

CINÉTICA DE SECAGEM DE KIWI (*ACTINIDIA DELICIOSA* VAR. HAYWARD)

L. CHAGURI¹, A. G. PINA, L. INTROPIDI e V. MAEDA

¹ Universidade Federal de São Paulo, Departamento de Engenharia Química
E-mail para contato: livia.chaguri@unifesp.br

RESUMO – O kiwi é uma fruta muito apreciada mundialmente, possui alto valor nutritivo e sua produção está em crescimento nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. Por ser perecível e delicada, a secagem pode ser uma alternativa interessante para sua conservação. O objetivo deste trabalho foi determinar a cinética de secagem e algumas propriedades químicas do kiwi. A secagem ocorreu em estufa com ventilação forçada de ar, velocidade 1,9 m/s, a 50, 60, 70 e 90 °C. Os dados experimentais foram ajustados através dos modelos exponencial e Fick. Determinou-se o teor de sólidos solúveis, pH e acidez titulável. Um aumento da temperatura de secagem produziu uma diminuição do conteúdo de umidade. O modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais. Os coeficientes de difusão apresentaram valores entre $1,94 \cdot 10^{-10}$ a $6,94 \cdot 10^{-10}$ m²/s. A influência da temperatura no coeficiente de difusão foi realizada mediante a correlação exponencial. A amostra fresca apresentou conteúdo de umidade de 84,80 %, base úmida, pH 3,70, acidez titulável 0,97 % e sólidos solúveis 13,1 °Brix. As amostras secas apresentaram algumas diferenças em termos dessas propriedades.

1. INTRODUÇÃO

O kiwi (*Actinidia deliciosa*) é uma fruta originária das regiões montanhosas do sul da China. Dentre as várias espécies existentes, a *Actinidia deliciosa* tem grande destaque por apresentar um equilíbrio entre a acidez e a quantidade de açúcares. O cultivo dessa fruta é um dos que mais cresceram no mercado mundial, devido a vários fatores importantes, como a sua rentabilidade, facilidade de colocação do produto no mercado, preços competitivos, além da facilidade em seu cultivo. A Itália, Nova Zelândia e Chile foram os maiores produtores mundiais de kiwi no ano de 2011 (Faostat, 2011), juntos, esses três países responderam por aproximadamente 73,1 % da produção mundial. A produção de kiwi no Brasil está em fase de expansão e concentra-se nas regiões Sul e Sudeste (Triches & Sebben, 2004). Os estados de maior produção dessa fruta são Rio Grande do Sul, Paraná, Santa Catarina e São Paulo, respectivamente.

Por ser uma fruta de alta perecibilidade que necessita de cuidados adequados em relação ao transporte e sua conservação, a secagem da fruta *in natura* pode constituir em um meio alternativo para sua comercialização, podendo inclusive melhorar algumas características da fruta, uma vez que a atividade de água do produto diminui, minimizando as reações de degradação (Doyamz & Pala, 2003; Simal *et al.*, 2005).

Os estudos relacionados a desidratação de frutas aumentaram consideravelmente nas últimas duas décadas (Atarés *et al.*, 2011). A secagem convectiva de kiwi foi realizada na faixa de temperatura de 25 a 60 °C com velocidade do ar variando de 0,3 a 0,9 m/s e umidade relativa entre 25 e 70 % (Kaya *et al.*, 2007). Os autores determinaram as cinéticas de secagem e observaram que os efeitos o tempo de secagem diminuiu quando foram empregadas maiores velocidades do ar, temperatura e menores valores de umidade relativa. As curvas de velocidade de secagem também foram determinadas, diminuindo seu valor com o tempo. Adicionalmente, os coeficientes de transferência de calor e massa foram determinados, e os autores observaram que um aumento na velocidade do ar de secagem, produziu um aumento nos valores desses coeficientes. Já a aplicação de dois modelos exponenciais e o modelo difusional para avaliar as cinéticas de secagem do kiwi entre 30-90 °C foi realizada por Simal *et al.* (2005), sendo o modelo de Page, o que melhor se ajustou aos dados experimentais. O estudo da desidratação osmótica com solução concentrada de sacarose (65 % em peso) a temperatura de 40 °C como pré-tratamento a secagem convectiva a 40 °C foi estudada por Butchweitz (2005). Os resultados indicaram que o pré-tratamento acarretou em uma diminuição de 10 % do tempo necessário para desidratar a amostra, com um incremento no rendimento do peso (aproximadamente 22 %) quando comparado com a fruta sem pré-tratamento.

