coeficiente de regressão R^2 (“Variance explained”), que é um dos requisitos utilizados para avaliação do modelo, além dos valores das constantes experimentais presentes na equação do modelo
 - k-II. Apresenta uma planilha contendo, em uma coluna os valores observados no experimento (“Observed”), em outra coluna os valores preditos pelo modelo (“Predicted”) e na última coluna os valores de resíduo, caracterizado pela diferença entre o valor observado e o predito (“Residuals”). Estes valores são utilizados para determinação dos outros requisitos de avaliação do modelo (P (%), $RQME$ e χ^2), de acordo com as equações 18, 19 e 20.
 - k-III. Mostra o gráfico $t \times Y$, contendo a linha de tendência gerada pelo modelo (“Predicted”) e os pontos observados no experimento (“Observed”), além da

equação característica do modelo contendo os valores absolutos dos coeficientes e constantes.

Com os dados gerados pelo Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA) foi possível proceder a análise dos modelos. Então, para cada um dos doze experimentos do projeto criou-se uma pasta de trabalho no software Excel (Microsoft, Office Excel, Redmond, EUA), dividida em planilhas, onde cada uma delas correspondia a um dos sete modelos. Nesta planilha foram calculados os valores de P , $RQME$ e χ^2 a partir dos valores preditos e observados para o adimensional de umidade, levando em consideração as equações 18, 19 e 20.

Em resumo, o estudo foi composto de doze experimentos com sete modelos e quatro fatores estatísticos diferentes, totalizando então 336 (trezentos e trinta e seis) observações.

Geralmente, os trabalhos de modelagem de secagem encontrados na literatura fazem uma avaliação apenas pontual dos mais variados modelos, analisando cada fator estatístico separadamente (SILVA et al., 2010b; CARLESSO et al., 2007). Esse tipo de análise pode gerar confusões no momento de escolha do melhor modelo para o processo em estudo, pois o modelo pode se apresentar bom ao levar em consideração um fator estatístico, mas se mostrar ruim para outro fator. Por isso, uma metodologia matemática foi desenvolvida para avaliar, concomitantemente, os quatro fatores estatísticos utilizados [P (%), χ^2 , $RQME$ e R^2], gerando mais segurança na escolha do modelo mais ajustado.

Diante do elevado número de observações obtidas no experimento, projetaram-se planilhas no Excel, sendo uma para cada fator estatístico analisado, organizadas de forma a aparecerem os sete modelos nas colunas e os doze experimentos em sublinhas, conforme apêndice D.

Para cada fator estatístico, formou-se um rol em ordem crescente, que foram estratificados de acordo com a Regra de Distribuição de Frequência de Sturges (HOAGLIN; MOSTELLER; TUKEY, 1983; MACHADO et al., 2010), onde cada classe da distribuição recebeu um *score* (diferenciado por cores), sendo que quanto menor o *score*, melhor o ajuste do modelo para aquele fator naquele experimento. O número de classes da estratificação e a amplitude de cada uma foram obtidos pelas equações 21 e 22.

$$N = 1 + 3,3 \times \log(n) \quad (\text{Equação 21})$$

$$amp = \frac{AMP}{k} \quad (\text{Equação 22})$$

Nas quais:

N = número de classes;

n = número de observações para cada fator estatístico;

amp = amplitude da classe;

AMP = amplitude amostral dos dados observados para cada fator estatístico.

Efetuu-se tal procedimento para os quatro fatores estatísticos. Fez-se depois um somatório dos *scores* de cada experimento tido para cada fator estatístico em cada modelo, de forma a obter um só valor por modelo. Esse número serviu para comparação entre os modelos, onde aquele que obtivesse o menor valor seria o mais adequado, levando em consideração os quatro fatores estatísticos concomitantemente.

4.2.7. Cálculo da Difusividade efetiva (D_{ef})

A teoria da migração de água por difusão, baseada na segunda lei de Fick, foi considerada no estudo da cinética de secagem. Levou-se em conta a transferência de massa com as seguintes considerações: taxa decrescente e geometria esférica; transporte unidirecional; densidade da amostra durante a secagem não dependente da posição; distribuição inicial de densidade uniforme; material homogêneo; processo quase isotérmico; distribuição da umidade inicial no material uniforme; difusividade efetiva constante; desprezaram-se as resistências externas ao transporte de massa; não houve encolhimento do material.

Considerando os grânulos de polpa residual de batata com geometria esférica característica, pôde-se fazer uso da equação 23, proposta por Crank (1975), a fim de se realizar a modelagem da cinética de secagem.

$$Y = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[-n^2 \times \frac{\pi^2 D_{ef}}{r^2} \times t \right] \quad (\text{Equação 23})$$

Foi utilizado método de ajuste não linear do *software* Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA), no qual buscou-se simplificar a equação 22 até o termo que apresentasse um

coeficiente de regressão linear (R^2) superior a 90%, sendo este nível (valor de n) considerado para cálculo direto da difusividade efetiva. Para facilitar a aplicação da equação no *software* Statistica, substituiu-se a porção constante do somatório por uma variável, tal qual a equação 24.

$$z = \frac{\pi^2 D_{ef}}{r^2} \quad (\text{Equação 24})$$

Portanto, a equação 22 pôde ser transformada na equação 25:

$$Y = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp[-n^2 \times z \times t] \quad (\text{Equação 25})$$

Nas quais:

Y = adimensional de umidade;

n = nível do somatório da equação;

D_{ef} = difusividade efetiva;

r = raio esférico médio;

t = tempo;

z = valor constante.

4.2.7.1. Determinação do raio esférico médio

Como visto na equação 23, para determinação da difusividade efetiva dos doze experimentos de secagem, por ter se considerado as partículas como esferas, necessitou-se do valor do raio esférico médio das partículas do material sedimentado levado à secagem, que foi obtido pela determinação do diâmetro médio. Para tal utilizou-se um paquímetro. Foram consideradas 100 unidades de partículas, das quais foram obtidas as medidas de diâmetro em três direções diferentes (sessões horizontal, vertical e diagonal). Foi calculada a média global de todas as 300 medidas. Considerou-se o raio esférico médio como a metade do valor do diâmetro médio.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. SEDIMENTAÇÃO DO RESÍDUO

5.1.1. Determinação do tempo ótimo de sedimentação

As médias encontradas para os teores de sólidos totais na polpa sedimentada e no sobrenadante, em função do tempo de sedimentação, foram expostas na tabela 5. No início do processo (tempo 0 min) não foi percebida sedimentação, portanto, o teor de sólidos totais do resíduo íntegro foi usado para caracterização dos sólidos totais da polpa sedimentada (STP) e dos sólidos totais do sobrenadante (STS).

Tabela 5. Teores de sólidos totais da polpa sedimentada (STP) e do sobrenadante (STS) obtidos nos tratamentos de sedimentação da polpa residual de batata¹.

Tempo (min.)	Teor de sólidos totais	
	STP [g.(100 g) ⁻¹]	STS [g.(100 mL) ⁻¹]
0	10,674 ± 0,049 ^d	10,674 ± 0,049 ^a
5	40,287 ± 0,696 ^c	0,980 ± 0,108 ^b
10	44,618 ± 0,953 ^b	0,448 ± 0,020 ^c
15	45,703 ± 0,186 ^{a,b}	0,345 ± 0,119 ^{c,d}
20	46,507 ± 0,199 ^{a,b}	0,285 ± 0,013 ^{c,d}
25	47,587 ± 0,562 ^a	0,248 ± 0,043 ^d
30	47,924 ± 0,539 ^a	0,320 ± 0,018 ^{c,d}

¹Valores expressos em média seguidas dos desvios-padrão. Valores com letras diferentes na mesma coluna apresentam diferença estatística significativa pelo Teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Os teores de STP aumentaram com o tempo, tendendo ao equilíbrio, enquanto que para o STS aconteceu o contrário. Isto era esperado, já que, com o andamento da sedimentação, os sólidos tenderam a se depositar no fundo do recipiente, constituindo a polpa sedimentada. Os resultados mostraram compatibilidade entre as duas fases da sedimentação, pois são eventos interdependentes e inversamente equivalentes.

O teste de comparação de médias revelou diferenças estatísticas entre os tempos utilizados. Verificou-se que o tempo de 15 min foi o tratamento com maior eficiência, pois foi o menor tempo dentre aqueles que estiveram presentes no melhor nível de aproveitamento de sólidos (menor teor de umidade no STP). Isto porque, se tratando do sobrenadante, por

exemplo, onde se desejava o menor valor de teor de sólidos retidos, este teor, encontrado para o tempo de 15 min foi um valor baixo o suficiente para não se diferir significativamente do teor de sólidos obtido para a sedimentação de 25 min, que foi o menor valor absoluto. Portanto, o tempo de 15 min foi o tempo ótimo de sedimentação para as amostras.

Souza (1995) realizou trabalho de recuperação de sub-produtos de água de prensagem de mandioca por processo de coagulação e floculação com quitosana, um polieletrólito natural, para posterior utilização em ração animal. Uma das etapas necessárias no processo de recuperação foi a sedimentação, onde o pesquisador fez a determinação do tempo ótimo de sedimentação, com um arranjo experimental semelhante ao utilizado neste trabalho. Porém, ao invés de medir o teor de sólidos totais do sobrenadante, foi utilizada a turbidez. Foi encontrado o tempo de 20 min como o ideal, trabalhando com pH do meio entre 4,0 - 4,5 e concentração do floculante (quitosana) de 170 ppm, condição suficiente para reter 84,5% dos sólidos suspensos totais. No presente trabalho, não foi feito controle do pH do meio e nem foi necessária adição de floculante, já que o material decantou naturalmente e ainda assim obteve tempo ótimo de sedimentação menor.

5.1.2. Modelagem da sedimentação

Na tabela 6 foram apresentados os resultados encontrados na modelagem do comportamento da sedimentação.

Tabela 6. Ajuste [coeficiente de regressão (R^2), e erro médio relativo ($P\%$)] dos modelos polinomiais ao processo de sedimentação de resíduo de lavagem de batatas quanto ao teor de sólidos totais da polpa sedimentada (STP) e do sobrenadante (STS) em função do tempo de sedimentação (t).

Amostra	Modelo polinomial	R^2	P (%)	Equação ajustada
STP	3ª ordem	96,331	6,3739	$STP = 12,3404 + 6,3653t - 0,3583t^2 + 0,0062t^3$
	4ª ordem	99,636	1,6733	$STP = 10,8994 + 9,1994t - 0,8563t^2 + 0,0331t^3 - (4,50 \times 10^{-4})t^4$
	5ª ordem	99,975	0,3635	$STP = 10,6911 + 10,8752t - 1,3374t^2 + 0,0788t^3 - 0,0022t^4 + (2,33 \times 10^{-5})t^5$
STS	3ª ordem	93,710	168,0038	$STS = 10,0379 - 2,0186t + 0,1191t^2 - 0,0021t^3$
	4ª ordem	99,031	75,1688	$STS = 10,5675 - 3,0602t + 0,3021t^2 - 0,0120t^3 + (1,65 \times 10^{-4})t^4$
	5ª ordem	99,928	21,2042	$STS = 10,6656 - 3,8499t + 0,5288t^2 - 0,0335t^3 + (9,89 \times 10^{-4})t^4 + (1,1 \times 10^{-5})t^5$

Ao analisar a tendência da evolução do STS com o tempo, percebeu-se que durante os primeiros 5 min de sedimentação ocorreu uma brusca diminuição em seus valores, seguida de decréscimos mais tênues nos outros períodos.

Os modelos polinomiais de 4º e 5º graus apresentaram níveis de R^2 elevados e próximos da unidade, mostrando-se adequados. Ao avaliar o coeficiente P (%), verificou-se que o modelo polinomial de 5º grau teve os menores valores. Então, este modelo foi tido como o mais adequado ao comportamento da sedimentação. A figura 5 mostrou os gráficos do comportamento ajustados para este modelo.

O coeficiente P (%) encontrado para o STP foi, em termos absolutos, bem baixo, o que é desejável, uma vez que buscam-se valores menores que 10,00 (PARK; VOHNIKOVA; BROD, 2002). Isto, em consonância com o elevado valor de R^2 , indicou que o modelo polinomial de 5º grau foi bem ajustável ao comportamento da sedimentação. No caso do STS, o valor de P (%) do modelo polinomial de 5º grau, apesar de ser o menor dentre os três modelos, apresentou um valor absoluto relativamente alto (21,2042%), o que indica que este modelo não é suficientemente adequado para retratar a operação. Sugere-se então que mais tratamentos sejam realizados, com mais níveis intermediários de tempo, gerando um montante maior de dados que descrevam mais seguramente esta adequação ou rejeição do modelo.

Ao observar o comportamento da sedimentação da polpa residual de batata durante os ensaios pôde-se classificar a operação como sedimentação zonal, de acordo com a classificação de Jordão e Pessôa (1995). De acordo com estes autores, esse tipo de sedimentação ocorre porque as partículas sólidas em suspensão possuem concentração muito elevada e propriedades físicas bem semelhantes. A pequena distância entre elas é insuficiente para impedir a ação de forças interparticulares e, dentro de certa medida, tais forças podem mantê-las em posições fixas entre si, como peças de uma estrutura. Isto faz com que as partículas se arranjam formando camadas que sedimentam de tal modo que cada camada se comporta como uma massa única, sujeita a uma resistência do fluido ao seu movimento tanto maior quanto mais elevada for a sua concentração de sólidos.

Pode-se observar que, enquanto o material sedimenta, acontece aumento da concentração de sólidos e redução conseguinte da velocidade de sedimentação, até que o material alcança a concentração de sólidos máxima, para a qual a velocidade de sedimentação é nula, caracterizando o equilíbrio final da sedimentação (SANTOS; BARBOSA FILHO; GIORDANO, 2005).

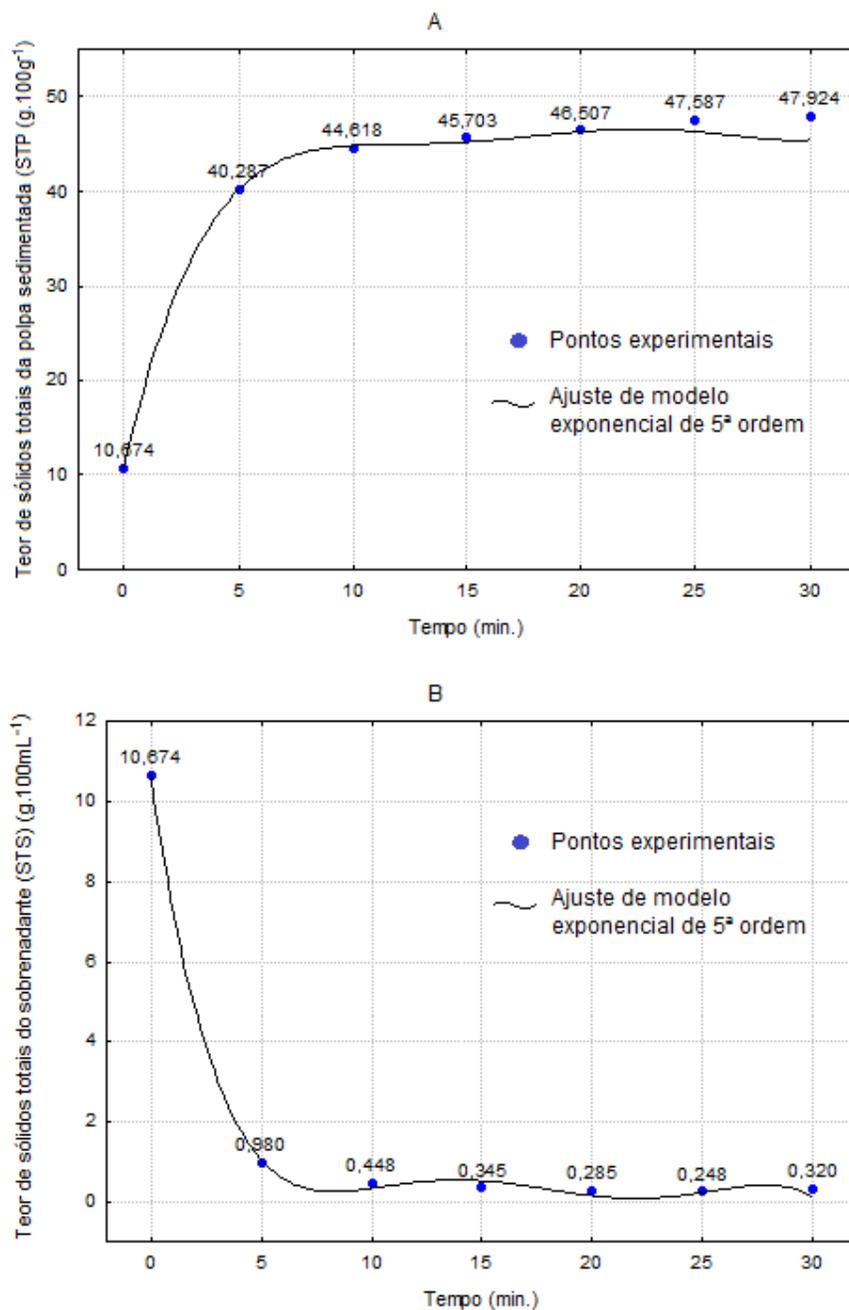


Figura 5. Teor de sólidos totais da polpa sedimentada (A) e do sobrenadante (B) em função do tempo de sedimentação da polpa residual de batata, ajustado a um modelo polinomial de quinta ordem.

5.2. SECAGEM DA POLPA RESIDUAL DE BATATA

5.2.1. Influência da temperatura e fluxo de ar nas propriedades da polpa residual de batata

No apêndice B foram apresentados os resultados obtidos para o tempo de secagem, atividade de água (A_w), pH, acidez titulável, luminosidade (L^*), coordenadas de cromaticidade (a^* e b^*), índice de absorção de água (IAA), índice de solubilidade de água (ISA) e capacidade de absorção de óleo (CAO) em função dos valores reais de temperatura e fluxo do ar de secagem das polpas residuais da lavagem de batatas.

A partir desses dados foram elaborados modelos matemáticos de regressão, que expressam a relação entre as condições codificadas de processo empregadas em cada experimento e as respostas obtidas. No programa Statistica (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA), os termos não significativos foram retirados obtendo um modelo final ajustado mais adequado para descrever as características da região analisada. Nos casos em que alguns termos, apesar de não significativos, contribuíram de forma expressiva na resposta analisada, tais termos foram mantidos no modelo (BOX; HUNTER; HUNTER, 1978). Os modelos e os valores dos coeficientes de regressão (R^2) e coeficientes ajustados ($R^2_{ajustado}$) para as propriedades das polpas residuais, em função da temperatura e fluxo de ar, foram mostrados na tabela 7.

Pode-se perceber que as respostas luminosidade (L^*), ISA e CAO, apesar de analisados, não constaram na tabela com os modelos matemáticos. Pois, mesmo com a tentativa de ajuste dos fatores, essas variáveis não apresentaram modelos significativos. Porém, todos os modelos presentes na tabela 7 se mostraram significativos, com coeficientes de regressão explicando entre 86,251 a 97,778% das respostas. O efeito linear da temperatura (x_1) foi significativo ($p \leq 0,05$) para os modelos de todas as respostas, enquanto o efeito quadrático da temperatura foi significativo ($p \leq 0,05$) somente para os modelos de tempo de secagem, pH, acidez titulável e croma a^* . Para os outros modelos, esse efeito não foi significativo ($p > 0,05$), porém foi mantido na A_w ($p = 0,33$), croma b^* ($p = 0,08$) e IAA ($p = 0,13$). O efeito linear do fluxo de ar (x_2) foi significativo ($p \leq 0,05$) para os modelos de tempo de secagem, A_w e pH, porém não foi significativo ($p > 0,05$) para croma a^* . Nos casos de acidez titulável ($p = 0,19$), croma b^* ($p = 0,13$) e IAA ($p = 0,13$), esse efeito também não foi significativo, mas foi mantido nos modelos. Já o efeito quadrático do fluxo de ar só não foi significativo ($p > 0,05$) para o modelo de tempo de secagem e A_w , porém neste último ele foi mantido ($p = 0,31$). Para os outros modelos (pH, acidez titulável, cromas a^* e b^* e IAA) esse efeito foi significativo ($p \leq 0,05$). O efeito de interação entre temperatura e fluxo de ar não foi

significativo para nenhum dos modelos, porém ele foi mantido no de acidez titulável ($p = 0,07$). O apêndice C trouxe as tabelas de ANOVA para os modelos ajustados significativos.

