

INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PROCESSO SOBRE A SECAGEM OSMO-CONVECTIVA DE PIMENTÃO VERDE

RESUMO

O pimentão é uma fruta de clima tropical rica em constituintes benéficos na dieta humana. Sua coloração brilhante e seu sabor pungente são atrativos em diversas formulações de alimentos. Porém, apresenta uma vida útil muito curta, devido ao seu alto conteúdo de umidade. A desidratação osmótica seguida da secagem convencional é uma técnica que confere o aumento da vida de prateleira deste produto. O presente manuscrito teve por objetivo avaliar o efeito das variáveis de processo, entre elas da desidratação osmótica (DO) – tempo de contato, concentração e temperatura da solução – e da temperatura do ar de secagem sobre a cinética de secagem convectiva de fatias de pimentão verde. Foi proposto um planejamento experimental fatorial, com três pontos centrais, combinado com a metodologia de superfície de resposta. A solução osmótica foi preparada com sal, açúcar e água destilada em proporções pré-definidas e na secagem convectiva foi utilizada uma estufa de circulação forçada. A cinética de secagem foi ajustada pelos modelos teórico da segunda lei de Fick e empírico de Page. A avaliação estatística dos modelos empregados sugere que o modelo de Page foi o que melhor descreveu a cinética de secagem. Pelo delineamento fatorial foi possível observar que somente o efeito linear da temperatura do ar de secagem teve efeito significativo ($p \leq 0,05$) sobre a difusividade efetiva e o parâmetro “n” da equação de Page, enquanto que a constante “k” deste último modelo, não apresentou uma tendência definida em função das variáveis de processo.

PALAVRAS-CHAVE: Produção agrícola. Secagem. Convencional. Desidratação osmótica, Parâmetros cinéticos. Delineamento experimental.

Tales Prado Alves

talles_pa@hotmail.com

Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Apucarana, Paraná, Brasil.

Joel Fernando Nicoleti

nicoleti@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná UTFPR, Apucarana, Paraná, Brasil.

INTRODUÇÃO

O Brasil é favorecido pelo seu clima e solo, fatores estes que contribuem com a produção agrícola, garantindo desta forma um grande volume na produção de frutas e vegetais, que em combinação com as tecnologias agrícolas empregadas no cultivo garantem produtos de alta qualidade e uma cultura bastante diversificada. Se por um lado a grande produção é interessante para suprir a demanda interna do consumo do alimento fresco, por outro, pode haver um aumento da produção excedente, levando a um desperdício. As perdas de alimentos ainda podem ser agravadas devido à alta perecibilidade das frutas e hortaliças in natura, além das técnicas inadequadas de colheita e pós-colheita.

O pimentão é uma fruta de clima tropical rica em constituintes benéficos na dieta humana, sendo fonte de diversos nutrientes, entre eles minerais, fibras e vitaminas, além de proporcionar cor, aroma e sabor em diversas formulações de alimentos. Porém, o pimentão in natura, apresenta uma vida útil muito curta, devido ao seu alto conteúdo de umidade e alta atividade de água que favorece sua rápida deterioração por micro-organismos e reações deterioradoras como químicas e enzimáticas. Contudo, frutos como o pimentão podem ser secos com o propósito de estender sua vida de prateleira, reduzindo assim desperdícios da produção excedente. Além disso, a secagem das frutas apresenta vantagens adicionais, como a elaboração de um produto com maior valor agregado e redução de peso e volume, implicando em menor necessidade de espaços para o transporte, armazenamento, e redução nos custos com embalagem (CAMARGO, 2007; RAUPP, 2009).

A secagem de alimentos é uma operação unitária que visa, além de diversificar e modificar os produtos já disponíveis, estender a vida de prateleira, disponibilizando, desta forma, um alimento com suas características preservadas por um longo período de tempo, ainda que armazenado sob temperatura ambiente, sendo este outro grande atrativo em obter alimentos secos por implicar na redução de custos energéticos, já que não há necessidade de serem conservados pelo frio. Com essa técnica já são elaborados produtos de alta qualidade para exportação como tâmaras e uva passa (GOMES et al., 2007).

A pesar da contribuição positiva da secagem que visa diminuir a atividade de água do alimento e, desta forma, disponibilizar um produto seguro ao consumidor, também contribui de forma negativa para a qualidade nos aspectos sensorial e nutricional, como a caramelização de açúcares, reações enzimáticas e degradação da pigmentação, além de causar prejuízos às propriedades de reidratação e perdas de vitaminas. Esses efeitos negativos estão relacionados diretamente com o processo de secagem o qual depende da temperatura, tempo e conteúdo de umidade do alimento. O controle desses parâmetros pode ser conseguido com a obtenção da cinética de secagem, sendo que os dados da cinética são úteis na seleção das condições ideais de processamento, contribuindo para a melhoria da qualidade do produto final.