O objetivo desse trabalho foi determinar as cinéticas de secagem do kiwi empregando diferentes temperaturas (50-90 °C) em uma estufa com circulação forçada de ar, ajustar as cinéticas aos modelos propostos na literatura e determinar algumas propriedades químicas antes e após a secagem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Preparação Das Amostras

Os kiwis da espécie Hayward, adquiridos em mercado local, foram manualmente descascados e fatiados com o auxílio de uma faca. As dimensões, espessura e diâmetro, foram medidas utilizando um paquímetro (STARRETT mod. 125MEA).

2.2. Determinação Das Cinéticas De Secagem

A secagem foi realizada em estufa com ventilação forçada (NOVA ÉTICA mod. 400-5ND) a 50, 60, 70, e 90 °C, a verificação da temperatura de trabalho programada foi realizada por um termômetro. As amostras foram pesadas em diferentes intervalos tempo em balança de precisão (DIGIMED mod. KN2000). Após a finalização do processo de secagem, as mesmas foram introduzidas em estufa a 70 °C até peso constante, para determinação da massa em base seca, segundo procedimento modificado (AOAC, 1995). A determinação da umidade relativa na estufa de secagem foi realizada através de medidas da temperatura de bulbo úmido durante o processo de secagem. A velocidade do ar foi medida através de anemômetro (INSTRUTEMP mod. ITAN 710).

2.3. Estudo Das Propriedades De Transporte De Calor De Massa

O mecanismo de transporte difusivo é assumido nos processos de secagem de alimentos e a taxa de secagem é descrita pela difusividade efetiva da umidade, ou seja, somente ocorre o transporte da

umidade no alimento. Mesmo que essa premissa não valida totalmente a teoria de secagem é uma abordagem muito prática e conveniente para descrever a mudança do conteúdo de umidade ao longo do processo de secagem. Parâmetros requeridos para esta abordagem são somente as dimensões e o coeficiente efetivo de difusão. A segunda Lei de Fick é frequentemente usada para descrever o mecanismo do processo de difusão, em que diversos autores se baseiam para o cálculo da umidade adimensionalizada (Pakowski & Mujumdar, 1995) e tempo de secagem (Strumillo & Kudra, 1986). Os dados experimentais das cinéticas de kiwi foram ajustados por meio de solução analítica da equação de Fick. Assim, considerando o sólido como uma placa plana de espessura $2L$ (avaliando a correspondente espessura equivalente), que somente ocorre à difusão unidirecional da água, a distribuição da umidade inicial é uniforme e a umidade da superfície esta em equilíbrio com as condições do ar, a solução analítica correspondente a equação diferencial de segunda ordem é (Crank, 1975):

$$X^* = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} e^{\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2} \right]} \quad (1)$$

O modelo exponencial, um modelo simples para simular cinéticas de secagem de alimentos, frequentemente é utilizado no ajuste dos dados experimentais as curvas de secagem (Senadeera *et al.*, 2003; Simal *et al.*, 2005). Este modelo baseia-se na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa, assumindo que na secagem as condições sejam isotérmicas e que a transferência de umidade se restrinja à superfície do produto (Junior & Corrêa, 1999), podendo ser escrito como:

$$X^* = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \exp(-kt) \quad (2)$$

2.4. Determinação Das Propriedades Químicas

A caracterização da matéria prima e a determinação das propriedades químicas ao final da secagem, foi realizada através de análises de umidade, teor de sólidos solúveis, pH e acidez titulável.