Tabela 7. Modelos de regressão múltipla, coeficiente de regressão (R^2) e ajustado (R^2 ajustado) para o tempo de secagem (min), atividade de água – Aw, pH, acidez titulável (%), parâmetros de cor a^* e b^* e índice de absorção de água – IAA [$(g_{gel} \cdot (g_{matéria\ seca})^{-1})$] das polpas residuais de lavagem de batatas secas em função da temperatura (x_1) e do fluxo de ar (x_2).

Resposta	Modelo ¹	R^2	R^2 ajustado
Tempo de secagem	$y = 238,9548 - 65,1563x_1 + 34,1694x_1^2 - 11,3463x_2$	97,778	94,944
Aw	$y = 0,19617 - 0,04242x_1 - 0,008050x_1^2 - 0,01945x_2 + 0,008297x_2^2$	87,703	80,670
pH	$y = 6,8451 - 1,08838x_1 - 0,6541x_1^2 - 0,2796x_2 - 0,4655x_2^2$	95,277	92,579
Acidez titulável (%)	$y = 1,0503 + 0,7054x_1 + 0,2839x_1^2 + 0,08887x_2 + 0,5533x_2^2 - 0,1810x_1x_2$	97,363	95,165
a^*	$y = 1,0505 + 0,02311x_1 + 0,1267x_1^2 + 0,1971x_2^2$	86,251	81,095
b^*	$y = 1,8158 + 0,3625x_1 + 0,1352x_1^2 + 0,1037x_2 + 0,3062x_2^2$	89,817	83,998
IAA	$y = 1,9374 + 0,0707x_1 + 0,02137x_1^2 + 0,01915x_2 + 0,04098x_2^2$	88,538	81,988

¹Efeitos em itálico não foram significativos ($p > 0,05$), porém foram mantidos para melhoria de ajuste do modelo

5.2.1.1. Tempo de secagem

A resposta tempo de secagem apresentou valores variando entre 200 e 390 min (Apêndice B) no ensaio, com variação percentual de 48,7%, e se mostrou fortemente dependente da temperatura. Tal constatação pôde ser feita ao observar a equação do modelo (Tabela 7), já que tanto o efeito linear quanto o efeito quadrático da temperatura foram significativos e tiveram seus coeficientes elevados, em módulo. A grandeza fluxo de ar também influenciou, mas em proporção menor. Isso ficou claro ao analisar os gráficos da figura 6A, já que as curvas de nível apresentaram formato vertical, ou seja, ao manter a grandeza fluxo de ar constante e variar somente a temperatura (deslocamento horizontal) ocorreriam mudanças nas faixas de contorno, o que significa variação na resposta. Ao realizar o deslocamento vertical, isto é, mantendo a temperatura fixa e variando somente o fluxo de ar, somente com variações grandes seria possível observar alterações na resposta. Com o arranjo experimental utilizado não foi possível alcançar o ponto de mínimo para o tempo de secagem,

mas a superfície de resposta indicou a tendência de que isso aconteceria caso se aumentasse o fluxo de ar (velocidade).

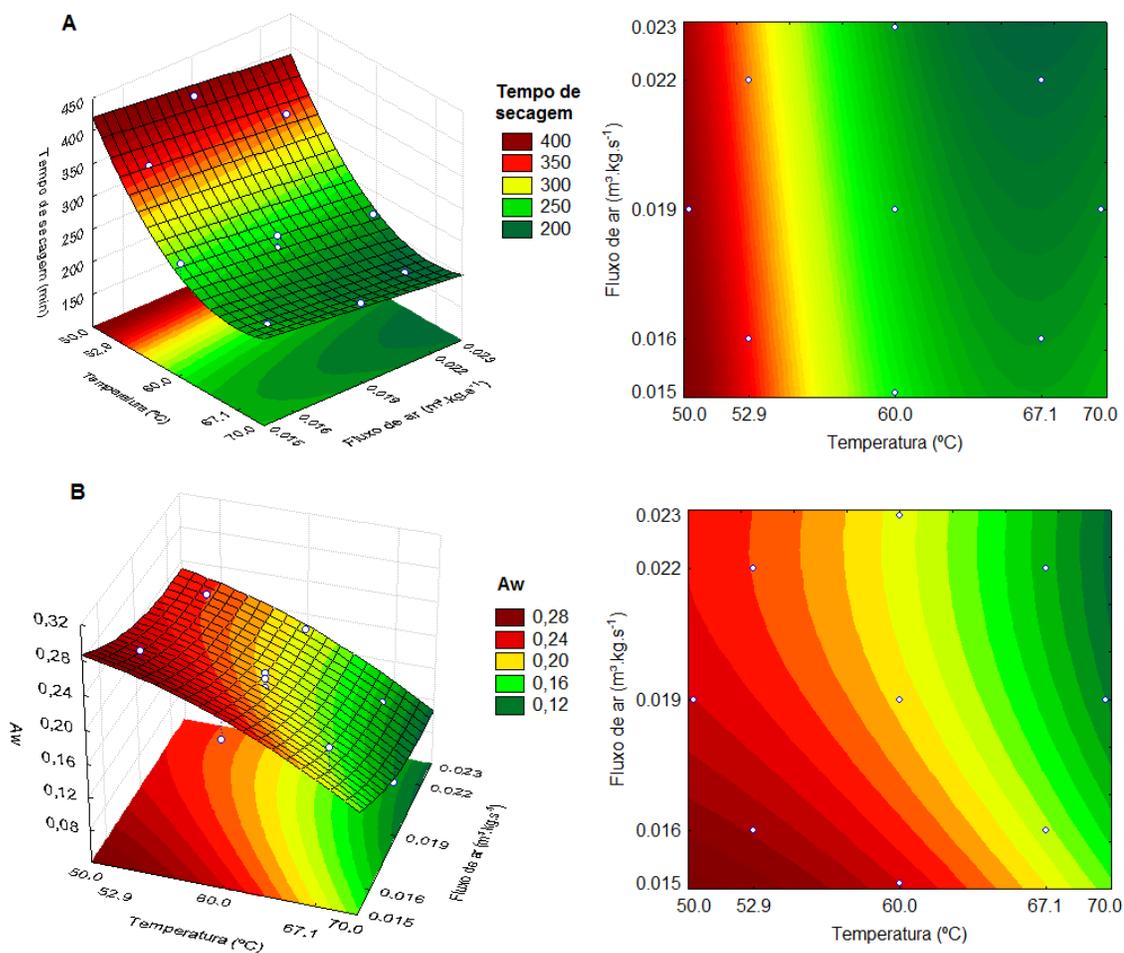


Figura 6. Tempo de secagem (min) (A) e atividade de água – Aw (B) da polpa residual de batata seca em função da temperatura (°C) e fluxo do ar de secagem (m³.kg.s⁻¹).

A temperatura se mostrou um fator inversamente proporcional ao tempo de secagem, como era esperado, o que significa que, com o aumento da temperatura ocorre a diminuição do tempo. Isso se dá, pois o aumento da temperatura eleva a velocidade de difusividade da água do interior do produto (aumenta pressão de saturação do vapor de água do material), além de também aumentar a capacidade do ar em arrastar umidade da superfície do produto ao elevar seu conteúdo de umidade de saturação. A influência do fluxo de ar, por sua vez, se dá pelo fato de que com o aumento deste ocorre uma taxa maior de renovação do ar de secagem em contato com o produto, isto é, o ar se torna menos saturado da umidade arrastada (COSTA, 2007).

A redução do tempo de secagem pelo aumento da temperatura foi constatada por vários pesquisadores durante seus trabalhos, tais como Kingsly et al. (2007), ao trabalharem com pêssegos em fatias, e García, Moyano e Pedreschi (2008), com secagem de batatas e maçãs em fatias, e a influência do fluxo de ar, ou velocidade, mesmo que pequena, foi comprovada por Karim e Hawlader (2005), secando bananas, e Nicoletti, Telis-Romero e Telis (2001), em trabalho com fatias de abacaxi.

5.2.1.2. Atividade de água

Tratando-se da característica A_w , verificou-se valores variando 158,5%, entre 0,106 e 0,274, conforme visto no apêndice B. Na figura 6B pôde-se perceber que quanto maior a temperatura do ar de secagem, menores os valores da resposta, ou seja, foi observada uma relação inversamente proporcional, assim como aquela observada para o tempo de secagem. Assim como ocorreu com a resposta tempo de secagem, para a A_w também se percebeu que o fator fluxo de ar não se mostrou muito influente para alteração da resposta, ainda que tenha se mostrado pouco mais relevante. Verificou-se também que a influência do fluxo de ar na resposta A_w se deu principalmente na região de baixas temperaturas (abaixo de 60 °C), onde quanto maior o valor do fluxo, menor a A_w .

Os resultados observados ficaram em consonância ao postulado por Claussen et al. (2007), que revelaram que temperaturas mais elevadas resultam em maior pressão de vapor de água sobre as amostras, o que, teoricamente, implica que a atividade de água seja menor, para um mesmo conteúdo de umidade, quando em temperatura maior.

Damodaran, Parkin e Fennema (2010) reportaram gráficos lineares de A_w em função do inverso da temperatura ($1/T$) para amido nativo em vários conteúdos de umidade, com os quais puderam concluir que para produtos com alto teor de carboidratos ou proteínas, variações da ordem de 10 K (ou 10 °C) na temperatura podem ocasionar mudanças de 0,03 a 0,2 na atividade de água. O presente trabalho se encaixou nessa hipótese, onde observou-se que as diferenças nos valores da A_w , entre os experimentos de maior e menor temperaturas de secagem, ficaram dentro da faixa citada pelos pesquisadores (diferença máxima de 0,168).

A maioria das bactérias deteriorantes não se multiplica em A_w inferiores a 0,90, enquanto que os fungos podem fazê-lo em A_w de até 0,80. Há exceções para estas regras, como, por exemplo, as bactérias halofílicas, que podem crescer em A_w de até 0,76, para bolores xerofílicos de 0,65 e para leveduras osmofílicas de 0,60. Desta forma, considera-se o valor de 0,60 limitante para a multiplicação microbiana, embora ainda possam sobreviver (AZEREDO; BRITO; GARRUTI, 2004). Portanto, todas as amostras dos experimentos deste

trabalho ficaram abaixo da faixa para desenvolvimento de micro-organismos, se mostrando um produto microbiologicamente estável.

Quando a atividade de água é inferior a 0,3, atinge-se a zona de adsorção primária, onde as moléculas de água poderão estar ligadas a grupos como as carboxilas (COOH) e, por sua vez, ligar-se a outras moléculas de água por pontes de hidrogênio. Esta água estaria recobrando o alimento, como uma camada, não utilizável para dissolver componentes do alimento, o que poderia levar a oxidação de lipídeos (FERREIRA NETO; FIGUEIREDO; QUEIROZ 2005). Percebeu-se que todos os valores de A_w dos experimentos ficaram abaixo desse limite de 0,3, porém, a preocupação com a oxidação de lipídeos mencionada é diminuta devido o baixo teor desse componente na amostra estudada. Portanto, as amostras se revelaram seguras para armazenamento e utilização no que diz respeito aos níveis estipulados para a característica atividade de água.

5.2.1.3. pH e acidez titulável

Os valores obtidos para pH mostraram uma grande variação entre os experimentos, da ordem de 41%, desde 4,20 até valores acima da neutralidade (7,13). Isso fez concluir que as condições de temperatura e fluxo do ar de secagem foram determinantes para essa característica, assim como foram para a acidez titulável que, por sua vez, variou de 0,711 a 2,625% (Apêndice B), diferença de 73%. Os resultados para essas duas grandezas se mostraram condizentes, já que são inversamente proporcionais entre si, pois os experimentos que tiveram maiores valores de pH foram os com menores valores de acidez titulável e vice-versa.

Pôde-se observar, na figura 7A, que quanto maior a temperatura do ar, menores os valores de pH, revelando uma influência linear mais pronunciada. Foi observada uma região de máximo no gráfico, entre as temperaturas de 50 e 60 °C e os fluxos de ar de 0,016 e 0,021 $\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$, cujos valores de pH ficaram superiores a 6,0. Quanto ao fator fluxo de ar, verificou-se um efeito quadrático mais acentuado, onde à medida que os valores dessa variável se afastavam do ponto central (valores extremos), diminuía-se os valores de pH. Apesar disso, percebeu-se que o fluxo de ar não foi responsável por grandes variações no pH.

O comportamento da resposta acidez titulável mostrou semelhanças com o comportamento observado pelo pH, porém, observou-se uma região de mínimo, cujos valores foram inferiores a 1,0%, ao invés de uma região de máximo (Figura 7B), que, contudo, apresentou uma abrangência menor (entre as temperaturas de 50 e 52,9 °C e fluxo de ar de 0,017 a 0,019 $\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$). A tendência linear da temperatura também foi observada, onde

quanto maior essa grandeza, maiores os valores de acidez. Já para o fluxo de ar, novamente foi percebida uma influência quadrática mais acentuada, em que os menores valores de acidez encontraram-se próximos ao ponto central e, à medida que se desloca para os extremos do gráfico, a acidez tende a ser maior. Esta influência quadrática já havia sido percebida na equação do modelo ajustado para a acidez titulável (Tabela 7), já que o efeito quadrático da condição fluxo havia se mostrado significativo e o efeito linear não significativo.

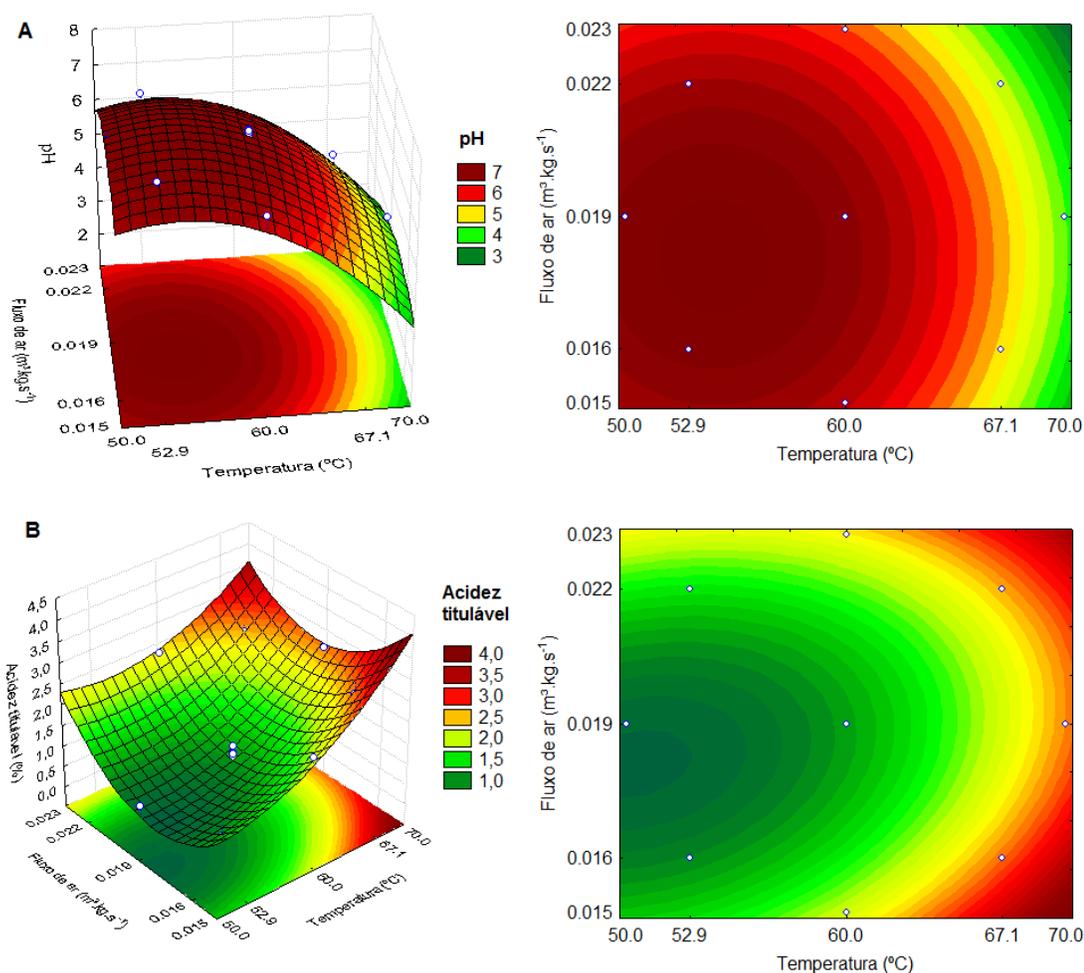


Figura 7. pH (A) e acidez titulável (%) (B) da polpa residual de batata seca em função da temperatura (°C) e fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).

A maioria dos valores obtidos para acidez titulável ficou acima do máximo permitido pela Resolução CNNPA n° 12, de 1978 (BRASIL, 1978), para fécula de batata (2,0%), mas ficaram todos abaixo do nível permitido para polvilho azedo (5,0%). Feltran, Lemos e Vieites (2004), avaliaram o pH e acidez titulável de polpa de tubérculos de batata de diversas cultivares e encontraram valores de pH variando entre 5,50 e 5,94, isto é, um intervalo menor

inserido naquele encontrado neste trabalho ao avaliar a polpa residual de batata. Porém, para a acidez titulável, valores bem inferiores ao do presente estudo foram obtidos, sendo que o máximo foi 0,178%, encontrado para a cultivar IAC Aracy Ruiva. Essa discrepância pode ter se dado devido processos fermentativos que podem ter se iniciado na polpa residual de batata no período entre a coleta na indústria e o início do processamento, já que permaneceu em temperatura ambiente e com alto teor de umidade (aproximadamente 90%) por aproximadamente 3 h. O meio rico em amido e na presença de excesso de água é propício à ação de micro-organismos naturalmente presentes, que produzem enzimas amilolíticas e dão início à formação de ácidos orgânicos, principalmente ácido láctico, que aumentam a acidez do meio (MONTENEGRO et al., 2008).

Os valores de pH encontrados neste trabalho ficaram próximos aos obtidos por Pereira et al. (1999) em análise de fécula fermentada de batata inglesa, enquanto que a acidez titulável ficou menor. Esses autores mencionaram ainda que, para féculas não fermentadas de batata, o nível normal de acidez titulável gira em torno dos 0,2%. Portanto, foi possível perceber que a acidez das polpas residuais ficou num nível intermediário entre o considerado para féculas de batata fermentadas e não fermentadas, tornando plausível a hipótese que um processo fermentativo tenha se iniciado durante a coleta e sido interrompido com o procedimento de sedimentação e secagem da polpa.

Leonel, Garcia e Reis (2004) encontraram pH de 6,1 e acidez titulável de 1,82% para fécula de batata doce, enquanto Leonel, Jackey e Cereda (1998) obtiveram pH de 6,37 e acidez de 0,93% para o mesmo produto, ambos valores dentro das faixas encontradas para a polpa residual de batata. Wischmann et al. (2007) encontraram valores de pH ainda mais elevados (acima de 6,6) para amidos de batata isolados por diferentes métodos. Comparando a valores obtidos para fécula de mandioca para Trombini (2010), observou-se que ele obteve pH mais baixo que os autores mencionados acima (5,38) e acidez titulável intermediária de 1,36%. Todos os valores obtidos nestes trabalhos ficaram dentro das faixas encontradas para a polpa residual de batata, tanto para pH, quanto para acidez titulável.

5.2.1.4. Luminosidade (L^*) e parâmetros de cor (a^* e b^*)

Verificou-se que os valores de L^* ficaram bem elevados, entre 98,87 e 99,99, e muito próximos do valor máximo (Apêndice B). Isso quer dizer que as amostras da polpa residual de batata seca estavam bem claras, praticamente brancas. Ao comparar com as amostras de fécula de mandioca de Freitas e Leonel (2007), que obteve valor de L^* igual a 92,21 para a fécula natural e 82,98 para fécula extrusada, notou-se aqui um produto mais claro.