Diversas investigações sugerem a desidratação osmótica (DO), que consiste na imersão de um alimento sólido em uma solução com alta concentração de substâncias solúveis como açúcares e sais, como um pré-tratamento ao processo de secagem convencional a ar quente por minimizar as injúrias térmicas e reduzir previamente o teor de água do alimento, contribuindo desta forma na redução de

tempo e custos energéticos na secagem seguinte, além de melhorias na textura, coloração e capacidade de reidratação.

O presente manuscrito teve por objetivo avaliar o efeito das variáveis de processo, entre elas da desidratação osmótica (DO) – tempo de contato, concentração e temperatura da solução – e da temperatura do ar de secagem sobre a cinética de secagem convectiva de fatias de pimentão verde, verificando o grau de significância dos parâmetros cinéticos sobre estas variáveis independentes empregadas por meio de metodologia de superfície de resposta.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados pimentões verdes (*Capsicum annuum* L.) adquiridos no mercado local poucas horas antes do processamento. A seleção dos pimentões foi realizada visualmente, dando preferência aos frutos sadios, sem injúrias em sua superfície, de coloração uniforme e de textura firme.

Foi proposto um planejamento fatorial 24, com três pontos centrais, totalizando 19 condições experimentais, considerando três variáveis codificadas (-1, 0, +1) e quatro variáveis reais independentes (BOX et al., 1978) que foram a temperatura da solução osmótica (TDO) com limite inferior de 30 °C e superior de 50 °C, concentração da solução osmótica (CDO) de 40 a 70 % (p/p), tempo de contato (tDO) entre 1 e 3 h com a solução e temperatura do ar de secagem (TAR) entre 40 e 70 °C.

Para os ensaios de DO, os pimentões inicialmente foram cortados em três ou quatro partes no sentido longitudinal, descartando o pedúnculo e as sementes. Em seguida, as espessuras das fatias foram tomadas com auxílio de um paquímetro. As fatias foram higienizadas com detergente e hipoclorito. Após a higienização, as fatias foram secas em papel absorvente para seguir à DO.

As soluções osmóticas foram preparadas com cloreto de sódio e sacarose, ambos de grau alimentício, a concentração foi fixada nas proporções de alimento/solução e sal/sacarose em 1:10 e 1:6 (p/p), respectivamente, empregando água destilada. As fatias de pimentão verde e a solução osmótica nas proporções pré-estabelecidas, foram inseridas em elernmeyers de 250 ml, para em seguida, serem fixados no interior de uma incubadora “shaker” (Marconi, MA 420-E) com temperatura controlada e agitação orbital fixada em 250 rpm.

Após a desidratação osmótica, estas amostras foram lavadas em água corrente para remoção de sólidos que pudessem estar em sua superfície e enxugadas em papel absorvente. Para a secagem convectiva, as fatias foram dispostas sobre bandejas perfuradas de aço inoxidável e levadas à estufa de circulação forçada (Solab, SL-102) juntamente com as amostras padrão (pimentão in natura). Em tempos consecutivos, as bandejas foram pesadas para o posterior cálculo do teor de umidade e construção das curvas de cinética de secagem. A determinação do conteúdo de umidade inicial das amostras foi realizada na mesma estufa, a 105 °C por 4 horas (AOAC, 1997).

Foram empregados dois modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem, considerando a solução analítica baseada na segunda Lei de Fick (Eq. 1) (CRANK, 1975) e o modelo empírico de Page (Eq. 2):

$$RU = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} \exp\left[-(2n-1)^2 \frac{\pi^2 D_{eff} t}{4L^2}\right]$$

(Eq. 1)

onde $RU = [(X(t) - X_{eq}) / (X_0 - X_{eq})]$ é razão de umidade em base seca (b.s.), $X(t)$ a umidade do sólido em função do tempo (b.s.), X_{eq} a umidade de equilíbrio (b.s.), X_0 a umidade inicial (b.s.), D_{eff} a difusividade efetiva, t o tempo e L a espessura da amostra.

A equação (1) leva em consideração a secagem por apenas uma das faces devido à existência de uma camada superficial serosa encontrada na pele do pimentão, que dificulta a transferência de massa por este lado. Ajustes preliminares do modelo aos dados experimentais, por apenas um lado, confirmaram melhores resultados comparado com a solução analítica obtida para a secagem por ambas as faces.