Umidade: O conteúdo de umidade das amostras foi determinado em triplicata, pelo método gravimétrico, em estufa (QUIMIS mod. 6317M-33) a 70 °C até a obtenção de peso constante, segundo metodologia modificada descrita pela AOAC (AOAC, 1995).

Teor de sólidos solúveis (°Brix): O teor de sólidos solúveis foi determinado em triplicata utilizando o Refratômetro (DIGIT mod. 2WJ) e corrigido em relação à temperatura de acordo com a metodologia descrita por Zenebon *et al.* (2008).

pH: O pH foi medido em triplicata, utilizando o pHmetro digital (MARCONI mod. PA200) em 8 a 10 g de amostra em 100 ml de água destilada em um Becker de 250 ml (Zenebon *et al.*, 2008).

Acidez titulável: A acidez titulável, expressa em g/100 g de ácido cítrico, foi determinada em

triplicata, de acordo com o método AOAC (1995), a titulação foi feita com solução de NaOH 0,1 M até o ponto de virada entre 8,2 e 8,4 de pH. Os ensaios foram conduzidos no pHmetro.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para cada temperatura de trabalho a média da temperatura de bulbo úmido dentro da estufa foi obtida para encontrar o valor da umidade relativa correspondente, através da carta psicrométrica. Assim para as temperaturas de secagem a 50, 60, 70 e 90 °C os valores médios da umidade relativa foram $59,9 \pm 3,7$; $47,8 \pm 3,3$; $40,6 \pm 1,3$ e $29,1 \pm 1,2$ %, respectivamente, diminuindo com o aumento da temperatura.

As cinéticas de secagem determinadas para as diferentes temperaturas de trabalho (50 a 90 °C) e velocidade do ar de 1,9 m/s, estão apresentadas na Figura 1, em o eixo das ordenadas é representado pela *driving force* $(X_t - X_e / X_0 - X_e)$ e o eixo das abscissas o tempo (t) em horas. Os valores de conteúdo de umidade de equilíbrio (X_e) utilizados para a representação das cinéticas e sua modelagem foram obtidos do estudo das isotermas de sorção do kiwi (Kaya *et al.*, 2007; SIMAL *et al.*, 2005). Na análise das curvas de secagem pode-se observar que no início do processo as curvas apresentam uma diminuição do conteúdo de umidade mais rápido (até 1h), após esse tempo, observa-se que para todas as temperaturas de trabalho, a secagem se torna mais lenta, apresentando um comportamento assintótico. Esse comportamento de diferença na velocidade da secagem no início e no final do processo foi observado por alguns autores na secagem de kiwi (Simal *et al.*, 2005; Kaya *et al.*, 2007). Um aumento na temperatura provocou uma diminuição no conteúdo de umidade das amostras. O efeito do aumento da temperatura na cinética de secagem convectiva de kiwi, também foi observado por Simal *et al.* (2005); Kaya *et al.* (2007). Cabe indicar que a secagem realizada a 50 °C provavelmente sofreu uma grande influencia da umidade relativa apresentando maior valor desta variável (59,9 %), bem como a secagem a 90 °C, que apresentou o menor valor desta variável (29,1 %). Já as cinéticas determinadas para as temperaturas de 50 °C e 60 °C foram realizadas em condições similares desta variável (47,8 % e 40,6 %, respectivamente). Para um estudo mais amplo da influencia da umidade relativa na cinética de secagem seria necessário que a estufa fosse adiabática.