Pela análise de regressão múltipla não se obteve um modelo estatisticamente significativo para L^* que pode ter ocorrido devido à pequena variação observada de 1,1% entre o menor (98,87) e o maior valor (99,99) obtidos. Portanto, a resposta luminosidade (L^*) não foi influenciada pela temperatura e nem pelo fluxo de ar.

Conforme apresentado no apêndice B, foram verificados valores baixos positivos e próximos de zero para as coordenadas de cromaticidade, onde os de a^* foram inferiores (0,98 a 1,59) aos de b^* (1,64 a 2,79). Estes resultados mostraram que as amostras apresentavam coloração neutra, com pequena inclinação a tons avermelhados e amarelados, mesmo que não muito proeminentes.

As cromas a^* e b^* obtiveram modelos de regressão múltipla significativos (Tabela 7), assim foram elaborados gráficos de superfícies de resposta e curvas de contorno, em função das condições de temperatura e fluxo de ar (Figuras 8A e 8B). As curvas de contorno para ambos parâmetros foram semelhantes, mostrando uma região de mínimo. A croma a^* apresentou essa região em temperaturas abaixo de 59 °C e fluxos de ar próximos ao ponto central (0,018 a 0,020 $\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$). Situação semelhante ocorreu com a croma b^* , mas com a região de mínimo um pouco menos abrangente, em temperaturas abaixo de 53 °C e fluxo de ar entre 0,018 e 0,019 $\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$. A temperatura do ar apresentou tendência linear mais pronunciada para os modelos, enquanto que o fluxo de ar mostrou influência quadrática mais pronunciada, onde à medida que os valores de fluxo de ar se afastam do ponto central a resposta tende a valores mais extremos (maiores). Portanto, como o desejável é manter a amostra menos colorida, mais neutra e próxima do branco, para que interfira o menos possível no escurecimento dos produtos, sugere-se que tratamentos com fluxo de ar intermediários (próximos a 0,019 $\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) sejam utilizados. Para a temperatura, entretanto, devido o efeito linear, percebeu-se que à medida que a temperatura aumenta, as respostas para a^* e b^* também aumentam. Portanto, caso a intenção seja esse produto mais neutro, deve-se trabalhar com temperaturas mais baixas, a fim de manter os valores das cromas mais próximas de zero.

O fato de as polpas residuais de batata apresentarem colorações com tons mais intensos de amarelo e vermelho quando secas a temperaturas mais altas, podem ser explicados devido ao início de processos de reação de escurecimento não enzimático (Reação de Maillard), ou seja, pela reação de aminoácidos livres com as extremidades reductoras das estruturas de amido, presentes em grande quantidade nas polpas residuais, assim como observado por Lamberts et al. (2006b). O baixo teor de proteínas (consequentemente, aminoácidos livres) no produto talvez seja um limitante para esse tipo de reação, fazendo com que a variação de cor seja pequena e imperceptível a olho nu.

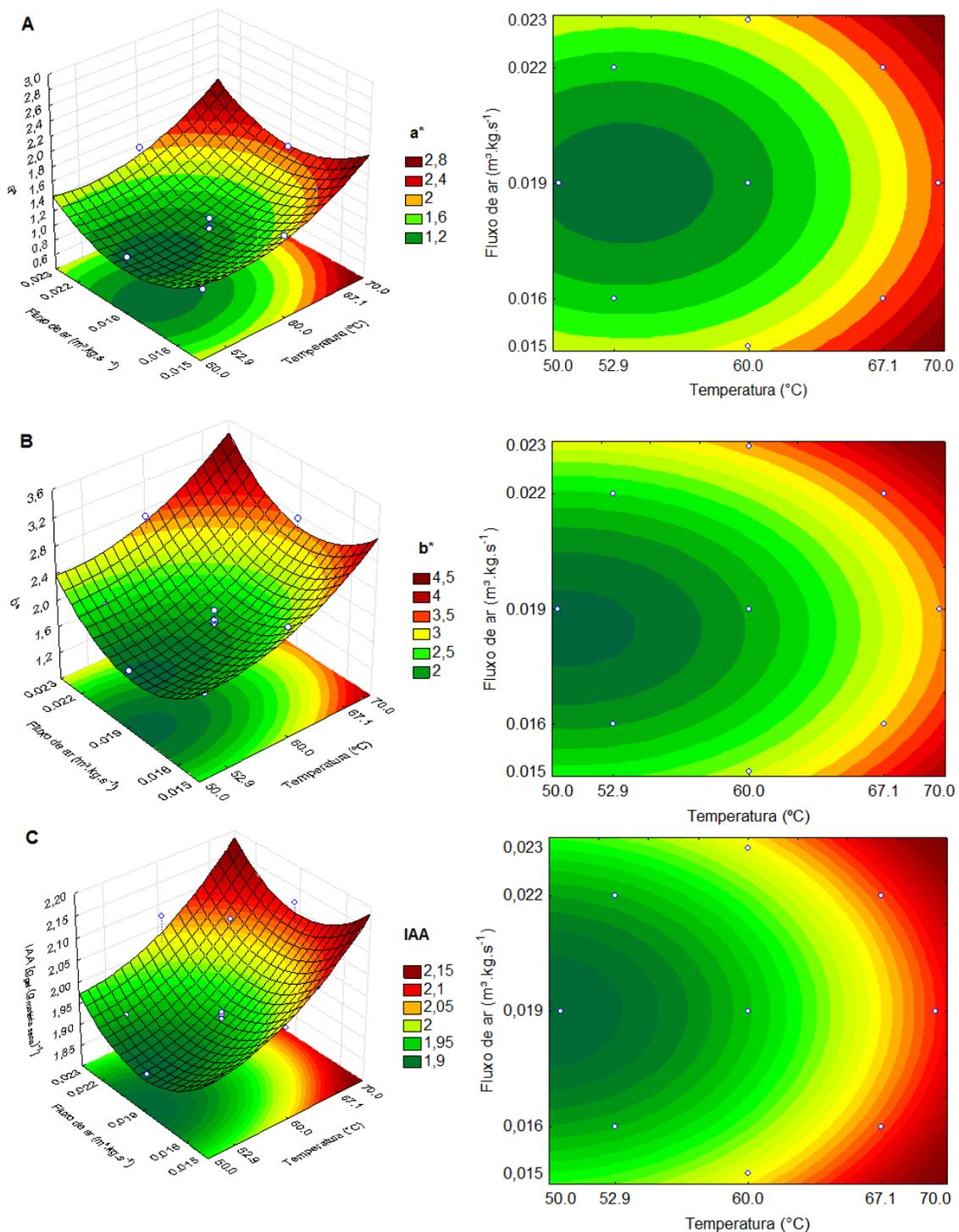


Figura 8. Parâmetros de cor a^* (A) e b^* (B) e índice de absorção de água – IAA [$\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$] (C) da polpa residual de batata seca em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$).

Além disso, o pH do meio também pode auxiliar na alteração da cor, principalmente nas amostras com valores pH próximos a 4,5 devido a influência deste nas reações enzimáticas responsáveis pela hidrólise do amido e de proteínas (LAMBERTS et al., 2006a). Observou-se no presente trabalho, que as amostras que apresentaram pH mais baixos e próximos de 4,5, foram aquelas que apresentaram maiores valores nas cromas a^* e b^* .

Wang et al. (2010) encontraram valor para a croma b^* semelhante, mas 28,4% superior aos deste trabalho, ao avaliar amido de batata em seu estado natural ($b^* = 3,48$). Eles também avaliaram massas de macarrão elaboradas com esse amido, onde obtiveram valores maiores para essa grandeza, entre 4,12 e 10,00 (diferença de 47,7% e 258%, respectivamente), o que seria esperado devido o processamento (extrusão) pelo qual passa o amido, entre eles a adição de outros ingredientes. Os valores de luminosidade encontrados por esses pesquisadores foram inferiores aos da polpa residual de batata seca, com diferença média de 29%.

Valores próximos do parâmetro a^* foram obtidos por Trombini (2010) ao misturar fécula e farelo de mandioca com farinha de soja, onde também encontrou valores positivos próximos de 0. A inclinação à coloração amarelada (b^*) obtida por ele foi superior, com valores próximos de 11,0, enquanto a luminosidade se mostrou próxima de 89,0, aproximadamente 10,5% abaixo daquelas encontradas na polpa residual de batata. Já Taverna, Leonel e Urbano (2010) avaliaram polvilho de mandioca azedo e obtiveram valor da croma a^* de 1,1, valor bem próximo à média do presente estudo, além de 5,96 para o parâmetro b^* , o que revelou presença de coloração amarela mais intensa (113,6% mais elevado que o maior valor obtido para a polpa residual). A luminosidade (L^*) encontrada por estes autores foi elevada e pouco menor que as obtidas para a polpa residual de batata, com uma média de 94,68 (4,2% menor).

5.2.1.5. Índice de absorção de água, índice de solubilidade em água e capacidade de absorção de óleo

O índice de absorção de água (IAA) está relacionado com a disponibilidade de grupos hidrofílicos (-OH) em se ligar às moléculas de água e a capacidade de formação de gel das moléculas de amido (FONSECA FILHO et al., 1997). Ao analisar o IAA nas polpas residuais de batata secas, observou-se que não houve formação de gel, e sim a ocorrência de um precipitado. Isto pode ser explicado pelo fato de que o amido presente no resíduo seco estava em seu estado nativo, pois não foi pré-gelatinizado nem sofreu outro tipo de tratamento, a não ser a secagem.

Esta, portanto, não foi um tratamento suficientemente vigoroso para expor os grupos hidrofílicos presentes nas moléculas de amido de forma a promover sua gelatinização a ponto de desenvolver a capacidade de geleificação em água a temperatura ambiente. Ainda que não tenha ocorrido gelatinização, pôde-se perceber pelos resultados das análises da polpa residual que foi verificada absorção de água (Apêndice B).

O gráfico de superfície de resposta (Figura 8C) demonstrou a variação do IAA em função da temperatura e fluxo do ar de secagem da polpa residual de batata. Neste, uma região de mínimo foi observada em temperaturas abaixo de 53 °C e fluxo de ar ao redor do ponto central. Percebeu-se que a temperatura exerceu influência majoritariamente linear para o intervalo analisado, sendo que quanto maior a temperatura, maiores os valores de IAA, em consonância com a tendência observada por Ahmed, Sorifa e Eun (2010). Isso pode ter ocorrido devido à ação da temperatura nas moléculas de amido, expondo alguns grupos hidrofílicos do mesmo ao romper ligações glicosídicas, fazendo com que mais água pudesse ser absorvida pela matriz sólida da polpa depois de seca.

Já o fator fluxo de ar apresentou influência quadrática para o IAA, assim como ocorrido com os parâmetros de cor a^* e b^* . Em situações próximas do ponto central o valor de IAA é menor e tende a aumentar à medida que se desloca no gráfico para valores extremos.

Os valores de IAA variaram de 1,882 a 2,125 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$, ou seja, apesar de percebida significância da influência dos fatores temperatura e fluxo de ar pelo modelo de regressão não linear, a variação entre os valores foi pequena (11,4%), revelando que a característica de absorção de água está mais ligada à própria natureza da amostra que ao tratamento recebido durante a secagem. A estrutura molecular do amido, incluindo sua estrutura cristalina e composição química são fatores determinantes na capacidade de absorção de água de féculas e farinhas (AHMED; SORIFA; EUN, 2010).

Trombini (2010) encontrou valores de IAA variando entre 5,8 e 8,8 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para as farinhas mistas de fécula, farelo de mandioca e farinha de soja extrusadas. Percebeu-se que os valores foram superiores aos obtidos para a polpa residual de batata. De acordo com Alvim, Sgarbieri e Chang (2002), o IAA está relacionado à capacidade de absorção e retenção de água pelos constituintes da matéria-prima. Durante um processo vigoroso como a extrusão, que envolve altas temperaturas e pressão, os grânulos de amido sofrem gelatinização e as proteínas são desnaturadas. O amido gelatinizado absorve mais água do que em seu estado natural e as proteínas, devido a mudanças conformacionais e estruturais, tem o seu balanço hidrofílico/hidrofóbico alterado, podendo contribuir para o aumento ou a diminuição do IAA. Soares Júnior et al. (1999) também relataram que o IAA está diretamente relacionado ao grau

de gelatinização da fécula de mandioca, já que amidos sem tratamento térmico mostram baixa absorção de água fria, enquanto pré-gelatinizados apresentam valores relativamente altos. Por razões semelhantes, Taverna, Leonel e Urbano (2010) obtiveram valores de IAA também superiores aos do presente trabalho, entre 6,91 e 13,37 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para farinhas mistas extrusadas de polvilho azedo e quinoa, cujos altos índices se deram pelo processo de extrusão e também pelo acréscimo da quinoa.

Maia et al. (1999) também encontraram valores de IAA superiores aos deste trabalho ao analisarem mingaus desidratados de arroz e soja, cujos índices variaram de 3,25 a 4,79 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$, à medida que a proporção de soja nos mingaus foi alterada. Neste caso, a superioridade dos valores em comparação à polpa residual de batata pode ter ocorrido por causa das operações de homogeneização e secagem por atomização e não por causa do maior teor protéico do produto. Isso, pois, eles verificaram que o aumento na quantidade de soja utilizada (o que resultava na diminuição de amido), na verdade, diminuiu o IAA dos tratamentos, fato explicado pelos autores devido à ocorrência da desnaturação completa das proteínas da soja e o aumento do conteúdo lipídico das amostras. Outro trabalho que obteve valores de IAA mais elevados foi o de Singh et al. (2003), que avaliaram farinhas integrais de batata e milho, alcançando valores entre 5,6 e 5,8 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para batata e 3,85 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para milho.

Valores semelhantes de IAA aos da polpa residual de batata foram obtidos por Mesquita, Leonel e Urbano (2010) ao avaliarem misturas de polvilho azedo e farinha de linhaça em diferentes proporções destes componentes, que variaram de 2,08 a 2,28 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$. Eles mediram essa característica também após processo de extrusão das misturas, de forma que os valores aumentaram significativamente, alcançando até 19,44 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$, provando a influência desse processo na elevação da capacidade de absorção de água dos produtos amiláceos. Outro trabalho que obteve valores próximos aos do presente trabalho foi o de Leonel, Martins e Mischon (2010), que avaliaram o IAA de misturas de polvilho azedo e farinha de soja, cujos valores permaneceram entre 1,95 e 2,18 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$, também observando aumento significativo desta grandeza ao recorrer à extrusão, chegando a níveis de 10,31 $\text{g}_{\text{gel}} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$.

Tanto para a característica índice de solubilidade em água (ISA), quanto para a capacidade de absorção de óleo (CAO), não foi possível obter modelos de regressão significativos. Isso ocorreu porque os resultados encontrados (Apêndice B) não apresentaram variações estatisticamente significativas que pudessem ser explicadas pelas diferenças entre os níveis experimentais de temperatura e fluxo de ar. Em outras palavras, observou-se que os

fatores temperatura e fluxo de ar não foram significativos para causarem mudanças no ISA ou CAO da polpa residual de batata.

Quanto ao ISA, todos os experimentos obtiveram valores entre 0,118 e 0,276 g.(100g)⁻¹ (Apêndice B). Durante a análise, observou-se visualmente que o sobrenadante formado era translúcido, não aparentando a presença de sólidos dispersos, o que foi comprovado pelos resultados, já que os valores de resíduo da evaporação foram pequenos para todos os experimentos.

Portanto, diferente do que foi observado por Ahmed, Sorifa e Eun (2010), que verificaram o aumento do ISA com a elevação da temperatura de secagem de farinhas de batata doce pré-tratadas com bissulfito de sódio e cloreto de cálcio, a temperatura não influenciou essa resposta na polpa residual de batata. Naquela situação, os autores explicaram essa influência devido à ruptura de grânulos de amido e consequente exposição de grupos hidrofílicos ao meio aquoso, já que o ISA é um parâmetro que reflete o grau de degradação do grânulo de amido, isto é, o somatório dos efeitos de gelatinização, dextrinização e consequente solubilização (TROMBINI, 2010). A gelatinização do amido resulta na liberação de amilose e amilopectina, enquanto a dextrinização e outras reações conduzem à formação de compostos de baixo peso molecular, contribuindo para a solubilização da substância (LEONEL; MARTINS; MISCHAN, 2010)

Li e Yeh (2001) avaliaram características reológicas de vários tipos de amidos nativos, de cereais, raízes e tubérculos, dentre eles os de batata, batata doce e mandioca. Uma das características avaliadas foi o ISA, no qual obteve uma faixa larga de valores, que variaram muito em função da temperatura utilizada durante a análise (temperaturas entre 55 e 95 °C). Nos tratamentos de temperaturas mais baixas o ISA ficou próximo aos 5%, valor muito superior ao encontrado no presente trabalho.

Leonel, Martins e Mischan (2010), em seu estudo das misturas de polvilho azedo e farinha de soja, obtiveram valores de ISA variando entre 2,01 e 7,34% para as farinhas cruas, sendo que os maiores valores foram obtidos nas misturas com maior proporção de soja, fato justificado pela maior quantidade de proteína dessa matéria-prima. Taverna, Leonel e Urbano (2010) avaliaram misturas de polvilho azedo com farinha de quinoa e encontraram valores baixos de ISA para as misturas cruas, variando entre 0,83 e 1,24%.

Ao realizarem um estudo comparativo entre farinhas de batata e milho, Singh et al. (2003) observaram valores de ISA maiores para a farinha de batata (valores por volta de 11,0% %) que para a farinha de milho (7,9%), fato justificado pelos pesquisadores pelo mais

alto teor de lipídeos da farinha de milho, o que pode ter contribuído para a hidrofobicidade da amostra e consequente diminuição de sua solubilidade em água.

Todos esses estudos mostraram valores de ISA superiores aos obtidos para a polpa residual de batata, que se revelou praticamente insolúvel em água a temperatura ambiente. Isso se justificou pelo alto teor de amido nativo e o baixo teor protéico, componente que poderia atuar na solubilização da água. A forte tendência à sedimentação do amido presente pode contribuir significativamente para o baixo índice.

Farinhas e féculas com baixos valores de ISA, como no caso da polpa residual de batata seca, poderiam ser aplicadas em produtos que não necessitassem de capacidade de instantaneidade no preparo com água a temperatura ambiente, como por exemplo, em produtos que fossem sofrer processos de cozimento ou assamento, tais como bolos, biscoitos e produtos de panificação em geral.

A resposta capacidade de absorção de óleo (CAO) não mostrou grandes variações em seus resultados, indo de 1,52 a 1,57 $\text{g} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$, com coeficiente de variação de apenas 0,95%, como mostrado no apêndice B. Não foi possível identificar geleificação do material sólido, apenas ocorreu sua precipitação e mistura com o óleo de soja, onde este último teve parte de seu conteúdo aprisionado na matriz do produto. Segundo Ravi e Sushelamma (2005), a absorção de óleo consiste na capacidade de sítios apolares das cadeias de proteínas aprisionarem óleo. Desse modo, o conteúdo e tipo de proteína presente no produto determinam a capacidade de absorção de óleo dos alimentos.

Verificaram-se valores baixos para a CAO das polpas residuais, o que pode ser explicado pelo fato de o amido presente estar em seu estado nativo e também pelo baixo conteúdo lipídico-protéico do material. Ao comparar tais valores com aqueles obtidos por Osundahunsi et al. (2003) para farinhas e amidos de duas cultivares de batata doce, perceberam-se diferenças significantes. O menor valor que eles obtiveram foram o de 9 $\text{g} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para farinha escaldada de batata doce vermelha, enquanto alcançaram 12 $\text{g} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para amido nativo de batata doce branca. Donadel e Prudêncio-Ferreira (1999) obtiveram valores variando entre 2,12 e 2,55 $\text{g} \cdot (\text{g}_{\text{matéria seca}})^{-1}$ para a CAO de concentrados protéicos de feijões novos e envelhecidos por 40 dias, respectivamente, ou seja, entre 37% e 64% maiores que a média dos encontrados para a polpa residual de batata.

Os baixos valores de CAO, em comparação aos trabalhos mencionados, ressaltam a questão do baixo teor de proteína presente no produto, já que é este componente que mais influi nessa propriedade funcional. Isso pode ser uma vantagem para a utilização da PRB em

produtos que passariam por processos de fritura, já que tenderia a diminuir o encharcamento dos mesmos.