O modelo de Page (Eq. 2) é constantemente usado nos estudos de secagem de produtos agrícolas e alimentos com excelentes resultados (PARTI, 1998):

$$RU = \exp(-k t^n)$$

(Eq. 2)

onde RU é a razão de umidade (b.s.), k e n constantes da equação e t o tempo.

Para avaliação da qualidade dos ajustes dos modelos foram considerados o coeficiente de determinação (R^2), erro relativo médio (MRE) (Eq. 3) e raiz quadrada do erro médio (RMSE) (Eq. 4).

$$MRE = \frac{100}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{|X_e - X_t|}{X_e}$$

(Eq. 3)

$$RMSE = 100 \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_e - X_t)^2]}{N}}$$

(Eq. 4)

onde que X_t representa os valores teóricos, X_e os valores experimentais e N o número total pontos experimentais.

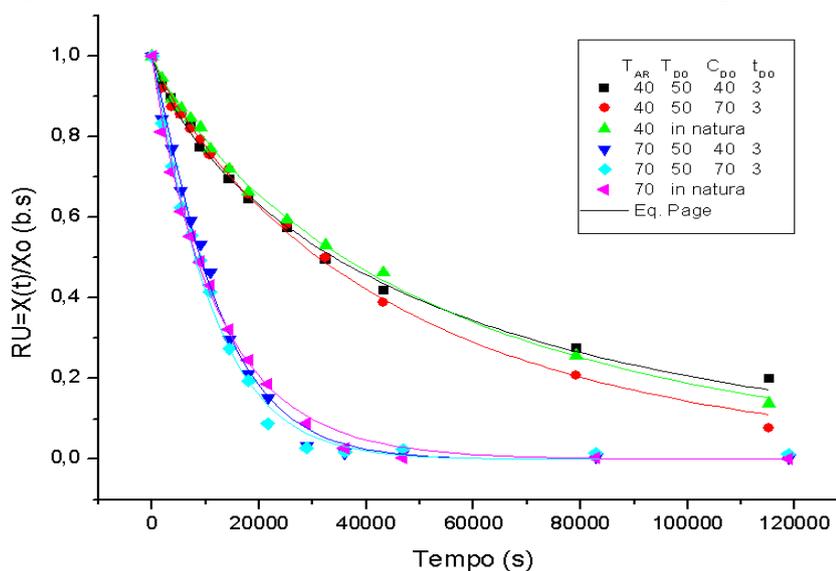
Para verificar o efeito das variáveis independentes do processo (TAR, TDO, CDO e tDO) sobre os parâmetros cinéticos avaliou-se os resultados por análise de

variância (ANOVA) considerando os efeitos significativos ($p \leq 0,05$) e pela metodologia de superfícies de resposta empregando o software Statística 7.0.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as cinéticas de secagem do fruto de pimentão verde pré-tratados por solução osmótica, comparando-as com as curvas obtidas para a amostra in natura. Pode-se observar que a temperatura do ar de secagem tem forte influência no tempo de redução do teor de umidade. Em temperaturas superiores, há uma queda bastante acentuada na umidade adimensional (RU), um indicativo do aumento da força motriz de transferência de massa em temperaturas mais elevadas.

Figura 1 – Efeito da concentração da solução osmótica (CDO), considerando a temperatura (TDO) da solução de 50 °C e tempo de contato (tDO) com a solução de 3 h, sobre a cinética de secagem de fatias de pimentão verde nas temperaturas do ar de secagem de 40 e 70 °C.