A modelagem dos dados experimentais (representados por pontos) foi realizada pelos modelos exponencial e de Fick, Equações 1 e 2, respectivamente. O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o exponencial ($R^2 > 0,99$) (Figura 1), esse modelo também foi aplicado na secagem convectiva de kiwi (Simal *et al.*, 2005) bem como em diversos vegetais (Senadeera *et al.*, 2003). O estudo da modelagem de kiwi utilizando o modelo de Fick foi realizado por Simal *et al.* (2005). Esse modelo foi muito aplicado na secagem convectiva de castanha (Moreira *et al.*, 2011; Moreira *et al.*, 2008), pera (Guiné *et al.*, 2007) e uva (Gabas *et al.*, 1999) sua aplicação permite obter os valores de coeficiente de difusão efetivo.

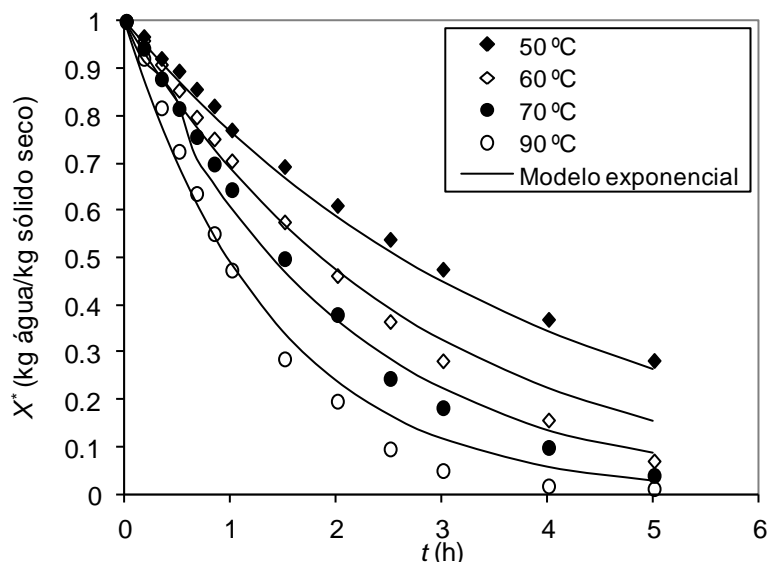


Figura 1. Cinéticas de secagem do kiwi a 50, 60, 70 e 90 °C.

Os valores dos coeficientes de difusão (D_{eff}), que foram obtidos pela aplicação do modelo de Fick (Equação 2), estão apresentados na Tabela . Os coeficientes de difusão aumentaram com a temperatura, refletindo a maior transferência de massa e calor como a aumento dessa variável, corroborando os dados das curvas de secagem anteriormente apresentados. Comportamento similar foi observado por Simal *et al.* (2005) na secagem do kiwi em temperaturas variando de 30 a 90 °C. Os valores D_{eff} reportados por esses autores nas mesmas temperaturas (50, 60, 70 e 90 °C) foram significativamente maiores (variando entre $7,13 \cdot 10^{-10}$ – $17,21 \cdot 10^{-10}$ m²/s) comparados a esse trabalho. Essa diferença provavelmente se deve a diferença de geometria entre as amostras, assim mesmo, os coeficientes de difusão estão na mesma ordem.

Tabela 1 - Coeficientes de difusão modelo exponencial.

Fick	
T (°C)	$D_{eff} \cdot 10^{-10}$ (m ² /s)
50	$1,94 \pm 0,59$
60	$3,06 \pm 0,57$
70	$4,17 \pm 0,32$
90	$6,94 \pm 0,10$

A dependência do coeficiente de difusão efetivo da água (D_{eff}) com a temperatura é conhecida e frequentemente é relacionada por expressão exponencial (Equação 3) em que pode ser baseada em uma equação do tipo *Arrhenius*, sendo possível obter a energia de ativação (E_a) e uma constante pré-exponencial independente da temperatura (D_o).

$$D_{eff} = D_o \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

A correlação do tipo exponencial foi aplicada para verificar a dependência do coeficiente de difusão com a temperatura no processo de secagem do kiwi (Simal *et al.*, 2005). Os parâmetros resultantes do ajuste dos dados da difusividade efetiva com a temperatura são apresentados na Tabela 2. Os valores de energia de ativação (27,7 kJ/mol) e a constante pré-exponencial ($14,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) encontrados por Simal *et al* (2005) foram similares aos valores reportados na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação exponencial do Deff com a temperatura