5.3. TESTE DE DESEJABILIDADE E COMPOSIÇÃO CENTESIMAL

5.3.1. Teste de desejabilidade

Após a obtenção dos modelos ajustados para as propriedades da polpa residual de batata seca foi possível realizar o teste de desejabilidade do produto. Apenas as grandezas que obtiveram modelos significativos poderiam entrar no teste. Diante disso, consideraram-se mais desejáveis as polpas residuais de batata que apresentassem menores valores dos parâmetros a^* e b^* , caracterizando um material de coloração mais neutra, com menos tonalidade vermelha ou amarela, além de valores de pH mais altos (próximos de 7) e baixa acidez titulável, de forma que a polpa influenciasse o menos possível no sabor do produto em que fosse utilizado. Os resultados encontrados foram mostrados na figura 9.

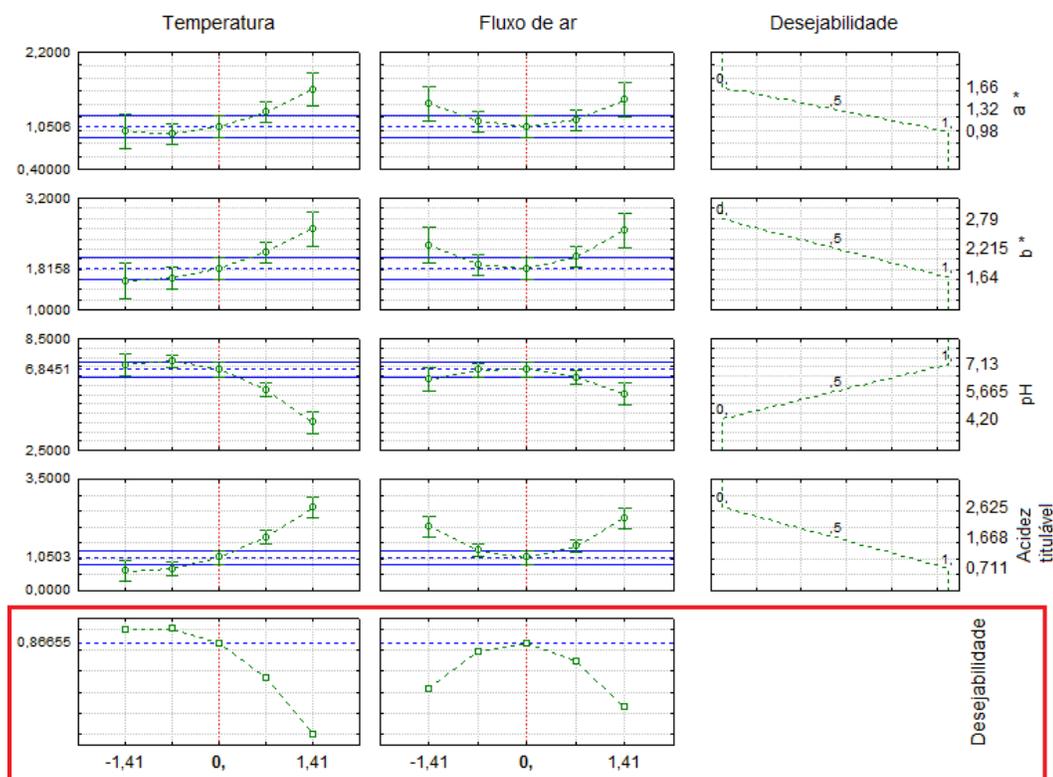


Figura 9. Teste de desejabilidade realizado para a polpa residual de batata seca, levando-se em conta as propriedades parâmetros instrumentais de cor a^* e b^* , pH e acidez titulável.

As condições que obtiveram maior desejabilidade foram os pontos centrais, tanto para a temperatura, quanto para o fluxo de ar, quando a polpa residual de batata foi seca a 60 °C e 0,019 kg.m³.s⁻¹, alcançando nível de 86,65% de desejabilidade. Avaliando o gráfico de superfície de resposta da figura 6A, que traz o tempo de secagem em função das variáveis independentes, concluiu-se que seriam necessários por volta de 240 min de secagem para obtenção da polpa residual de batata seca com essas características determinadas pela desejabilidade.

5.3.2. Composição centesimal

Após realização do teste de desejabilidade ter determinado o ponto central (temperatura de 60 °C e fluxo de ar de 0,019 m³.kg.s⁻¹) do delineamento composto como ponto em que se obtém a polpa residual de batata seca nas melhores condições de suas propriedades, realizou-se então as análises de composição centesimal das amostras obtidas nestas condições, cujos resultados obtidos e também o valor energético total foram mostrados na tabela 8.

Tabela 8. Umidade (b.u.), cinzas, lipídeos, proteínas e carboidratos (b.s.) e valor energético total da polpa residual de batata seca obtida por secagem na condição de temperatura do ar de 60 °C e fluxo do ar de 0,019 m³.kg.s⁻¹.

Característica	Polpa residual de batata seca ¹
Umidade ²	10,011 ± 0,180
Cinzas ²	0,354 ± 0,031
Lipídeos ²	0,113 ± 0,021
Proteínas ²	0,393 ± 0,010
Carboidratos ²	99,140 ± 0,046
Valor energético total ³	359,192 ± 0,712

¹Valores expressos em médias seguidas dos desvios-padrão

²g.(100 g)⁻¹

³kcal.(100 g)⁻¹

Não existem trabalhos na literatura a respeito do produto em estudo, por isso, realizaram-se comparações dos resultados obtidos com produtos semelhantes, como féculas e amidos de variadas fontes. Foi possível observar que os teores de umidade e cinzas (resíduo mineral fixo) ficaram abaixo dos teores máximos permitidos pela Resolução CNNPA n° 12, de 1978 (BRASIL, 1978), que determina os padrões de identidade e qualidade de amido de diferentes fontes. Para o amido de batata, esses níveis são de 14,0 g.(100g)⁻¹ e 0,50 g.(100g)⁻¹,

respectivamente. É importante o teor de umidade estar abaixo do padrão estabelecido, pois esse teor reflete diretamente na segurança alimentar do produto, especialmente no que diz respeito à qualidade microbiológica. Valores de cinzas acima do estabelecido podem indicar fraudes, como adição de areia ou processamento inadequado (DIAS; LEONEL, 2006).

De acordo com Moorthy (2001), féculas oriundas de raízes e tubérculos são caracterizadas por baixos conteúdos de lipídeos (menos que 1%), o que não tem um efeito pronunciado nas propriedades funcionais desses produtos, diferentemente daqueles obtidos de cereais. Da mesma forma, proteínas e cinzas, que também se apresentam em baixo conteúdo nessas féculas, não têm influência pronunciada em suas propriedades funcionais (HOOVER, 2001).

A fécula de batata apresenta potencial como complemento de fermentações (na produção de cervejas, por exemplo) devido ao seu baixo teor de proteínas e lipídeos e elevado teor de amido. Além disso, não é largamente empregada em nível industrial no Brasil, ao contrário do milho que é amplamente utilizado na indústria de alimentos. O custo do processo poderia ser reduzido pela grande disponibilidade da batata no Brasil, principalmente, quando proveniente de regiões com relevo acidentado. Nessas regiões não há colheita mecanizada, ocorrendo sobra de batata nos campos. A batata oferece vantagem sobre o arroz pela maior rapidez na extração de amido (MATOS et al., 2005).

Varatharajan et al. (2010) encontraram valores elevados de umidade para féculas de batata normal [$17,0 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$] e batata cerosa [$15,2 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$], que podem ter sido devido ao pré-tratamento de aquecimento a alta umidade (HMT) ao qual foram submetidas as féculas antes de serem desidratados em forno de circulação forçada de ar. Neste mesmo trabalho, foram obtidos teores de cinzas [$0,22 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$], proteínas [$0,13 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$] e lipídeos [$0,08 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$], valores 37,8%, 66,9% e 29,2%, respectivamente, abaixo dos deste trabalho.

Waszczynskyj (1985) trabalhou com polpa residual de batata da produção de amido de batata e apresentou composição centesimal para o resíduo úmido e seco. Quando seco, a pesquisadora obteve $14 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para umidade, $5,5 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para cinzas, $3,4 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para proteínas, $0,1 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para lipídeos e $68,2 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para carboidratos. Observou-se que, em comparação ao presente trabalho, os valores foram geralmente maiores (39,8% para umidade, 1453% para cinzas, 765% para proteínas), excetuando-se o teor de lipídeos que ficou semelhante (11,5% menor) e o de carboidratos, que ficou 31,2% abaixo. Essas diferenças, principalmente nos teores de cinzas e proteínas, são explicadas pelo fato de que essa polpa era produzida com a batata íntegra, isto é, com casca, que é uma porção do tubérculo com teores de proteínas e minerais mais elevados que o restante.

Vários trabalhos trataram de fécula de batata doce (*Ipomoea batatas*) e determinaram a composição centesimal. Zavareze et al. (2009) utilizou fécula de batata-doce, em substituição à fécula de mandioca na elaboração de pão de queijo, cuja composição era 9,1 g.(100g)⁻¹ de umidade, 0,28 g.(100g)⁻¹ de cinzas, 0,33 g.(100g)⁻¹ de proteínas e quantidade não significativa de lipídeos. As características centesimais se mostraram semelhantes ao da polpa residual de batata do presente trabalho, principalmente quanto ao conteúdo de proteínas e cinzas. Apesar de ser um produto originário de outra espécie tuberosa foi possível verificar as semelhanças de composição.

Isso também pôde ser constatado ao levar em conta o trabalho de Peroni, Rocha e Franco (2006), que analisaram as características estruturais e físico-químicas de amidos de seis diferentes espécies, dentre elas a batata-doce e a mandioca. Eles obtiveram 0,21 g.(100g)⁻¹ de cinzas (40,7% menor que o deste trabalho), 0,14 g.(100g)⁻¹ de proteínas (64,4% menor) e 0,14 g.(100g)⁻¹ de lipídeos (23,9% maior) para a fécula de batata-doce e 0,21 g.(100g)⁻¹ de cinzas (40,7% menor), 0,20 g.(100g)⁻¹ de proteínas (49,1% menor) e 0,15 g.(100g)⁻¹ de lipídeos (32,7% maior) para o amido de mandioca. Percebeu-se que a polpa residual de batata apresentou características mais semelhantes com a mandioca que com a batata doce.

Leonel, Jackey e Cereda (1998), por sua vez, determinaram características de fécula de batata-doce industrial, obtendo valores de 13,75 g.(100g)⁻¹ para umidade, 0,50 g.(100g)⁻¹ para cinzas, 0,05 g.(100g)⁻¹ para proteínas, 0,005 g.(100g)⁻¹ para lipídeos e 97,97g.(100g)⁻¹ para carboidratos totais. O teor de carboidratos deste estudo também apresentou valores altos e próximos dos da polpa residual de batata (1,2% menor), porém, os níveis de proteínas e lipídeos foram bem inferiores, chegando a 87,3% e 95,6% de diferença.

Ao realizar um comparativo com os tubérculos íntegros de batata, observou-se que, relevando as devidas proporções por se tratar aqui de um material desidratado, a tendência dos conteúdos dos nutrientes é semelhante. A Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TACO, 2004), por exemplo, trouxe que a batata inglesa crua possui apenas 2 g.(100g)⁻¹ de proteínas, 0,6 g.(100g)⁻¹ de cinzas e traços de lipídeos, além de um teor de carboidratos totais de 15 g.(100g)⁻¹, ao passo que a umidade alcança 83 g.(100g)⁻¹. Observou-se que o teor de umidade foi, logicamente, bem superior (729% de diferença), já que tratou do tubérculo íntegro, porém, apresentou os carboidratos como componente majoritário da matéria seca e os outros com valores bem baixos, apesar de maiores que os da polpa residual de batata (408% de diferença para proteínas e 69,5% para cinzas). A mesma tendência apresentou a composição exposta por Quadros et al. (2009), que ao analisarem batatas de várias cultivares,

com a variedade *Atlantic* obteve $79,24 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para umidade, $0,93 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para cinzas, $2,09 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para proteínas e $0,05 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ para lipídeos.

A respeito do conteúdo energético, observou-se que o valor encontrado no presente trabalho foi bem superior ao revelado na TACO (2004) ou no trabalho de Quadros et al. (2009), que foram de $64 \text{ kcal} \cdot (100\text{g})^{-1}$ e $79,57 \text{ kcal} \cdot (100\text{g})^{-1}$, 82,2% e 77,8% abaixo da polpa residual de batata, respectivamente. Mas essa discrepância muito se deve ao fato de que a polpa residual de batata do presente trabalho encontrava-se seca, portanto, com seus componentes concentrados, principalmente no que diz respeito aos carboidratos, que respondem por grande parte do valor energético oferecido ao produto.

5.4. MODELAGEM DA SECAGEM

A modelagem da cinética de secagem foi realizada a partir dos dados de adimensional de umidade coletados durante o experimento (valores experimentais). Estes valores foram lançados no *software* Statística (StatSoft, versão 7, Tulsa, EUA), bem como as fórmulas de cada modelo testado, de forma a obter os valores preditos pelos modelos para o adimensional de umidade. Seguindo as equações 17, 18 e 19, obtiveram-se os valores para os fatores estatísticos, que foram relacionados no apêndice D.

Os valores de R^2 variaram entre 97,768% e 99,983%, mostrando os modelos de Midilli, Aproximação da difusão e Page como destaque quanto aos valores mais próximos da unidade. O coeficiente de regressão (R^2) sozinho não constitui um bom critério para a seleção de modelos não lineares (MADAMBA et al., 1996). Por isso, os valores de qui-quadrado reduzido (χ^2), da raiz do quadrado médio do erro (RQME) e do módulo do erro médio relativo [P (%)] foram também considerados.

Os valores do erro médio relativo encontrados foram, com exceção daquele obtido no experimento 9 para o modelo de Lewis, inferiores a 10%. Valores de P (%) indicam o desvio dos valores observados em relação à curva estimada pelo modelo (KASHANI-NEJAD; MORTAZAVI; SAFEKORDI, 2007). Números inferiores a 10% são recomendados para a seleção de modelos (MOHAPATRA; RAO, 2005). Verificou-se que, no geral, quase todos os modelos se mostraram adequáveis ao processo ao levar em consideração esse fator, pois os valores variaram de 0,8549 a 10,8461, com destaque para o modelo de Midilli que apresentou os menores números absolutos para P (%), enquanto que o modelo de Lewis obteve os maiores valores para este fator estatístico.

Quanto aos valores de χ^2 e $RQME$, todos os modelos apresentaram números bem baixos, destacando-se novamente o modelo de Midilli, alcançando os menores valores, da ordem de 1×10^{-5} para χ^2 e 3×10^{-3} para $RQME$.

A fim de avaliar os modelos em todos os experimentos concomitantemente, com base nos valores dos fatores estatísticos, foi feita a estratificação dos dados segundo a Regra de Sturges, onde as classes obtidas, bem como qual o intervalo de valores compreendido em cada classe, foram mostrados na tabela 9. Os dados de origem para estes cálculos foram apresentados no apêndice D.

Tabela 9. Limites inferiores e superiores das classes em que foram divididos os valores obtidos para cada fator estatístico aplicado aos dados de adimensional de umidade encontrados durante modelagem da cinética de secagem de polpa residual de batata.

Classes / Score	Fator estatístico							
	P (%)		$RQME$		χ^2		R^2	
	L. I.	L. S.	L. I.	L. S.	L. I.	L. S.	L. I.	L. S.
1	0,8549	2,1038	0,00390	0,00902	$1,75 \times 10^{-5}$	$2,78 \times 10^{-4}$	99,7061%	99,9830%
2	2,1038	3,3527	0,00902	0,01415	$2,78 \times 10^{-4}$	$5,38 \times 10^{-4}$	99,4293%	99,7061%
3	3,3527	4,6016	0,01415	0,01928	$5,38 \times 10^{-4}$	$7,99 \times 10^{-4}$	99,1524%	99,4293%
4	4,6016	5,8505	0,01928	0,02440	$7,99 \times 10^{-4}$	$1,06 \times 10^{-3}$	98,8755%	99,1524%
5	5,8505	7,0994	0,02440	0,02953	$1,06 \times 10^{-3}$	$1,32 \times 10^{-3}$	98,5986%	98,8755%
6	7,0994	8,3483	0,02953	0,03465	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,58 \times 10^{-3}$	98,3218%	98,5986%
7	8,3483	9,5972	0,03465	0,03978	$1,58 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-3}$	98,0449%	98,3218%
8	9,5972	10,8461	0,03978	0,04491	$1,84 \times 10^{-3}$	$2,10 \times 10^{-3}$	97,7680%	98,0449%

P (%): erro médio relativo; $RQME$: raiz do quadrado médio do erro; χ^2 : qui-quadrado reduzido; R^2 : coeficiente de regressão linear; L. I.: limite inferior da classe; L. S.: limite superior da classe.

Através da fórmula de Sturges (MACHADO et al., 2010), verificou-se que os dados poderiam ser estratificados em oito classes, onde cada uma recebeu uma pontuação (*score*) de 1 a 8, sendo que, quanto menor o *score*, mais ajustável seria o modelo. Com isso, o somatório dos *scores* de cada modelo pôde ser observado na tabela 10.

Tabela 10. Somatório dos *scores* obtidos para os fatores estatísticos avaliados para os modelos teóricos avaliados durante a secagem do resíduo da lavagem de batatas.

Fator estatístico	Modelo						
	Lewis	Page	Henderson e Pabis	Wang e Singh	Midilli	Aproximação da difusão	Logarítmico
	Soma parcial dos <i>scores</i>						
<i>P</i> (%)	56	44	43	35	13	36	38
<i>RQME</i>	59	34	39	36	14	24	38
χ^2	42	16	23	19	12	15	21
<i>R</i> ²	51	16	23	20	12	15	17
Somatório total dos <i>scores</i>	208	110	128	110	51	90	114

P (%): erro médio relativo; *RQME*: raiz do quadrado médio do erro; χ^2 : qui-quadrado; *R*²: coeficiente de regressão linear.

Verificou-se que o modelo de Midilli se mostrou com o menor valor de somatório, ou seja, com o melhor ajuste aos dados da secagem levando em consideração os quatro fatores estatísticos simultaneamente. Ele foi seguido pelo modelo da Aproximação da difusão. Estes são os dois modelos com equações mais complexas, fato que pode ter contribuído no melhor ajuste aos dados, já que o maior número de coeficientes pode ter gerado maior flexibilidade aos modelos.

Em trabalho de secagem de folhas de erva cidreira em camada delgada, Barbosa et al. (2007) variou a temperatura do ar de secagem (40 a 80 °C) e manteve a velocidade do ar fixa. O modelo de Midilli, juntamente com Page, obteve os melhores ajustes. Já o modelo de Lewis demonstrou os maiores *scores* em todos os fatores estatísticos, resultando também num somatório mais elevado, concluindo então que este foi o modelo que menos se aproximou do comportamento do processo estudado. Lewis é um modelo relativamente simples, que leva em consideração uma regressão logarítmica com apenas um coeficiente constante (*k*) (LEWIS, 1921). Ele é muito utilizado para explicar a secagem de produtos agropecuários em geral, porém, no caso do presente trabalho, não se mostrou muito adequado.

Vários são os trabalhos que estudaram o ajuste de diversos tipos de modelos teóricos em processos de secagem. Muitos deles obtiveram o modelo de Page como o mais ajustável, tais como Aghbashlo, Kianmehr e Arabhosseini (2009), em secagem de fatias de batata em secador convectivo de ciclone, Bozkir (2006), que estudou a secagem de damascos em camada delgada em secador convectivo, Doymaz e Ismail (2010), que trabalhou com a secagem de cerejas em secador de ar forçado, e Demir et al. (2004), ao secar folhas de louro, tanto em secador de ar forçado (variando temperatura e umidade do ar), quanto ao sol.

Percebeu-se que tais modelos são bem flexíveis, pois se mostraram eficientes para representar processos de secagem de variados tipos de produtos, desde a polpa residual de batata deste estudo até outros com estrutura bastante divergente, tais como folhas e frutas inteiras. Isso é um fator bastante favorável desses modelos, que conseguem abranger, com fidelidade, processos de diferentes naturezas, tanto quanto às diferenças das amostras, como às formas de secagem e equipamentos utilizados.