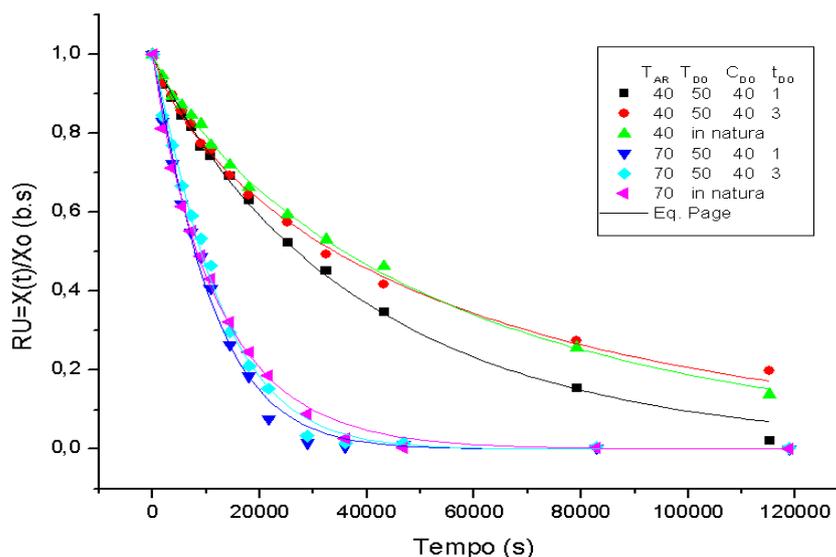
Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O pré-tratamento osmótico, considerando o efeito da concentração da solução (CDO) – Figura 1 –, do tempo de contato (tDO) da solução com o fruto – Figura 2 – e da temperatura da solução osmótica (TDO) – Figura 3 – tem seu efeito mais pronunciado a partir de 10000 s após o início da secagem para os ensaios conduzidos em temperatura do ar de 70 °C, verificado pelo abaixamento das curvas de cinética, após este tempo, comparada à cinética de secagem observada para o pimentão fresco. Por outro lado, na temperatura do ar mais branda de secagem (40 °C), o tratamento osmótico parece influenciar na cinética de secagem após 20000 s ao início da operação, observando a partir deste tempo o espaçamento entre as curvas que descrevem o decaimento da umidade adimensional em função do tempo.

Uma avaliação mais criteriosa na Figura 1 nota-se que na temperatura do ar de secagem mais branda (40 °C), não observa-se diferença entre as curvas de cinética comparando o produto in natura com aquele pré-tratado pela solução osmótica em concentração de 40% (p/p), sendo o efeito desta variável observado ao aumentar a concentração da DO para 70% (p/p). Para a temperatura do ar de 70

°C, em ambas condições de concentração, houve uma contribuição para o aumento do potencial de secagem após os 10000 s em relação à curva de secagem do pimentão fresco. Moura (2004) observou que o aumento da concentração da solução osmótica eleva a incorporação de sólidos e, conseqüentemente, maior resistência à retirada de água durante a secagem convectiva. Por outro lado, Gonçalves e Blume (2008) observaram uma redução do tempo de secagem de abacaxi com o aumento da concentração da solução osmótica.

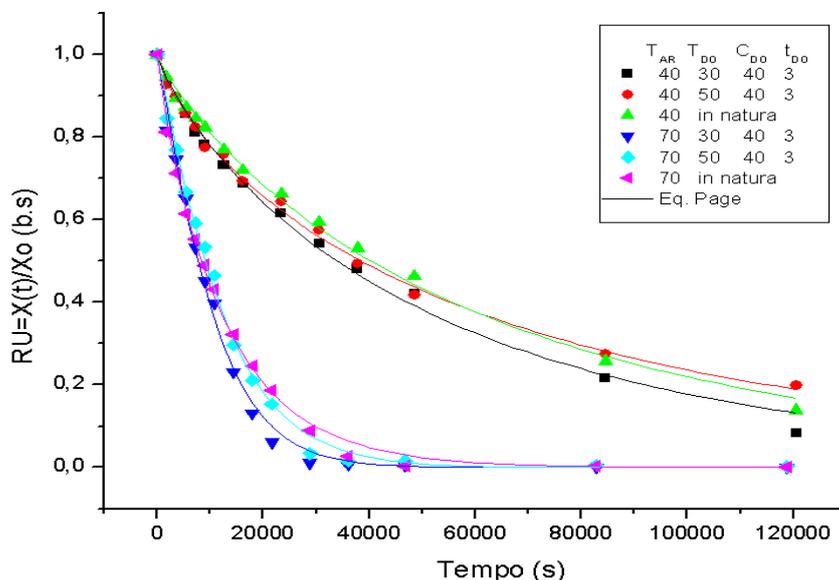
Figura 2 – Efeito do tempo de contato (tDO) com a solução, considerando a temperatura (TDO) da solução de 50 °C e a concentração da solução (CDO) de 40% (p/p), sobre a cinética de secagem de fatias de pimentão verde nas temperaturas do ar de secagem de 40 e 70 °C



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Os efeitos da temperatura da solução osmótica (TDO) e do tempo de contato (tDO) sobre a cinética de secagem tiveram resultados similares conforme ilustram as Figuras 2 e 3, respectivamente. Resultados demonstram que o tempo de 1h de contato do fruto com a solução osmótica favorece a cinética de secagem, por outro lado, com o tempo de contato superior (3 h), este resultado se inverteu. Em temperatura da DO mais baixa (30 °C), também observa-se um maior potencial de secagem, enquanto que em temperatura da solução mais elevada (50 °C), o comportamento é contrário, dificultando a remoção de umidade no interior das amostras representada pela aproximação da curva de cinética nesta condição mais extrema da curva característica do produto in natura. A maior incorporação de sólidos na matriz alimentícia pode ter dificultado a remoção de umidade. De acordo com Kotovicz (2011), a incorporação dos sólidos oferece maior resistência à retirada de água durante a secagem convectiva. É importante citar que o ganho de sólidos é maior com o passar do tempo e em temperaturas mais altas da solução, até se atingir o equilíbrio, onde não se observa mais o ganho de solutos, portanto, quanto menores essa temperatura e o tempo de contato, as alterações estruturais do produto serão menos sentidas (MOURA, 2004; KOWALSKA e LENART, 2001).