	$D_o \cdot 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s)}$	$E_a \text{ (kJ/mol)}$	R^2
Fick	17,61	30,49	0,98

As propriedades químicas (conteúdo de umidade em base úmida, pH, acidez titulável expressa em quantidade de ácido cítrico e sólidos solúveis expressos por °Brix) da amostra fresca e das amostras que foram secas a 50, 60 e 70 °C podem ser observadas através da Tabela 3. Os valores de umidade da amostra fresca estiveram próximos aos valores reportados por outros autores (Kaya *et al.*, 2007; Gerschenson *et al.*, 2001). Já os valores de pH foram ligeiramente superiores aos valores reportados para kiwi fresco por Castaldo *et al.* (1992); Buchweitz (2005) (valores em torno de 3,21-3,31) em decorrência deste comportamento, os valores de acidez titulável (expresso em ácido cítrico) foram ligeiramente inferiores aos valores reportados pelos mesmos autores. Já os valores de sólidos solúveis foram similares ao encontrados por outros autores, que observaram valores ao redor de 14 ° Brix (Castaldo *et al.*, 1992; Buchweit, 2005; Gerschenson *et al.*, 2001). Após a secagem, o conteúdo de umidade diminuiu, o pH se manteve similar ao da amostra fresca e os valores de acidez titulável e sólidos solúveis aumentaram. Sendo assim, a processo de secagem produziu alterações nas propriedades químicas do kiwi.

Tabela 3 - Propriedades químicas do kiwi.

T °C	X % (kg água/kg sólido úmido.)	pH	Acidez titulável (g/100 g)*	S.S (°Brix)
Fresca	84,80 ± 0,82	3,7 ± 0,1	0,97 ± 0,06	13,1 ± 1,0
50	44,19 ± 0,55	3,7 ± 0,1	4,87 ± 0,14	14,1 ± 0,2
60	37,02 ± 0,63	3,6 ± 0,1	5,38 ± 0,30	14,9 ± 0,5
70	18,73 ± 0,42	3,8 ± 0,1	4,81 ± 0,09	14,7 ± 0,2

* Expresso em (g/100 g) de ácido cítrico.

4. CONCLUSÕES

As curvas de secagem apresentaram comportamento cinético característico, com maior

velocidade de eliminação de água no início do processo, seguida de uma redução da velocidade de secagem. Um aumento da temperatura de secagem produziu uma aceleração na cinética de secagem, obtendo valores de conteúdo de umidade menores quanto maior a temperatura empregada. O modelo exponencial ajustou melhor os dados experimentais de secagem ($R^2 > 0,99$) e o modelo de Fick, permitiu determinar os coeficientes de difusão efetivo ($1,94-6,94 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$). Os valores dos coeficientes de difusão aumentaram com a temperatura e foram da mesma ordem dos reportados por outros autores. A dependência do coeficiente de difusão efetivo da água com a temperatura foi relacionada através de uma expressão exponencial, permitindo obter o valor de energia de ativação, que foi similar ao de outros autores.

O processo de secagem produziu alterações nas propriedades químicas do kiwi, reduzindo o valor de conteúdo de umidade e aumentando os valores de acidez titulável e sólidos solúveis, já os valores de pH foram similares ao kiwi fresco.