Outro modelo também muito estudado e frequentemente obtido como adequado para representar os processos de secagem é o Logarítmico. Erenturk, Gulaboglu e Gultekin (2004), por exemplo, encontrou nesse modelo um ajuste suficiente para representar a secagem de brotos de rosas (*rosehip*) em secador convectivo de camada delgada trabalhando a temperaturas do ar entre 50 e 80 °C. Goyal et al. (2007), que realizou secagem de fatias de ameixa em túnel de secagem, e Kingsly et al. (2007), que utilizou um túnel de secagem com fluxo cruzado para secar fatias de pêssago *in natura* e também pré-tratadas com metabissulfito de potássio e ácido ascórbico, também obtiveram o modelo Logarítmico como mais ajustável dentre os modelos estudados.

A figura 10 mostrou os dados de adimensional de umidade, em função do tempo de secagem, observados nos experimentos 4 (A) e 12 (B). Estes dois experimentos foram os que obtiveram os melhores ajustes dos modelos estudados, por isso foram escolhidos para ilustração. Essas figuras trouxeram as linhas de tendência relativas aos ajustes dos modelos de Midilli e de Aproximação da difusão, que se concluiu serem os que melhor representaram o processo em estudo.

Como forma de exemplificação, para os dois experimentos tratados na figura 8 expressaram-se abaixo as funções respectivas aos dois modelos em questão, com os valores dos coeficientes encontrados substituídos nas equações genéricas da tabela 4. Tal procedimento poderia ser feito para todos os experimentos e com todos os modelos, a partir dos valores dos coeficientes das equações apresentados no apêndice E, porém decidiu-se explicitar aqui somente os mais significativos. Para o modelo de Midilli, obteve-se a equação 26 no experimento 4 e a equação 27 no experimento 12.

$$Y = 1,007940 \times \exp(-0,004240 \times t^{1,237215}) + 0,000326 \times t \quad (\text{Equação 26})$$

$$Y = 1,009219 \times \exp(-0,004288 \times t^{1,208167}) + 0,000278 \times t \quad (\text{Equação 27})$$

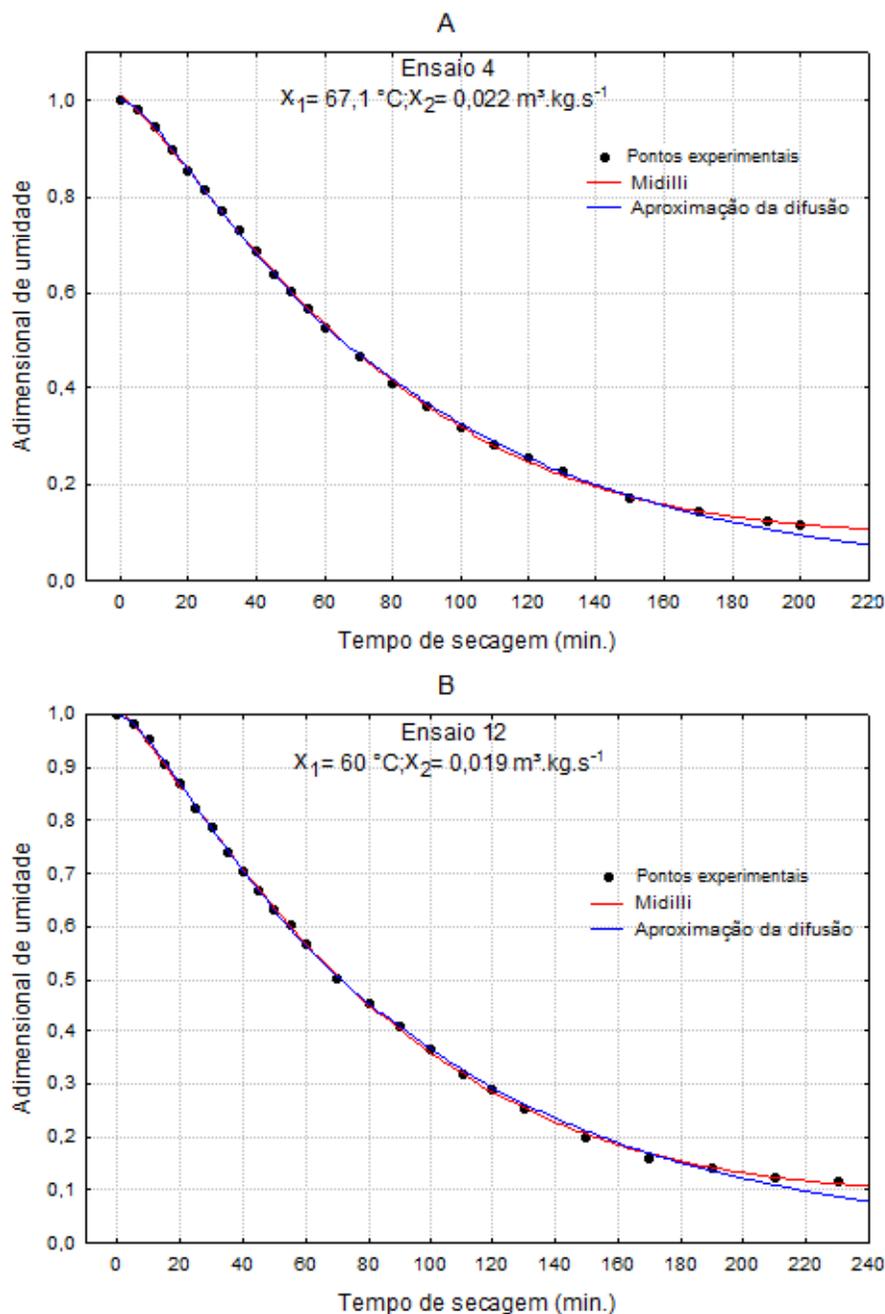


Figura 10. Adimensional de umidade em função do tempo para os experimentos 4 (A) e 12 (B), comparando os ajustes obtidos pelos modelos de Midilli e Aproximação da difusão.

x_1 : temperatura no experimento; x_2 : fluxo de ar no experimento.

Tratando do modelo de Aproximação da difusão, no experimento 4 chegou-se à equação 28 e no experimento 12 à equação 29.

$$Y = -0,118604 \times \exp(-0,100549 \times t) + 1,118604 \times \exp(-0,012357 \times t) \quad (\text{Equação 28})$$

$$Y = -0,094778 \times \exp(-0,115952 \times t) + 1,094778 \times \exp(-0,011006 \times t) \quad (\text{Equação 29})$$

5.5. CINÉTICA DE SECAGEM

No estudo da cinética de secagem, a umidade presente no material foi confrontada com o tempo de secagem. A figura 11A trouxe a cinética de secagem dos pontos fatoriais do delineamento composto central (aqueles relativos aos níveis -1 e +1). Pôde-se observar no gráfico a importância do fator temperatura (x_1) para o andamento da secagem. Os experimentos 2 e 4, ambos com a temperatura de 67,1 °C, apresentaram tempo de secagem bem inferior aos experimentos 1 e 3, de temperatura 52,9 °C. Vários outros autores identificaram a temperatura como o fator que mais afeta a cinética de secagem de produtos alimentícios, tais como Gouveia et al. (2002) ao secar cajus, García, Moyano e Pedreschi (2008) ao trabalhar com fatias de batata e maçã e Vieira e Moraes (1992) ao avaliarem as propriedades da secagem de batata doce.

Foi interessante observar também como a variável fluxo do ar (x_2) não apresentou a mesma significância. Os experimentos 2 e 4, apesar de executados com a mesma temperatura, possuíam o fluxo de ar diferente, sendo os dos experimentos 4 e 3 iguais e superiores aos de 1 e 2. Entretanto, mesmo com a diferença no valor do fluxo de ar, as curvas foram praticamente coincidentes, com o tempo de secagem do experimento 4 apenas 10 min inferior. Comportamento semelhante apresentaram os experimentos 1 e 3 que, apesar da pequena diferença observada nas curvas no meio do processo, onde aquela correspondente ao experimento 3 se mostrou mais inclinada, não apresentou diferença quanto ao tempo final de secagem.

Na figura 11B pôde ser visualizada a cinética de secagem dos pontos axiais do ensaio. Nesse gráfico, novamente ficou clara a significância da temperatura no processo ao observar as curvas dos experimentos 5 e 6. Eles apresentaram o mesmo fluxo de ar, só diferindo quanto às temperaturas. A diferença de 20 °C entre os experimentos fez com que o tempo de secagem daquele com maior temperatura (70 °C) fosse de 170 min. Ainda neste gráfico, ao analisar as curvas dos experimentos 6 e 8, percebeu-se que houve uma espécie de compensação entre as variáveis temperatura e fluxo de ar. Isso, pois, os dois experimentos apresentaram o mesmo

tempo de secagem, sendo que o experimento 6 possuía maior temperatura que o experimento 8, porém menor fluxo.

Porém, no caso dos pontos axiais, pôde-se perceber uma pequena influência do fluxo de ar para o andamento da secagem ao avaliar os experimentos 7 e 8. Eles possuíam a mesma temperatura (60 °C), mas o experimento 8 teve um tempo de secagem inferior (50 min menor), fato devido ao maior fluxo de ar. Essa diferença pode ter ocorrido devido a discrepância entre os dois diferentes níveis de fluxo que foi grande (53,3% de diferença), já que trataram-se dos experimentos de menor e maior fluxos do arranjo experimental, respectivamente. Algo semelhante aconteceu na pesquisa de Nicoleti, Telis-Romero e Telis (2001), quando, ao secarem fatias de abacaxi, observaram que um aumento grande da velocidade de ar resultou no aumento da difusividade da água, reduzindo o tempo de secagem. Porém, para uma variação pequena na grandeza velocidade (fluxo), praticamente não houve diferença na difusividade da água, nem no tempo de processo. Bozkir (2006) também verificou que a velocidade do ar foi importante para diminuir o tempo de secagem de damascos, assim como a temperatura.

Já a figura 11C trouxe a cinética de secagem dos quatro experimentos do ponto central. No gráfico foi possível notar que houve boa repetibilidade dos dados, já que as curvas ficaram praticamente coincidentes, com a única diferença no tempo de secagem observada no experimento 11, que necessitou de 20 min a mais para chegar ao fim do processo.

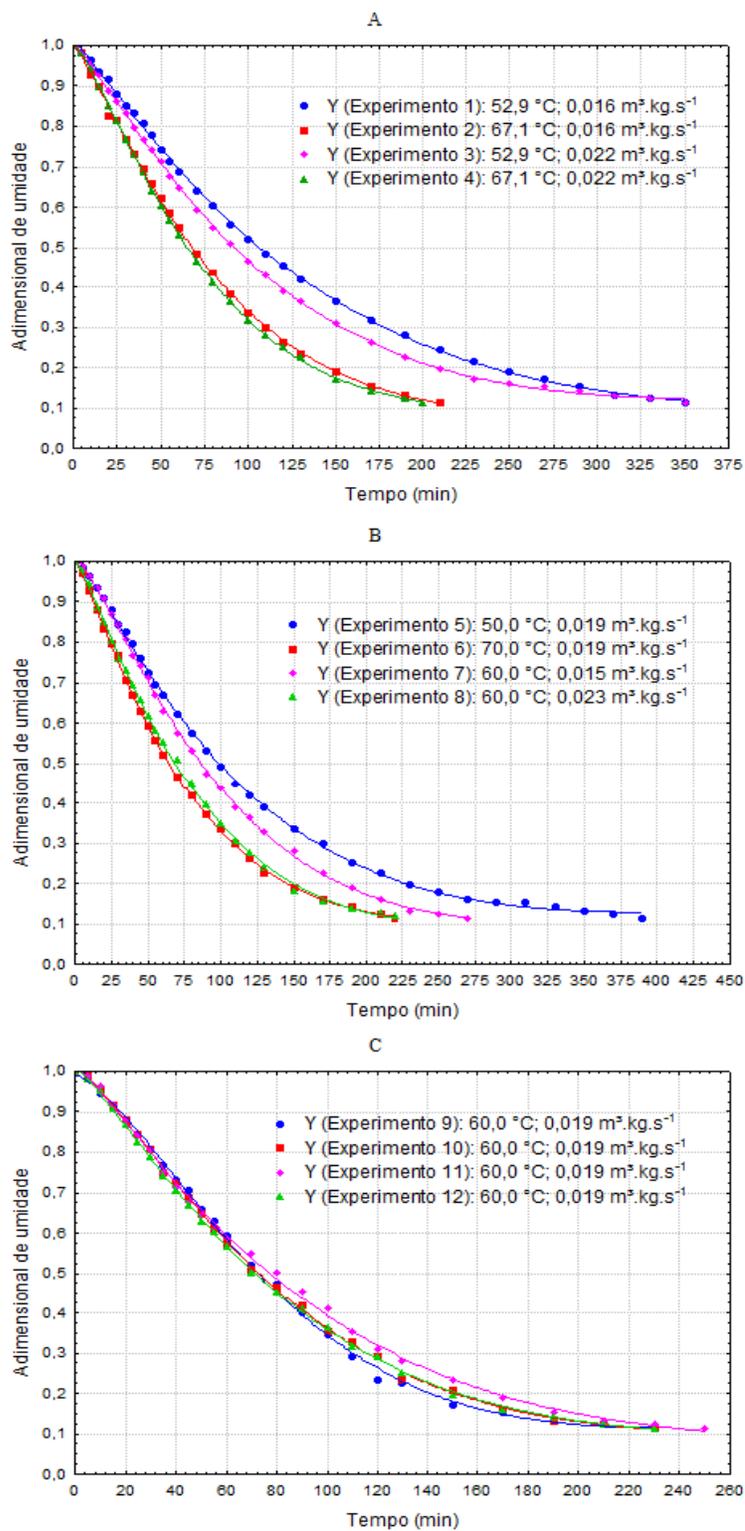


Figura 11. Adimensional de umidade em função do tempo para os experimentos de 1 a 4 (pontos fatoriais) (A), 5 a 8 (pontos axiais) (B) e 9 a 12 (pontos centrais) (C) durante modelagem da cinética de secagem de polpa residual de batata. Linhas contínuas representam o ajuste dos dados previstos pelo modelo de Midilli.

5.6. CÁLCULO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA (D_{ef})

O diâmetro médio encontrado para as partículas do sedimentado foi 7,55 mm, o que leva a um valor de raio esférico de 3,775 mm, ou 0,003775 m. Os dados apresentaram desvio-padrão de 0,73 mm, variância de 0,53 mm² e coeficiente de variação de 9,67%. Para todos os experimentos, o valor de raio esférico médio foi considerado constante.

Durante a análise por ajuste não linear, verificou-se que no nível $n = 4$ os valores de R^2 foram superiores a 90%, sendo então considerado tal nível da equação de Crank (1975) (Equação 30):

$$Y = \frac{6}{\pi^2} \exp(-z \times t) + \frac{3}{2\pi^2} \exp(-4z \times t) + \frac{2}{3\pi^2} \exp(-9z \times t) + \frac{3}{8\pi^2} \exp(-16z \times t) \quad (\text{Equação 30})$$

Na qual:

Y : adimensional de umidade;

z : fator que é função do raio esférico da partícula e da difusividade efetiva (D_{ef});

t : tempo.

Realizando o ajuste desta equação aos valores de adimensional de umidade (Y) e tempo de secagem (t) dos 12 experimentos, obteve-se o valor de z para cada experimento e, conseqüentemente, o valor da D_{ef} , segundo a equação 24 representada abaixo. Os valores de z e D_{ef} foram mostrados na tabela 11.

$$z = \frac{\pi^2 D_{ef}}{r^2} \quad (\text{Equação 24})$$

Pôde-se verificar que a difusividade efetiva nos experimentos variou entre $7,337 \times 10^{-11}$ e $12,935 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, valores de acordo com a constatação de Zogzas, Mauroulis e Marinos-Kouris (1996), que postulou que para produtos alimentícios, os valores de D_{ef} se encontram na faixa de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabela 11. Valores dos fatores z e difusividades efetivas (D_{ef}) encontradas para os experimentos de secagem de polpa residual de batata, em função da temperatura (x_1) e fluxo do ar (x_2).

Experimento	x_1 (°C)	x_2 (m ³ .kg.s ⁻¹)	z (x 10 ⁻⁵)	D_{ef} (x 10 ⁻¹¹) (m ² .s ⁻¹)
1	52,9	0,016	5,08131	7,337
2	67,1	0,016	8,79658	12,701
3	52,9	0,022	5,95799	8,603
4	67,1	0,022	8,84218	12,767
5	50	0,019	5,51659	7,965
6	70	0,019	8,95867	12,935
7	60	0,015	6,79087	9,805
8	60	0,023	8,70054	12,563
9	60	0,019	7,84683	11,330
10	60	0,019	7,51131	10,846
11	60	0,019	7,31229	10,558
12	60	0,019	7,91654	11,431

Verificou-se que os menores valores foram obtidos nos experimentos com temperaturas mais baixas e os maiores valores naqueles com temperaturas mais altas. Tal constatação condiz com os resultados encontrados por Barbosa et al. (2007), Martinazzo et al. (2007), Doymaz e Ismail (2010) e Almeida et al. (2009), que verificaram que em seus processos de secagem, a grandeza foi fortemente influenciada pela temperatura, sendo diretamente proporcional, isto é, com o aumento da temperatura do ar de secagem observa-se o aumento da difusividade. Com o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui e, sendo a viscosidade uma medida de resistência do fluido ao escoamento, variações dessa propriedade implicam alterações na difusão da água nos capilares da matriz sólida da amostra de modo a favorecer a movimentação desse fluido no produto (GONELI et al., 2009).

Uzman e Sahbaz (2000) verificaram valores de difusividade efetiva variando entre 3×10^{-10} e 6×10^{-9} m².s⁻¹ para amidos de milho hidratados e entre 8×10^{-11} e 9×10^{-10} m².s⁻¹ para amidos gelatinizados, realizando secagens entre 40 e 70 °C. Por se tratar de amostras bastante porosas, onde a água removida é a não ligada que está largamente distribuída nos espaços vazios da estrutura do sólido, eles justificaram que as transferências de umidade no interior das amostras se deram majoritariamente por capilaridade ao invés de difusão. Observou-se que as D_{ef} encontradas no presente trabalho ficaram bem próximas das obtidas nesse estudo para amidos de milho gelatinizados, revelando semelhanças entre os materiais de secagem, apesar deste último ter sofrido gelatinização.

Outra pesquisa que obteve valores de D_{ef} próximos aos deste trabalho foi o estudo da secagem de grãos de trigo, realizado por Goneli et al. (2007). Os valores ficaram entre $9,02 \times 10^{-11}$ e $44,65 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Valores inferiores aos encontrados neste trabalho foram obtidos por Barbosa et al. (2007) ao realizarem a secagem de folhas de erva-cidreira (*Lippia alba* (Mill) N.E. Brown), onde as D_{ef} variaram de $2,91 \times 10^{-12}$ a $1,17 \times 10^{-11}$. Isso pode ser explicado pelo fato de a umidade inicial do produto estudado por esses pesquisadores ser menor, além de conter menor porcentagem de água livre (grande parte da água presente está fortemente integrada à matriz sólida), por trataram-se de folhas, o que dificulta a saída da umidade, diminuindo os valores de D_{ef} . Outro trabalho que obteve valores de D_{ef} inferiores foi o de Martinazzo et al. (2007), que também trabalharam com folhas (capim-limão), cujos resultados variaram entre $4,0 \times 10^{-12}$ e $3,9 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Já Doymaz e Ismail (2010), obtiveram valores entre $5,68 \times 10^{-10}$ e $1,54 \times 10^{-9}$, mais elevados dos que obtidos neste trabalho. Os pesquisadores realizaram a secagem de cerejas, que é um material com umidade inicial maior que a polpa residual de batata, apresentando maior quantidade de água livre. Além disso, o produto foi pré-tratado com solução de oleato de etila, solvente que corroeu parcialmente a superfície das frutas. Tais fatos corroboraram para a menor resistência à saída de água, refletida nos valores da D_{ef} .

Outro trabalho que obteve valores de D_{ef} mais elevados que o presente estudo foi o de Aghbashlo, Kianmehr e Arabhosseini (2009), variando de $3,17 \times 10^{-7}$ a $15,45 \times 10^{-7}$. Eles secaram fatias de batata com umidade inicial de $362 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ (b.s.), isto é, teor mais de três vezes superior ao da polpa residual de batata [que iniciou a secagem com $118 \text{ g} \cdot (100\text{g})^{-1}$ (b.s.)]. Além do fato de a amostra possuir mais água livre, foi utilizado um secador contínuo com esteira e ar em contracorrente, fator que deve ter contribuído decisivamente para a maior eficiência do processo e maior facilidade de retirada da umidade do produto. A forma e equipamento de secagem são requisitos que devem ser considerados na determinação da D_{ef} , uma vez que essa grandeza não é intrínseca ao material, dependendo também das condições de secagem (OLIVEIRA; OLIVEIRA; PARK, 2006).

Aplicou-se o delineamento composto central, considerando a D_{ef} como resposta das variáveis independentes temperatura e fluxo de ar. Verificou-se que, para o modelo matemático codificado, ao considerar todos os efeitos das variáveis, tanto lineares, quadráticos e a interação entre elas, apenas o efeito linear de temperatura se apresentou significativo para a determinação da D_{ef} (Tabela 12), situação também encontrada por Oliveira, Oliveira e Park (2006).

Tabela 12. Análise dos coeficientes de regressão de modelo matemático codificado para a variável difusividade efetiva (D_{ef}).

Fator	Coeficiente	Erro padrão	t	p
Média (a_0)	$1,104 \times 10^{-10}$	$4,270 \times 10^{-12}$	25,86013	0,000000*
x_1 linear (a_1)	$1,767 \times 10^{-11}$	$6,047 \times 10^{-12}$	5,84392	0,001107*
x_1 quadrática (a_{11})	$-7,400 \times 10^{-12}$	$6,779 \times 10^{-12}$	-2,18315	0,071749
x_2 linear (a_2)	$6,544 \times 10^{-12}$	$6,047 \times 10^{-12}$	2,16429	0,073639
x_2 quadrático (a_{22})	$6,477 \times 10^{-13}$	$6,779 \times 10^{-12}$	0,19110	0,854748
Interação x_1x_2 (a_{12})	$-3,000 \times 10^{-12}$	$8,539 \times 10^{-12}$	-0,70264	0,508612

*Valores estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$). x_1 = variável temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); x_2 = variável fluxo do ar ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).

Optou-se então por ignorar o efeito de interação entre temperatura e fluxo de ar e também o efeito quadrático de fluxo de ar, o que levou a um modelo onde todas as variáveis restantes foram significativas (Tabela 13).

Tabela 13. Análise dos coeficientes de regressão de modelo matemático codificado para a variável difusividade efetiva (D_{ef}), após ignorância dos fatores x_2 quadrática (a_{22}) e interação x_1x_2 (a_{12}).

Fator	Coeficiente	Erro padrão	t	p
Média (a_0)	$1,109 \times 10^{-10}$	$2,990 \times 10^{-12}$	37,09454	0,000000*
x_1 linear (a_1)	$1,767 \times 10^{-11}$	$5,463 \times 10^{-12}$	6,46823	0,000195*
x_1 quadrática (a_{11})	$-7,528 \times 10^{-12}$	$6,005 \times 10^{-12}$	-2,50727	0,036526*
x_2 linear (a_2)	$6,544 \times 10^{-12}$	$5,463 \times 10^{-12}$	2,39551	0,043481*

*Valores estatisticamente significativos ($p \leq 0,05$). x_1 = variável temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$); x_2 = variável fluxo do ar ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).

A partir destes resultados, foi possível obter a equação que estima a D_{ef} considerando os 12 experimentos (Equação 31).

$$D_{ef} = 1,109 \times 10^{-10} + 1,767 \times 10^{-11} x_1 - 7,528 \times 10^{-12} x_1^2 + 6,544 \times 10^{-12} x_2 \quad (\text{Equação 31})$$

Na qual:

D_{ef} : difusividade efetiva ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

x_1 : temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

x_2 : fluxo de ar ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$).

Pôde-se perceber que a D_{ef} é tão maior quanto maior forem os valores de fluxo de ar e temperatura nos experimentos realizados (Figura 12). Porém, com os experimentos não foi possível otimizar a grandeza D_{ef} , já que não obteve-se a sua área de máximo, ficando o mesmo fora do arranjo experimental. Os gráficos, entretanto, indicam que tal área de máximo pudesse ocorrer ao combinar temperatura e fluxo de ar mais elevados.

Tanto o fluxo de ar (velocidade) quanto o fluxo de ar de secagem influenciaram na determinação da D_{ef} , porém, pôde-se observar que a temperatura se mostrou mais importante, uma vez que o modelo significativo escolhido contém os fatores linear e quadrático da temperatura e apenas o fator linear do fluxo. Tal fato também pôde ser observado através de análise do gráfico de curvas de contorno da figura 12, onde verificou-se que um deslocamento horizontal na superfície (variação de temperatura) atravessa mais faixas de contorno que um deslocamento vertical (variação de fluxo). Portanto, ao variar somente a temperatura do experimento, maior seria a diferença observada na D_{ef} do que aquela que seria observada caso variasse apenas o fluxo de ar.

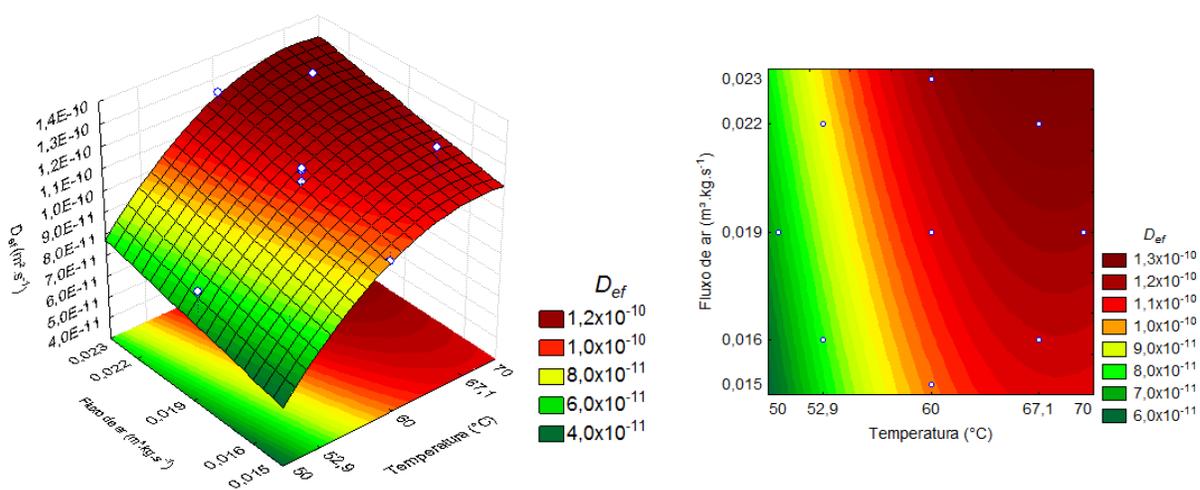


Figura 12. Gráfico de superfície de resposta e curvas de contorno obtidas para a difusividade efetiva (D_{ef}) em função da temperatura e fluxo do ar de secagem de polpa residual de batata.

6 CONCLUSÕES

- O tempo de 15 min foi tido como ótimo para sedimentação da polpa residual de batata e um modelo exponencial de quinta ordem se ajustou bem ao comportamento do processo.
- As variáveis independentes temperatura e fluxo de ar não foram significativas para as propriedades luminosidade (L^*), índice de solubilidade em água (ISA) e capacidade de absorção de óleo (CAO).
- A temperatura do ar afetou fortemente as grandezas tempo de secagem, atividade de água, pH, acidez titulável, parâmetros de cor a^* e b^* e índice de absorção de água (IAA), enquanto o fluxo de ar se mostrou menos importante, mas revelou influência quadrática para as últimas cinco características.
- A condição de secagem com temperatura de 60°C e fluxo de ar de $0,019 \text{ m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$ mostrou maior desejabilidade quanto às características da polpa residual de batata seca.
- A polpa residual de batata seca apresentou elevado teor de carboidratos [$99,140 \pm 0,046 \text{ g}.\text{(100 g)}^{-1}$] e baixos teores de cinzas [$0,354 \pm 0,031 \text{ g}.\text{(100 g)}^{-1}$], lipídeos [$0,113 \pm 0,021 \text{ g}.\text{(100 g)}^{-1}$] e proteínas [$0,393 \pm 0,010 \text{ g}.\text{(100 g)}^{-1}$].
- O modelo empírico de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados de secagem, seguido do modelo de Aproximação da difusão.
- A temperatura do ar se revelou muito importante na cinética de secagem, influenciando positivamente na diminuição do tempo de secagem, enquanto o fluxo de ar foi menos importante.
- A difusividade efetiva variou entre $3,17 \times 10^{-7}$ e $15,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ e foi influenciada pelas variáveis independentes fluxo do ar e temperatura do ar de secagem, sendo que esta última foi mais importante.

REFERÊNCIAS

- AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H.; ARABHOSSEINI, A. Modeling of thin-layer drying of potato slices in length of continuous band dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 50, p. 1348-1355, 2009.
- AGRIANUAL. Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: Instituto FNP, 2011. 482 p.
- AGUILERA, J. M.; CHIRALT, A.; FITO, P. Food dehydration and product structure. **Trends in Food Science and Technology**, v. 14, p. 432-437, 2003.
- AHMED, M.; SORIFA, A. M.; EUN, J. B. Effect of pretreatments and drying temperatures on sweet potato flour. **International Journal of Food Science and Technology**, Cambridge, v. 45, p. 726-732, 2010.
- AKPINAR, E.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Single layer drying behaviour of potato slices in a convective cyclone dryer and mathematical modeling. **Energy Conversion and Management**, v. 44, p. 1689-1705, 2003.
- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C.; SALES, J. F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, v. 2, n. 1, p. 72-83, 2009.
- ALONSO, R.; ORÚE, E.; ZABALZA, M. J.; GRANT, G.; MARZO, F. Effects of extrusion cooking on structure and functional properties of pea and kidney bean properties. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 80, p. 397-493, 2000.
- ALVIM, I. D., SGARBIERI, V. C., CHANG, Y. K. Desenvolvimento de farinhas mistas extrusadas a base de farinha de milho, derivados de levedura e caseína. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p.170-176, 2002.
- ANDERSON, R. A.; CONWAY, H. F.; PFEIFER, V. F.; GRIFFIN JUNIOR, E. L. Gelatinization of corn grift by roll and extrusion cook. **Cereal Science Today**, St. Paul, v. 14, n. 1, p. 4-11, 1969.
- ANDRADE, E. T.; BORÉM, F. M.; HARDOIM, P. R. Cinética de secagem do café cereja, bóia e cereja desmucilado, em quatro diferentes tipos de terreiros. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Especial café, n. 7, p. 37-43, 2003.
- AOAC. ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of AOAC International**. Editor: Dr. William Horwitz. 18 ed. Gaithersburg, Maryland: AOAC International, 2006.
- AZEREDO, H. M. C.; BRITO, E. S.; GARRUTI, D. S. Alterações químicas durante a estocagem. In:_____. **Fundamentos da estabilidade de alimentos**. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2004. cap. 2, p. 37-64.
- BARBANTI, D.; MASTROCOLA, D.; PIZZARANI, S. Air drying of plums influence of some process parameters on the specific drying kinetics. **Sciences des Aliments**, Paris, v. 15, p. 19-29, 1995.

BARBOSA, F. F.; MELO, E. C.; SANTOS, R. H. S.; ROCHA, R. P.; MARTINAZZO, A. P.; RADÜNZ, L. L.; GRACIA, L. M. N. Evaluation of mathematical models for prediction of thin-layer drying of Brazilia lemon-scented verbena leaves (*Lippia alba* (Mill) N.E. Brown). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 73-82, 2007. 298 p.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEGA-MERCADO, H. **Deshidratación de alimentos**. Zaragoza (Espana): Editorial Acribia S. A., 2000.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Ed. da UNICAMP, 1995. 303 p.

BERBARI, S. A. G.; AGUIRRE, J. M. Alternativas para o aproveitamento de Batata. **Batata Show**, Itapetininga, v. 2, n. 4, p. 27, 2002.

BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Química do processamento de alimentos**. 3ª ed. São Paulo: Varela, 2001. 144p.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters**. New York: John Wiley & Sons, 1978. 653p.

BOZKIR, O. Thin-layer drying and mathematical modelling for washed dry apricots. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 77, p. 146-151, 2006.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução CNNPA nº 12, de 24 de julho de 1978**. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/12_78.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2012.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 360 de 23 de dezembro de 2003**. Aprova regulamento técnico sobre rotulagem nutricional de alimentos embalados, tornando obrigatória a rotulagem nutricional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF: ANVISA, 2003. Disponível em: <http://www.anvisa.gov.br/legis/resol/2003/rdc/360_03rdc.htm>. Acesso em: 13 jan. 2012.

CAMARGO FILHO, W. P.; CAMARGO, F. P. Acomodação da produção olerícola no Brasil e em São Paulo, 1990-2010 – Análise prospectiva e tendências 2015. **Instituto de Economia Agrícola**, 2011. Disponível em: <http://www.abhorticultura.com.br/downloads/Artigo_Mercado_Hort_IEA2011.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2012.

CARDOSO, K. C.; BERGAMASCO, R.; COSSICH, E. S.; MORAES, C. K. Otimização dos tempos de mistura e decantação no processo de coagulação/floculação da água bruta por meio da *Moringa oleifera* Lam. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 30, n. 2, p. 193-198, 2008.

CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

CASTILHO F.; FONTANARI, G. G.; BATISTUTI J. P. Avaliação de algumas propriedades funcionais das farinhas de tremçoço doce (*Lupinus albus*) e feijão guandu (*Cajanus cajan* (L) *Mills*) e sua utilização na produção de fiambre. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. 1, 2010.

CHIACHUNG, C. Moisture sorption isotherms of pea seeds. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 58, p. 45-51, 2003.

CLAUSSEN, I. C.; STROMMEN, I.; EGELANDSDAL, B.; STRAETKVERN, K. O. Effects of drying methods on functionality of a native potato protein concentrate. **Drying Technology**, New York, v. 25, p. 1101-1108, 2007.

COSTA, E. C. **Secagem industrial**, 1ª ed. São Paulo: Editora Blücher, 2007.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: S.I. Claredon Press, 1975. 414p.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química dos alimentos de Fennema**, 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2010. 900 p.

DEMIR, V.; GUNHAN, T.; YAGCIOGLU, A. K.; DEGIRMENCIOGLU, A. Mathematical modelling and the determination of some quality parameters of air-dried bay leaves. **Biosystems Engineering**, London, v. 88, n. 3, p. 325-335, 2004.

DIAS, L. T.; LEONEL, M. Caracterização físico-química de farinhas de mandioca de diferentes localidades do Brasil. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 4, p. 692-700, 2006.

DINCER, I.; DOST, S. An analytical model for moisture diffusion in solid objects during drying. **Drying Technology**, New York, v. 13, p 425-435, 1995.

DONADEL, M. E.; PRUDÊNPIO-FERREIRA, S. H. Propriedades funcionais de concentrado protéico de feijão envelhecido. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, p. 380-386, 1999.

DOYMAZ, I.; ISMAIL, O. Drying characteristics of sweet cherry. **Food and Bioproducts Processing**, doi:10.1016/j.fbp.2010.03.006, 2010.

ELLISSÈCHE, D. La patata. In: TIRILLY, Y.; BOURGEOIS, C. M. (Coordenadores). **Tecnología de las Hortalizas**. Zaragoza (España): Editorial Acribia S.A., 2002.

ERENTURK, S.; GULABOGLU, M. S.; GULTEKIN, S. The thinlayer drying characteristics of roseship. **Biosystems Engineering**, Oxford, v.89, n.2, p.159-166, 2004.

FAO. Food and Agriculture Organization of The United Nations. Potato World. **International Year of Potato**, 2008. Disponível em:
<<http://www.potato2008.org/en/world/index.html>>. Acesso em: 14 mar. 2012.

FELTRAN, J. C.; LEMOS, L. B.; VIEITES, R. L. Technological quality and utilization of potato tubers. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 6, p. 598-603, 2004.

FERNANDES, A. M.; SORATTO, R. P.; SILVA, B. L.; SOUZA-SCHLICK, G. D. Crescimento, acúmulo e distribuição de matéria seca em cultivares de batata na safra de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 45, p. 826-835, 2010.

FERNANDO, W. J. N.; AHMAD, A. L.; OTHMAN, M. R. Convective drying rates of thermally blanched slices of potato (*Solanum tuberosum*): Parameters for the estimation of drying rates. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, p. 514-519, 2011.

FERREIRA NETO, C. J.; FIGUEIREDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M. Avaliação sensorial e da atividade de água em farinhas de mandioca temperadas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 794-802, 2005.

FICK, A. On liquid diffusion. **Philosophical Magazine and Journal of Science**, London, v. 10, p. 31-39, 1855.

FONSECA FILHO, A.; ARAÚJO, W.; FALCIROLLI, D.; PILLA, N.; MARQUES, A. Avaliação da qualidade tecnológica de pães enriquecidos com farelo de trigo. **Alimentos e Nutrição**, Araraquara, v. 8, n. 3, p. 17-25, 1997.

FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains. **Advances in Drying**, Washington, v. 1, p. 119-153, 1980.

FREITAS, T. S.; LEONEL, M. Influência dos parâmetros operacionais na cor de féculas de mandioca pré-gelatinizadas por extrusão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA MANDIOCA – MANDIOCA BIOENERGIA, ALIMENTO E RENDA, 12., 2007, Paranavaí. **Anais...** Disponível em:
<<http://www.abam.com.br/arquivos/congresso/109%20Taila%20Santos%20de%20%20Freitas.pdf>>. Acesso em: 15 mar. 2012.

FRUTHOTEC. Instituto de Tecnologia de Alimentos (ITAL). **Desidratação de frutas e hortaliças**: Manual técnico. Campinas: 2001. 205 p.

GAL, S. Recent developments in techniques for the determination of sorption isotherms. In: DUCKWORTH, R. B. (Ed.). **Water relations of food**. New York: Academic Press, 1975. 89 p.

GARCÍA, C. F.; MOYANO, P. C.; PEDRESCHI, F. Enthalpy-entropy compensation for water loss of vegetable tissues during air drying. **Drying Technology**, New York, v. 26, p. 1563-1569, 2008.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento - Especial Café**, Viçosa, n. 11, p. 64-73, 2009.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S. A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 135-140, 2007.

GOUVEIA, J. P. G.; MOURA, R. S. F.; ALMEIDA, F. A. C.; OLIVEIRA, A. M. V.; SILVA, M. M. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 471-474, 2002.

GOYAL, R. K.; KINGSLY, A. R. P.; MANIKANTAN, M. R.; ILYAS, S. M. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of plum in a tunnel dryer. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 79, p. 176-180, 2007.

GREENSMITH, M. **Practical dehydration**. 2 ed. CRC Press: Flórida, 1998.

HASSAN-BEYGI, S. R.; AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M. H; MASSAH, J. Drying characteristics of walnut (*Juglans regia* L.) during convection drying. **International Agrophysics**, Lublin, v. 23, p. 129-135, 2009.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

HERNANDÉS-DIAS, J. R.; QUINTERO-RAMOS, A.; BERNARD, J.; BALANDRÁN-QUINTANA, R. R. Funcional properites of extrudates prepared with blends of wheat flour/pinto bean meal with added wheat brand. **Food Science and Technology International**, London, v. 13, p. 301-308, 2007.

HOAGLIN, D. C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J. W. **Understanding robust and exploratory data analysis**. New York: J. Wiley, p. 447, 1983.

HOOVER, R. Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 45, p. 253-267, 2001.

HUNTERLAB. **User's manual with universal software version 3.5**. Reston: Hunterlab, 1998.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Levantamento sistemático da produção agrícola, 2012. Produção Confronto das Safras de 2011 e 2012 - Brasil - Fevereiro 2012. Disponível em:

<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/lspa_201202_5.shtm>. Acesso em: 28 mar. 2012.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. – 1. ed. digital, São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.