5. NOMENCLATURA

D_{eff}	Coeficiente de difusão efetiva	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
D_o	Constante pré-exponencial	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
E_a	Energia de ativação	$[\text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1}]$
L	Meia-espessura do sólido	$[\text{m}]$
R	Constante dos gases	$[\text{KJ} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
T	Temperatura	$[^{\circ}\text{C}]$ ou $[\text{K}]$
t	Tempo	$[\text{s}]$ ou $[\text{h}]$
X	Conteúdo de umidade	$[\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg sólido seco}^{-1}]$ ou $[\text{kg H}_2\text{O} \cdot \text{kg sólido úmido}^{-1}]$
X^*	Driving force	adimensional

Sub-símbolo

e	Equilíbrio
o	Inicial
t	Instante t

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC - Association of Official Analytical Chemists. *Official methods of analysis*. 1995.
- ATARÉS, L.; SOUSA-GALLAGHER, M.J.; OLIVEIRA, F.A.R. Process conditions effect on the quality of banana osmotically dehydrated. *J. Food Eng.*, v. 103, p. 401–408, 2011.
- BUCHWEITZ, P. R. *Avaliação da pré-secagem osmótica de kiwi (Actinidia deliciosa) complementada por processos convencionais*. Tese de Doutorado. UNICAMP, Campinas. 2005.
- CASTALDO, D.; VOI, A. L.; TRIFIRO, A.; GHERARDI, S. Composition of italian kiwi (*Actinidia chinensis*) puree. *J. Agr. Food Chem.*, v. 40, p. 594-598, 1992.

CRANK, J. *The mathematics of diffusion*. Oxford. Claredon Press. 1975.

DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of thin layer carrots. *J. Food Eng.*, v. 61, p. 359-364, 2004.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2011. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/faostatgateway/go/to/download/Q/QI/E>>. Acesso em: 02/01/2014.

GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; TELIS-ROMERO, J. Effect of chemical pretreatment on the physical properties of dehydrated grapes. *Dry. Technol.*, v. 17, p. 1215-1226, 1999.

GERSCHENSON, L.N.; ROJAS, A.M.; MARANGONI, A.G. Effects of processing on kiwi fruit dynamic rheological behavior and tissue structure. *Food Res. Int.*, v. 34, p. 1-6, 2001.

GUINÉ, R.P.F.; RODRIGUES, A.E.; FIGUEIREDO, M.M. Modelling and simulation of pear drying. *App. Math. Comp.*, v. 192, p. 69-77, 2007.

JUNIOR, P. C. A.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. *Rev. Bra. Eng. Agr. Amb.*, v. 3, p. 349-353, 1999.

KAYA, A.; AYDIN, O.; DINCER, I. Heat and mass transfer modeling of recirculating flows during air drying of moist objects for various dryer configurations. *Num. Heat Trans. Part A: App. Int. J. Comp. and Meth.*, v. 53, p. 18-34, 2007.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; CHAGURI, L; VAZQUEZ, G. Air drying and colour characteristics of chestnuts pre-submitted to osmotic dehydration with sodium chloride. *Food Bio. Process.*, v. 89, p.109-115, 2011.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; CHAGURI, L; FERNANDES, C. Diffusion of Water in Chestnut Fruits during Drying and Rehydration Processes at Different Temperatures. *Def. Diff. Forum*, v. 273-276, p.758-763, 2008.

PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. *Basic process calculations in drying. Handbook of industrial drying*. Nova York. Marcel Dekker. 1995.

SENADEERA, W.; BHANDARI, B.R.; YOUNG, G.; WIJESINGHE, B. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. *J. Food Eng.*, vol 58, p. 277-283, 2003.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M.C.; ROSSELLÓ, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. *J. Food Eng.*, v. 66, p. 323-328, 2005.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: Principles, applications and design*. Montreal. Gordon and Breach Science Publishers, SA. 1996.

TRICHES, D; SEBBEN, M. *Análise da cultura do kiwi e seu papel para o desenvolvimento da região de Farroupilha RS – 1990/2000*. Rio Grande do Sul. 2004. Disponível em: http://www.ucs.br/site/midia/arquivos/IPES_TS_012_NOV_2004.pdf Acesso em 15/01/2014.

ZENEBO, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. *Métodos físico-químicos para análise de alimentos*. São Paulo. Instituto Adolfo Lutz. 2008.