JANGAM, S. V.; JOSHI, V. S.; MUJUMDAR, A. S; THORAT, B. N. Studies of dehydration of sapota (*Achras zapota*). **Drying Technology**, New York, v. 26, p. 369-377, 2008.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3 ed. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental-ABES, 1995. 720 p.

KARIM, M. A.; HAWLADER, M. N. A. Mathematical modeling and experimental investigation of tropical fruits drying. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Oxford, v. 48, p. 4914-4925, 2005.

KASHANI-NEJAD, M. A.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI A. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KHAZAEI, J.; CHEGINI, G. R.; BAKHSHIANI, M. A novel alternative method for modeling the effects of air temperature and slice thickness on quality and drying kinetics of tomato slices: superposition technique. **Drying Technology**, New York, v. 26, p. 759-775, 2008.

KINGSLEY, R. P.; GOYAL, R. K.; MANIKANTAN, M. R.; ILYAS, S. M. Effects of pretreatments and drying air temperature on drying behaviour of peach slice. **International Journal of Food Science and Technology**, London, v. 42, n. 1, p. 65-69, 2007.

KUROZAWA, L. E. **Efeito das condições de processo na cinética de secagem de cogumelo (*Agaricus blazei*)**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LABUZA, T. P. The properties of water in relationship to water binding in food: a review. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 25, p. 151-166, 1995.

LAMBERTS, L.; BRIJS, K.; MOHAMED, R.; VERHELST, N.; DELCOUR, J. A. Impact of Browning Reactions and Bran Pigments on Color of Parboiled Rice. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Easton, v. 54, n. 26, p. 9924-9929, 2006a.

LAMBERTS, L.; DE-BIE, E.; DERYCKE, V.; VERAVERBEKE, W. S.; DE-MAN, W.; DELCOUR, J. A. Effect of processing conditions on color change of brown and milled parboiled rice. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 83, n. 1, p. 80-85, 2006b.

LESCANO, C. A. A.; TOBINAGA, S. Modelo codificado e real para a difusividade efetiva da secagem do resíduo do extrato hidrossolúvel de soja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 6, n. 1, p. 17-25, 2004.

LEONEL, M.; CEREDA, M. P. Caracterização físico-química de algumas tuberosas amiláceas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 1, p. 65-69, 2002.

LEONEL, M.; JACKEY, S.; CEREDA, M. P. Processamento industrial de fécula de mandioca e batata doce - um estudo de caso. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 18, n. 3, 1998.

LEONEL, M. GARCIA, A. C. D. B.; REIS, M. M. Caracterização físico-química e microscópica de amidos de batata-doce, biri, mandioca e taioba e propriedades de expansão após modificação fotoquímica. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 7, n. 2, p. 129-137, 2004.

LEONEL, M.; MARTINS, J. C.; MISCHAN, M. M. Produção de *snacks* funcionais à base de farinha de soja e polvilho azedo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, 2010.

LEONEL, M.; MISCHAN, M. M.; PINHO, S. Z.; IATAURO R. A.; DUARTE FILHO, J. Efeitos de parâmetros de extrusão nas propriedades físicas de produtos expandidos de inhame. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 2, p. 459-464, 2006.

LEORO, M. G. V. **Desenvolvimento de cereal matinal extrusado orgânico à base de farinha de milho e farelo de maracujá**. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Alimentos) Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <http://www.fea.unicamp.br/alimentarium/ver_documento.php?did=388>. Acesso em: 20 jun. 2010.

LEWIS, W. K. The rate of drying of solids materials. **The Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 13, n. 5, p. 427-432, 1921.

LI, J.-Y.; YEH, A.-I. Relationships between thermal, rheological characteristics and swelling power for various starches. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 50, p. 141-148, 2001.

LUCAS, V. **Obtenção de fatias de banana desidratada crocantes através da pré-secagem a altas temperaturas e curto tempo em leite fluidizado**. 1996. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 1996.

MAIA, L. H.; WNAG, S. H.; ASCHERI, J. L. R.; CABRAL, L. C.; FERNANDES, M. S. Viscosidade de pasta, absorção de água e índice de solubilidade em água dos mingaus desidratados de arroz e soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 3, 1999.

MACHADO, R. M. D.; TOLEDO, M. C. F. Determinação de glicoalcalóides em batatas in natura (*Solanum Tuberosum* L.) comercializadas na cidade de Campinas, estado de São Paulo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.24, n.1, p. 047-052, 2004.

MACHADO, S. A.; NASCIMENTO, R. G. M.; MIGUEL, E. P.; TÉO, S. J.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D. Distribution of total height, transverse área and individual volume for *araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntz. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 12-21, 2010.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.

MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p. 301-306, 2007.

MATOS, D.; SANTOS, I.; COIMBRA, J.; SILVA, P. Fécula de batata como adjunto de malte na fabricação de cerveja. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 23, n. 1, p. 161-172, 2005.

MAYER, F. Potato pulp: properties, physical modification and applications. **Polymer Degradation and Stability**, Essex, v. 59, n. 1-3, p. 231-235, 1998.

MAYER, F.; HILLEBRANDT, J. O. Potato pulp: microbiological characterization, physical modification, and application of this agricultural waste product. **Applied Microbiology and Biotechnology**, Berlin, v. 48, p. 435-440, 1997.

MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Principles, methods and applications of the convective drying of foodstuffs. **Institution of Chemical Engineers**, London, v. 77, n. 3, p. 175-193, 1999.

MERRILL, A. L.; WATT, B. K. **Energy value of foods: basis and derivation**. Agriculture Handbook, n. 74. Washington, DC, United States Department of Agriculture, 1973. 109 p.

MESQUITA, C. B.; LEONEL, M.; URBANO, L. H. Adição de linhaça no desenvolvimento de biscoitos funcionais de polvilho azedo. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 22., 2010, Marília. **Anais...** Disponível em: <http://prope.unesp.br/xxii_cic/ver_resumo.php?area=100043&subarea=12196&congresso=30&CPF=38443301864>. Acesso em: 19 mar. 2012.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAZ, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, New York, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MIRANDA, M. Z. **Efeito do tempo de germinação do trigo e das variáveis de extrusão na qualidade tecnológica e nutricional de farinha integral**. 216f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

MIZUBUTI, I. Y.; JÚNIOR, O. B.; SOUZA, L. V. O.; SILVA, R. S. F. S.; IDA, E. I. Propriedades funcionais da farinha e concentrado protéico de feijão guandu (*Cajanus cajan* (L.) *Millsp*). **Archivos Latinoamericano de Nutricion**, Caracas, v. 50, n. 3, p. 274-280, 2000.

MMA. Conferência das Nações Unidas sobre Meio-Ambiente e Desenvolvimento. Capítulo 21. Ministério do Meio Ambiente, 1992. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/cap21.pdf>. Acesso em 14/05/2010.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 66, n. 4, p. 513-18, 2005.

MONTENEGRO, F. M.; GOMES-RUFFI, C. R.; VICENTE, C. A.; COLLARES-QUEIROZ, F. P.; STEEL, C. J. Biscoitos de polvilho azedo enriquecidos com fibras solúveis e insolúveis. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28 (Supl.), p. 184-191, 2008.

MOORTHY, S. N. **Tuber Crop Starches**. Thiruvananthapuram: Central Tuber Crops Research Institute, 2001. p. 4-52.

NICOLETI, J. F.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Air-drying of fresh and osmotically pré-treated pineapple slices: fixed air temperature versus fixed slice temperature drying kinetics. **Drying Technology**, New York, v. 19, p. 2175-2191, 2001.

- OLIVEIRA, D. M.; REIS, K. C.; PEREIRA, J. Produção de farinha de batata utilizando secagem ao sol. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 125-135, 2006.
- OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006.
- OSUNDAHUNSI, O. F.; FAGBEMI, T. N.; KESSELMAN, E.; SHIMONI, E. Comparison of the physicochemical properties and pasting characteristics of flour and starch from red and white sweet potato cultivars. **Journal of Agricultural Food Chemistry**, v. 51, p. 2232-2236, 2003.
- PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. 1949. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, USA, 1949.
- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 52, n. 4, p. 349-357, 2002.
- PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra Bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.
- PARK, K. J.; BROD, F. P. **Secagem de produtos agrícolas**. Campinas: DPPAG/FEAGRI/UNICAMP, 1998. Apostila de secagem. 118 p.
- PARK, K. J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 51, n. 3, p. 193-199, 2002.
- PAUCAR-MENACHO, L. M.; BARRETO, P. A. A.; MAZAL, G.; FAKHOURI, F. M.; STEEL, C. J.; COLLARES-QUEIROZ, F. P. Desenvolvimento de massa alimentícia fresca funcional com a adição de isolado protéico de soja e polidextrose utilizando páprica como corante. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 28, n. 4, p. 767-778, 2008.
- PELIZER, L. H.; PONTINERI, M. H.; MORAES, I. O. Utilização de resíduos agro-industriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. **Journal of Technology Management and Innovation**, Santiago, v. 2, n. 1, p. 118-127, 2007.
- PEREIRA, E. M. S.; LUZ, J. M. Q.; MOURA, C. C. **A batata e seus benefícios nutricionais**. Uberlândia: EDUFU. 2005. 60 p.
- PEREIRA, J.; CIACCO, C. F.; VILELA, E. R.; TEIXEIRA, A. L. S. Féculas fermentadas na fabricação de biscoitos: estudo de fontes alternativas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 2, p. 287-293, 1999.
- PERONI, F. H. G.; ROCHA, T. S.; FRANCO, C. M. L. Some structural and physicochemical characteristics of tuber and root starches. **Food Science and Technology International**, London, v. 12, n. 6, p. 505-513, 2006.

PINELI, L. L. O.; MORETTI, C. L.; ALMEIDA, G. C.; SANTOS, J. Z.; ONUKI, A. C. A.; NASCIMENTO, A. B. G. Caracterização química e física de batatas ágata e monalisa minimamente processadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n. 1, p. 127-134, 2006.

POTTER, N.; HOTCHKISS, J. H. **Food Science**. 5 ed. Chapman Hall: New York, 1995. 608 p.

QUADROS, D. A.; IUNG, M. C.; FERREIRA, S. M. R.; FREITAS, R. J. S. Composição química de tubérculos de batata para processamento, cultivados sob diferentes doses e fontes de potássio. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 29, n. 2, p. 316-323, 2009.

QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M.; MELO, E. C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995. 59p.

RAVI, R.; SUSELAMMA, N. S. Simultaneous optimization of a multy-response system by desirability function analysis of boondi making: A case study. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 70, p. S539-S547, 2005.

ROBERTS, J. S.; KIDD, D. R.; PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 89, p. 460-465, 2008.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2 ed. Campinas: Ed. Cárita, 2009. 358p.

SAITO, I. M.; CABELLO, C.; FUKUSHIMA, R. S. Análise de fibra residual do farelo de mandioca após tratamento hidrotérmico. **Revista Raízes e Amidos Tropicais**, Botucatu, v. 2, n. 1, p. 1-11, 2006.

SANTOS, R. C.; BARBOSA FILHO, O.; GIORDANO, G. Proposta de um método de cálculo do tempo de sedimentação no tratamento de esgotos por lodos ativados em bateladas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 3, p. 185-193, 2005.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, F. A. C.; ALVES, N. M. C.; MELO, K. S.; GOMES, J. P. Característica higroscópica e termodinâmica do coentro desidratado. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 237-244, 2010a.

SILVA, E. M.; SILVA, J. S.; PENA, R. S.; ROGEZ, H. A combined approach to optimize the drying process of flavonoid-rich leaves (*Inga edulis*) using experimental design and mathematical modeling. **Food and Bioproducts Processing**, v. 89, p. 39-46, 2010b.

SILVA, J. A. **Tópicos da tecnologia de alimentos**. São Paulo: Livraria Varela, 2000. 232 p.

SINGH, J.; SINGH, N.; SHARMA, T. R.; SAXENA, S. K. Physicochemical, rheological and cookie making properties of corn and potato flours. **Food Chemistry**, London, v. 83, p. 387-393, 2003.

SOARES JÚNIOR, M. S.; GROSSMANN, M. V. E.; SILVA, R. S. S. F.; CALIARI, M.; SPINOSA, W. A. Expansion and hydration properties of cassava starch extruded with emulsifier. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 2, n. (1,2), p. 57-61, 1999.

SOUZA, A. B. **Recuperação de subprodutos da manipueira por coagulação e floculação com quitosana**. 1995. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

STRUMILLO, C. Z.; KUDRA, T. **Drying: Principles, Applications and Design**. v. 3. New York: Gordon and Breach Science Publisher, 1986. 448 p.

TACO. **Tabela brasileira de composição de alimentos**. Campinas: NEPA (Núcleo de Estudos e Pesquisas em Alimentação) - UNICAMP, 2004. 42p.

TAVERNA, L. G.; LEONEL, M.; URBANO, L. H. Desenvolvimento de biscoitos funcionais de polvilho azedo e quinoa por extrusão. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 22., 2010, Marília. **Anais...** Disponível em: <http://prope.unesp.br/xxii_cic/ver_resumo.php?area=100043&subarea=12196&congresso=30&CPF=30984604820>. Acesso em: 19 mar. 2012.

TFOUNI, S. A. V.; MACHADO, R. M. D.; GARCIA, L. C.; AGUIRRE, J. M.; GASPARINO F. J. **Batata chips e palha**. Agronegócio, n. 3, ITAL. Campinas, SP, 2003. 73p.

TIMOFIECSYK, F. R.; PAWLOWSKY, U. Minimização de resíduo na indústria de alimentos. **Boletim do centro de pesquisa e processamento de alimentos (CEPPA)**. Curitiba, v. 18, n. 2, p. 221-236, 2000.

TOGRUL, I. T.; PEHLIVAN, D. Mathematical modeling of solar drying of apricots in thin layers. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 55, p. 209-216, 2002.

TORRES, G. Produtividade e Qualidade: fatores indispensáveis para a bataticultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 20, n. 197, p. 7-9, 1999.

TROMBINI, F. R. M. **Caracterização de produtos extrusados de misturas de farinha de soja, fécula e farelo de mandioca**. 2010. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2010. Disponível em: <http://www.fca.unesp.br/pos_graduacao/Teses/PDFs/Arq0444.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2012.

UZMAN, D.; SAHBAZ, F. Drying kinetics of hydrated and gelatinized corn starches in the presence of sucrose and sodium chloride. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 65, n. 1, p. 115-122, 2000.

VALENTE, P. P. S. **S. Desidratação osmótica e secagem de abacaxi (*Ananás comosus* (L.) *merril*), variedade pérola**. 2007. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos)-Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

VARATHARAJAN, V.; HOOVER, R.; LIU, Q.; SEETHARAMAN, K. The impact of heat-moisture treatment on the molecular structure and physicochemical properties of normal and waxy potato starches. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 81, p. 466-475, 2010.

VIEIRA, J. A. G.; MORAES, I. O. Propriedades físicas e secagem de batata doce (*Ipomoea batatas*, L). **Alimentos e Nutrição**, São Paulo, v. 4, p. 79-87, 1992.

XANTHOPOULOS, G.; LAMBRINOS, G. R.; MANOLOPOULOU, H. Evaluation of thin-layer models for mushroom (*Agaricus bisporus*) drying. **Drying Technology**, New York, v. 25, p. 147-1481, 2007.

WANG, C. Y.; SINGH, R. P. Use of variable equilibrium moisture content in modelling rice drying. **Transactions of American Society of Agricultural Engineers (ASAE)**, St. Joseph, MI, v. 78, n. 6, p. 6505, 1978.

WANG, M.; CHEN, C.; SUN, G.; WANG, W.; FANG, H. Effects of curdlan on the color, syneresis, cooking qualities, and textural properties of potato starch noodles. **Starch/Stärke**, Weinheim, v. 62, p. 429-434, 2010.

WANG, R.; WANG, Y.; MA, G.; HE, Y.; ZHAO, Y. Efficiency of porous burnt-coke carrier on treatment of potato starch wastewater with an anaerobic-aerobic bioreactor. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 148, p. 35-40, 2009.

WANG, Z.; SUN, J.; LIAO, X.; CHEN, F.; ZHAO, G.; WU, J.; HU, X. Mathematical modeling on hot air drying of thin layer apple pomace. **Food Research International**, Toronto, v. 40, p. 39-46, 2007.

WASZCZYNSKYJ, N. Fécula de batata. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, Curitiba, v. 3, n. 2, p. 27-38, 1985.

WISCHMANN, B.; AHMT, T.; BANDSHOLM, O.; BLENNOW, A.; YOUNG, N.; JEPPESEN, L.; THOMSEN, L. Testing properties of potato from different scales of isolations – A ringtest. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 79, p. 970-978, 2007.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUM, H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, Oxford, v. 26, P. 457-465, 2001.

ZAVAREZE, E. R.; STORCK, C. R.; PEREIRA, J. M.; GULARTE, M. A.; DIAS, A. R. G. Elaboração de pão de queijo com substituição do amido de mandioca por amido de batata-doce (*Ipomoea batatas*) submetido a diferentes processos de secagem. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 12, n. 1, p. 68-76, 2009.

ZHENG, H.; YANG, X.; TANG, C.; LI, L.; AHMAD, I. Preparation of soluble soybean protein aggregates (SSPA) from insoluble soybean protein concentrates (SPC) and its functional properties. **Food Research International**, Toronto, v. 41, p. 154-164, 2008.

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.

APÊNDICE B – Propriedades da polpa residual de batata seca nas condições experimentais variáveis quanto à temperatura e ao fluxo de ar, de acordo com os experimentos no delineamento composto central.

Tabela A. Tempo de secagem, atividade de água (Aw), pH e acidez titulável obtidos para a polpa residual de batata seca nas condições experimentais variáveis quanto à temperatura (x_1) e ao fluxo de ar (x_2).

Experimento	Variáveis independentes		Tempo de secagem (min)	Aw	pH	Acidez titulável (%)
	x_1 (°C)	x_2 ($m^3.kg.s^{-1}$)				
1	52,9	0,016	350	0,274 ± 0,01	7,13 ± 0,02	0,711 ± 0,032
2	67,1	0,016	210	0,201 ± 0,02	4,40 ± 0,01	2,601 ± 0,019
3	52,9	0,022	340	0,230 ± 0,02	6,73 ± 0,01	1,340 ± 0,050
4	67,1	0,022	200	0,135 ± 0,02	4,60 ± 0,01	2,506 ± 0,018
5	50	0,019	390	0,227 ± 0,03	6,91 ± 0,02	0,802 ± 0,012
6	70	0,019	220	0,106 ± 0,03	4,20 ± 0,02	2,625 ± 0,032
7	60	0,015	270	0,215 ± 0,01	6,65 ± 0,01	2,187 ± 0,061
8	60	0,023	220	0,183 ± 0,02	5,21 ± 0,01	2,311 ± 0,044
9	60	0,019	250	0,209 ± 0,03	6,82 ± 0,02	1,053 ± 0,055
10	60	0,019	230	0,192 ± 0,02	6,94 ± 0,01	0,915 ± 0,070
11	60	0,019	230	0,181 ± 0,03	6,72 ± 0,01	1,223 ± 0,020
12	60	0,019	210	0,203 ± 0,01	6,90 ± 0,03	1,008 ± 0,045

Tabela B. Valores médios obtidos para os parâmetros instrumentais de cor L*, a* e b*, seguidos do desvio padrão, obtidos para os resíduos de lavagem de batatas secas nas condições experimentais variáveis quanto à temperatura (x_1) e ao fluxo de ar (x_2).

Experimento	Variáveis independentes		L*	a*	b*
	x_1 (°C)	x_2 ($m^3.kg.s^{-1}$)			
1	52,9	0,016	99,99 ± 0,01	0,98 ± 0,02	1,66 ± 0,01
2	67,1	0,016	99,29 ± 0,00	1,57 ± 0,01	2,40 ± 0,01
3	52,9	0,022	99,81 ± 0,00	1,02 ± 0,02	1,96 ± 0,02
4	67,1	0,022	99,28 ± 0,01	1,54 ± 0,02	2,49 ± 0,04
5	50	0,019	98,90 ± 0,01	1,14 ± 0,01	1,64 ± 0,01
6	70	0,019	98,87 ± 0,01	1,66 ± 0,02	2,79 ± 0,02
7	60	0,015	99,17 ± 0,01	1,49 ± 0,01	2,40 ± 0,02
8	60	0,023	98,92 ± 0,01	1,59 ± 0,02	2,71 ± 0,01
9	60	0,019	99,58 ± 0,00	1,02 ± 0,01	1,82 ± 0,02
10	60	0,019	99,21 ± 0,01	1,01 ± 0,02	1,75 ± 0,01
11	60	0,019	99,81 ± 0,01	1,16 ± 0,01	1,72 ± 0,01
12	60	0,019	99,84 ± 0,02	1,01 ± 0,03	1,97 ± 0,02

Tabela C. Valores médios das respostas índice de absorção de água (IAA), índice de solubilidade em água (ISA) e Capacidade de absorção de óleo (CAO), seguidos do desvio padrão, obtidos para os resíduos de lavagem de batatas secas nas condições experimentais variáveis quanto à temperatura (x_1) e ao fluxo de ar (x_2).

Experimento	Variáveis independentes		IAA [g _{gel} .(g _{matéria seca}) ⁻¹]	ISA [g.(100 g) ⁻¹]	CAO [g _{gel} .(g _{matéria seca}) ⁻¹]
	x_1 (°C)	x_2 (m ³ .kg.s ⁻¹)			
1	52,9	0,016	1,914 ± 0,024	0,118 ± 0,000	1,5750 ± 0,0119
2	67,1	0,016	2,015 ± 0,103	0,118 ± 0,001	1,5566 ± 0,0057
3	52,9	0,022	1,928 ± 0,016	0,156 ± 0,066	1,5335 ± 0,0043
4	67,1	0,022	2,048 ± 0,058	0,158 ± 0,071	1,5587 ± 0,0058
5	50	0,019	1,882 ± 0,027	0,276 ± 0,069	1,5458 ± 0,0087
6	70	0,019	2,125 ± 0,071	0,119 ± 0,000	1,5381 ± 0,0013
7	60	0,015	2,005 ± 0,034	0,158 ± 0,071	1,5289 ± 0,0107
8	60	0,023	2,080 ± 0,216	0,118 ± 0,002	1,5741 ± 0,0087
9	60	0,019	1,933 ± 0,053	0,158 ± 0,068	1,5408 ± 0,0068
10	60	0,019	1,940 ± 0,064	0,158 ± 0,068	1,5558 ± 0,0050
11	60	0,019	1,947 ± 0,089	0,118 ± 0,001	1,5495 ± 0,0081
12	60	0,019	1,929 ± 0,026	0,118 ± 0,002	1,5435 ± 0,0077

APÊNDICE C – Tabelas de ANOVA dos modelos ajustados para as variáveis dependentes em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Tabela D. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente tempo de secagem em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	QM	F	p
x_1 linear	33861,75	1	33861,75	279,7739	0,000000*
x_1 quadrática	7709,82	1	7709,82	63,7004	0,000044*
x_2 linear	1026,84	1	1026,84	8,4840	0,019507*
Erro residual	968,26	8	121,03		
SQ Total	43566,67	11			

*Fatores significativos para o modelo ajustado ($p \leq 0,05$). SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

Tabela E. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente atividade de água (Aw) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	QM	F	p
x_1 linear	0,014375	1	0,014375	38,90135	0,000429*
x_1 quadrática	0,000411	1	0,000411	1,11298	0,326480 ^{ns}
x_2 linear	0,003017	1	0,003017	8,16396	0,024433*
x_2 quadrática	0,000437	1	0,000437	1,18253	0,312861 ^{ns}
Erro residual	0,002587	7	0,000370		
SQ Total	0,021035	11			

*Fatores significativos no modelo ajustado ($p \leq 0,05$); n s: não significativo; SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

Tabela F. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente pH em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	MQ	F	p
x_1 linear	9,44830	1	9,448296	98,57647	0,000022*
x_1 quadrática	2,71588	1	2,715885	28,33551	0,001096*
x_2 linear	0,62369	1	0,623691	6,50713	0,038053*
x_2 quadrática	1,37546	1	1,375456	14,35048	0,006819*
Erro residual	0,67093	7	0,095847		
SQ Total	14,20689	11			

*Fatores significativos no modelo ajustado ($p \leq 0,05$). SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

Tabela G. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente acidez titulável em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	MQ	F	p
x_1 linear*	3,968897	1	3,968897	139,3655	0,000022*
x_1 quadrática*	0,511701	1	0,511701	17,9681	0,005447*
x_2 linear	0,062994	1	0,062994	2,2120	0,187501 ^{ns}
x_2 quadrática*	1,942991	1	1,942991	68,2270	0,000170*
Interação x_1x_2	0,131044	1	0,131044	4,6015	0,075614 ^{ns}
Erro residual	0,170870	6	0,028478		
SQ Total	6,478744	11			

*Fatores significativos no modelo ajustado ($p \leq 0,05$); n s: não significativo; SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

Tabela H. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente parâmetro de cor a* em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	MQ	F	p
x_1 linear	0,425940	1	0,425940	29,54325	0,000619*
x_1 quadrática	0,101905	1	0,101905	7,06813	0,028868*
x_2 quadrática	0,246643	1	0,246643	17,10719	0,003271*
Erro residual	0,115340	8	0,014418		
SQ Total	0,838892	11			

*Fatores significativos no modelo ajustado ($p \leq 0,05$). SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

Tabela I. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente parâmetro de cor b* em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	MQ	F	p
x_1 linear	1,048215	1	1,048215	36,64573	0,000514*
x_1 quadrática	0,115998	1	0,115998	4,05532	0,083896 ^{ns}
x_2 linear	0,085767	1	0,085767	2,99842	0,126955 ^{ns}
x_2 quadrática	0,595104	1	0,595104	20,80490	0,002601*
Erro residual	0,200228	7	0,028604		
SQ Total	1,966292	11			

*Fatores significativos no modelo ajustado ($p \leq 0,05$); n s: não significativo; SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

Tabela J. Tabela de ANOVA do modelo ajustado para variável dependente índice de absorção de água (IAA) em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) (x_1) e do fluxo do ar de secagem ($\text{m}^3.\text{kg}.\text{s}^{-1}$) (x_2).

Fator	SQ	GL	MQ	F	p
x_1 linear	0,039828	1	0,039828	39,45753	0,000411*
x_1 quadrática	0,002897	1	0,002897	2,87052	0,134042 ^{ns}
x_2 linear	0,002925	1	0,002925	2,89804	0,132473 ^{ns}
x_2 quadrática	0,010660	1	0,010660	10,56106	0,014062*
Erro residual	0,007066	7	0,001009		
SQ Total	0,061646	11			

*Fatores significativos no modelo ajustado ($p \leq 0,05$); n s: não significativo; SQ: soma dos quadrados; GL: graus de liberdade; QM: quadrado médio; F: valor F tabelado; p: nível de significância.

APÊNDICE D

Tabela K. Valores obtidos para o fator estatístico erro relativo médio ($P(\%)$) durante modelagem de cinética do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Fator estatístico	Experimento	Modelo						
		Lewis	Page	Henderson e Pabis	Wang e Singh	Midilli	Aproximação da difusão	Logarítmico
$P(\%)$	1	3,1830	3,4967	2,3566	3,9677	1,0220	2,3179	1,9515
	2	5,2625	3,1846	3,4045	2,2312	1,0351	2,3062	3,7995
	3	6,5831	7,0672	6,4315	6,4315	1,1541	6,3015	3,8186
	4	6,0897	3,9600	3,4558	2,6406	0,8549	2,2021	3,9887
	5	7,6268	7,9477	7,1476	7,9612	1,6354	7,6616	3,6765
	6	4,3719	4,6070	3,8405	4,1221	1,1390	3,6402	3,0905
	7	6,5476	4,3883	3,4818	2,9610	1,1632	2,1290	3,7605
	8	5,3694	4,1091	3,9103	1,8144	1,7777	3,4606	4,1722
	9	10,8461	7,5588	8,0959	6,3060	2,0703	6,1473	8,9967
	10	7,3748	4,5975	4,5935	3,0036	1,5661	2,8879	4,8541
	11	5,5149	4,1960	3,8306	2,6905	2,3215	3,2072	3,9287
	12	5,7078	3,9419	3,5399	2,2421	1,0304	2,6092	3,9602
Soma parcial dos <i>scores</i>		56	44	43	35	13	36	38

As cores simbolizam a classe em que cada valor se encaixou, de acordo com a distribuição de frequência mostrada abaixo, calculada com auxílio da Regra de Sturges.

Fator estatístico: $P(\%)$		
Classes / <i>Score</i>	Limite inferior	Limite superior
1	0,8549	2,1037
2	2,1038	3,3526
3	3,3527	4,6015
4	4,6016	5,8504
5	5,8505	7,0993
6	7,0994	8,3482
7	8,3483	9,5971
8	9,5972	10,8461

Tabela L. Valores obtidos para o fator estatístico raiz quadrada média do erro (*RQME*) durante modelagem de cinética do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Fator estatístico	Experimento	Modelo						
		Lewis	Page	Henderson e Pabis	Wang e Singh	Midilli	Aproximação da difusão	Logarítmico
<i>RQME</i>	1	0,01818	0,01263	0,01108	0,01444	0,00535	0,00764	0,01094
	2	0,02467	0,01128	0,01654	0,01101	0,00693	0,00925	0,01522
	3	0,02152	0,02033	0,01817	0,01817	0,00390	0,01715	0,01431
	4	0,02936	0,01336	0,01790	0,01576	0,00404	0,00698	0,01691
	5	0,02470	0,02437	0,02020	0,02378	0,00654	0,02140	0,01504
	6	0,01843	0,01464	0,01357	0,01372	0,00571	0,01121	0,01304
	7	0,03256	0,01556	0,01910	0,01951	0,00636	0,00767	0,01824
	8	0,02260	0,01302	0,01484	0,00958	0,00725	0,01051	0,01461
	9	0,04491	0,02140	0,03292	0,02647	0,00957	0,01810	0,03087
	10	0,03423	0,01556	0,02128	0,01873	0,00646	0,01006	0,02004
	11	0,02615	0,01566	0,01600	0,01562	0,01067	0,01079	0,01576
	12	0,02690	0,01347	0,01614	0,01377	0,00482	0,00783	0,01569
Soma parcial dos <i>scores</i>		59	34	39	36	14	24	38

As cores simbolizam a classe em que cada valor se encaixou, de acordo com a distribuição de frequência mostrada abaixo, calculada com auxílio da Regra de Sturges.

Fator estatístico <i>RQME</i>		
Classes / <i>Score</i>	Limite Inferior	Limite superior
1	0,00390	0,00901
2	0,00902	0,01414
3	0,01415	0,01927
4	0,01928	0,02439
5	0,02440	0,02952
6	0,02953	0,03464
7	0,03465	0,03977
8	0,03978	0,04491

Tabela M. Valores obtidos para o fator estatístico qui-quadrado reduzido (χ^2) durante modelagem de cinética do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Fator estatístico	Experimento	Modelo						
		Lewis	Page	Henderson e Pabis	Wang e Singh	Midilli	Aproximação da difusão	Logarítmico
χ^2	1	3,41E-04	1,70E-04	1,31E-04	2,23E-04	3,28E-05	6,47E-05	1,32E-04
	2	6,35E-04	1,39E-04	2,98E-04	1,32E-04	5,49E-05	9,79E-05	2,65E-04
	3	4,79E-04	4,42E-04	3,53E-04	3,53E-04	1,75E-05	3,26E-04	2,27E-04
	4	9,00E-04	1,95E-04	3,49E-04	2,71E-04	1,96E-05	5,56E-05	3,27E-04
	5	6,29E-04	6,32E-04	4,34E-04	6,02E-04	4,87E-05	5,04E-04	2,49E-04
	6	3,54E-04	2,33E-04	2,00E-04	2,04E-04	3,88E-05	1,43E-04	1,93E-04
	7	1,10E-03	2,61E-04	3,94E-04	4,11E-04	4,75E-05	6,62E-05	3,74E-04
	8	5,32E-04	1,84E-04	2,39E-04	9,97E-05	6,26E-05	1,26E-04	2,42E-04
	9	2,10E-03	4,98E-04	1,18E-03	7,62E-04	1,09E-04	3,72E-04	1,08E-03
	10	1,22E-03	2,63E-04	4,92E-04	3,81E-04	4,97E-05	1,15E-04	4,56E-04
	11	7,11E-04	2,66E-04	2,77E-04	2,64E-04	1,34E-04	1,32E-04	2,81E-04
	12	7,54E-04	1,97E-04	2,83E-04	2,06E-04	2,77E-05	6,96E-05	2,80E-04
Soma parcial dos scores		42	16	23	19	12	15	21

As cores simbolizam a classe em que cada valor se encaixou, de acordo com a distribuição de frequência mostrada abaixo, calculada com auxílio da Regra de Sturges.

Fator estatístico: χ^2		
Classes / Score	Limite Inferior	Limite superior
1	$1,75 \times 10^{-5}$	$2,77 \times 10^{-4}$
2	$2,78 \times 10^{-4}$	$5,37 \times 10^{-4}$
3	$5,38 \times 10^{-4}$	$7,98 \times 10^{-4}$
4	$7,99 \times 10^{-4}$	$1,05 \times 10^{-3}$
5	$1,06 \times 10^{-3}$	$1,31 \times 10^{-3}$
6	$1,32 \times 10^{-3}$	$1,57 \times 10^{-3}$
7	$1,58 \times 10^{-3}$	$1,83 \times 10^{-3}$
8	$1,84 \times 10^{-3}$	$2,10 \times 10^{-3}$

Tabela N. Valores obtidos para o fator estatístico coeficiente de regressão (R^2) durante modelagem de cinética do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Fator estatístico	Experimento	Modelo						
		Lewis	Page	Henderson e Pabis	Wang e Singh	Midilli	Aproximação da difusão	Logarítmico
R^2	1	99,6230%	99,8180%	99,8600%	99,8180%	99,9670%	99,9330%	99,8630%
	2	99,2350%	99,8400%	99,8480%	99,8480%	99,9400%	99,8920%	99,7090%
	3	99,4830%	99,5390%	99,6320%	99,6520%	99,9830%	99,6720%	99,7720%
	4	98,9660%	99,7890%	99,6160%	99,7020%	99,9800%	99,9420%	99,6570%
	5	99,3380%	99,3550%	99,4700%	99,3860%	99,9540%	99,5030%	99,7540%
	6	99,5790%	99,7340%	99,7720%	99,7670%	99,9600%	99,8440%	99,7890%
	7	98,7890%	99,7230%	99,5830%	99,5650%	99,9540%	99,9330%	99,6200%
	8	99,3780%	99,794%	99,732%	99,888%	99,936%	99,865%	99,740%
	9	97,7680%	99,4930%	98,8000%	99,2240%	99,8980%	99,6370%	99,9450%
	10	98,6410%	99,7190%	99,4750%	99,5930%	99,9520%	99,8830%	99,5340%
	11	98,1900%	99,7090%	99,6970%	99,7110%	99,8650%	99,8620%	99,7060%
	12	98,1340%	99,7830%	99,6880%	99,7730%	99,9720%	99,9720%	99,7050%
Soma parcial dos scores		51	16	23	24	12	15	17

As cores simbolizam a classe em que cada valor se encaixou, de acordo com a distribuição de frequência mostrada abaixo, calculada com auxílio da Regra de Sturges.

Fator estatístico: R^2

Classes / Score	Limite Inferior	Limite superior
8	97,7680%	98,0448%
7	98,0449%	98,3217%
6	98,3218%	98,5985%
5	98,5986%	98,8754%
4	98,8755%	99,1523%
3	99,1524%	99,4292%
2	99,4293%	99,7060%
1	99,7061%	99,9830%

APÊNDICE E – Constantes experimentais (coeficientes das equações) obtidas para os modelos teóricos estudados em cada experimento do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Tabela O. Constantes experimentais (coeficientes das equações) obtidas para os modelos de Lewis e Page em cada experimento do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Modelo	Experimento	Constantes experimentais	
		k	e
Lewis	1	0,006427	
	2	0,010250	
	3	0,007326	
	4	0,010653	
	5	0,006739	
	6	0,010582	
	7	0,007963	
	8	0,010041	
	9	0,009671	
	10	0,009528	
	11	0,008972	
	12	0,009705	
		Média	0,008988
Page	1	0,004498	1,073641
	2	0,005665	1,135638
	3	0,006074	1,039566
	4	0,005283	1,161448
	5	0,006063	1,021872
	6	0,007923	1,066221
	7	0,003573	1,174261
	8	0,006135	1,111726
	9	0,003072	1,259499
	10	0,004101	1,190093
	11	0,005097	1,125586
	12	0,005166	1,142468
		Média	0,005221

Tabela P. Constantes experimentais (coeficientes das equações) obtidas para os modelos de Henderson e Pabis, Wang e Singh e Midilli em cada experimento do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Modelo	Experimento	Constantes experimentais			
		k	a	b	e
Henderson e Pabis	1	0,006748	1,032323		
	2	0,010904	1,043473		
	3	0,007628	1,027217		
	4	0,011511	1,056061		
	5	0,007007	1,026054		
	6	0,011049	1,030474		
	7	0,008694	1,060482		
	8	0,010639	1,040856		
	9	0,010678	1,072195		
	10	0,010414	1,063326		
	11	0,009624	1,048657		
	12	0,010436	1,051120		
		Média	0,009611	1,046020	
Wang e Singh			a	b	
	1	-0,005499	0,000009		
	2	-0,008693	0,000022		
	3	-0,006256	0,000011		
	4	-0,009015	0,000023		
	5	-0,005722	0,000009		
	6	-0,009012	0,000023		
	7	-0,006757	0,000013		
	8	-0,008542	0,000021		
	9	-0,008152	0,000018		
	10	-0,008052	0,000018		
	11	-0,007611	0,000016		
	12	-0,008230	0,000019		
	Média	-0,007628	0,000017		
Midilli		k	a	b	e
	1	0,003811	1,010108	0,000167	1,128868
	2	0,004653	1,001755	0,000250	1,198023
	3	0,003818	1,005403	0,000273	1,168357
	4	0,004240	1,007940	0,000326	1,237215
	5	0,003849	1,011915	0,000264	1,150760
	6	0,006003	1,005049	0,000318	1,154381
	7	0,002966	1,012107	0,000254	1,240605
	8	0,004948	1,004578	0,000259	1,180928
	9	0,001567	0,988808	0,000414	1,439446
	10	0,003218	1,008184	0,000306	1,270298
	11	0,004812	1,015528	0,000203	1,159456
	12	0,004288	1,009219	0,000278	1,208167
	Média	0,004014	1,006716	0,000276	1,211375

Tabela Q. Constantes experimentais (coeficientes das equações) obtidas para os modelos de Aproximação da difusão e Logarítmico em cada experimento do ensaio de secagem de polpa residual de batata.

Modelo	Experimento	Constantes experimentais		
		k	a	b
Aproximação da difusão	1	0,120801	-0,049103	0,057161
	2	0,063773	-0,121205	0,185419
	3	0,193013	-0,037943	0,040124
	4	0,100549	-0,118604	0,122898
	5	0,227584	-0,034661	0,031173
	6	0,182098	-0,048834	0,062157
	7	0,083927	-0,120030	0,111179
	8	0,121675	-0,073112	0,090992
	9	0,046420	-0,299524	0,277162
	10	0,082151	-0,141553	0,138196
	11	0,187781	-0,073464	0,052965
	12	0,115952	-0,094778	0,094920
	Média	0,127143	-0,101068	0,105362
Logarítmico		k	a	c
	1	0,006898	1,024565	0,010079
	2	0,010047	1,077466	-0,042098
	3	0,008568	0,993062	0,048152
	4	0,010730	1,084275	-0,035615
	5	0,008243	0,982150	0,064190
	6	0,011531	1,015921	0,019399
	7	0,008129	1,087819	-0,034212
	8	0,010318	1,052474	-0,014894
	9	0,009417	1,126003	-0,066649
	10	0,009587	1,097423	-0,042668
	11	0,009317	1,061100	-0,015877
	12	0,009986	1,068420	-0,021930
Média	0,009398	1,055890	-0,011010	