Figura 3 – Efeito da temperatura da solução osmótica (TDO), considerando o tempo de contato com a solução (tDO) de 3 h e a concentração da solução (CDO) de 40% (p/p), sobre a cinética de secagem de fatias de pimentão verde nas temperaturas do ar de secagem de 40 e 70 °C



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Diversos autores verificaram que o aumento da temperatura da solução osmótica contribui com a perda de umidade e com o ganho de sólidos na matriz alimentícia no processo de desidratação osmótica, possivelmente pela redução da viscosidade da solução de sacarose e perda da seletividade dos tecidos celulares (HOYI e HESARI, 2007; ISPIR e TOGRUL, 2009; EREN e KAYMAK-ERTEKIN, 2007). Essa secagem mais lenta nas amostras pré-tratadas em temperatura da DO mais alta pode ser explicada pela dificuldade da migração interna da água até a superfície do alimento devido ao aumento da incorporação de sólidos no pré-tratamento, ou pela maior austeridade da superfície do produto devido ao endurecimento e a possível caramelização superficial de açúcares que dificultam a eliminação da água no processo de secagem. Segundo Vasconcelos (2010), a temperatura da DO é o fator de maior influência na desidratação osmótica por aumentar a taxa de transferência de massa, modificar as propriedades da solução e do produto.

Em relação aos modelos matemáticos ajustados à cinética de secagem osmoconvectiva de fatias de pimentão verde, a Tabela 1 traz os valores obtidos para a difusividade efetiva ($Deff$) e os respectivos valores de R^2 , MRE e RMSE obtidos como parâmetro de qualidade estatística.

Observa-se que apesar dos coeficientes de correlação (R^2) serem superiores a 0,93, a avaliação dos demais fatores estatísticos apresentam desvios consideráveis. Possivelmente a discrepância se dá pelas considerações para obtenção da solução analítica da 2ª Lei de Fick em assumir a difusividade como um parâmetro constante e negligenciar o fenômeno de encolhimento durante o processo.

Comparando-se os valores da difusividade efetiva ($Deff$) do pimentão in natura com os das amostras pré-tratadas em solução osmótica, em uma temperatura fixa, de certa forma observa-se uma diminuição em $Deff$ na temperatura de 40 °C para as fatias de pimentão pré-tratadas, enquanto que nas temperaturas de secagem de 55 e 70 °C, o resultado foi

contrário, observado pela a elevação de D_{eff} quando as fatias passaram pelo pré-tratamento osmótico.

Tabela 1 – Difusividade efetiva da água em função das variáveis de processo e os respectivos valores de R^2 , RME e RMSE.

Difusividade efetiva da água em função das variáveis de processo e os respectivos valores de R^2 , RME e RMSE								
Espessura (mm)	T_{AR} (°C)	T_{DO} (°C)	t_{DO} (h)	C_{DO} (m/m)	D_{eff} ($m^2 \cdot s^{-1}$) 10^{10}	R^2	MRE%	RMSE%
5,11±0,3	40				1,3655	0,934	86,75	156,15
4,06±0,5	55				2,5188	0,971	30,74	57,15
4,73±0,1	70				6,5675	0,985	234,54	510,64
<i>In natura</i>								
5,19±0,4	40	30	1	40	1,1689	0,965	28,26	54,20
4,87±0,1	40	30	3	40	1,2336	0,972	27,02	52,10
4,89±0,1	40	30	1	70	0,9483	0,966	19,80	33,53
5,49±0,9	40	30	3	70	0,9758	0,966	25,29	42,90
4,66±0,5	40	50	1	40	1,2990	0,968	20,36	38,45
4,78±1,5	40	50	3	40	1,7300	0,976	17,71	26,25
4,39±0,4	40	50	1	70	1,2760	0,977	16,14	28,28
5,23±0,3	40	50	3	70	1,4890	0,966	39,28	86,19
4,82±1,1	55	40	2	55	2,7090	0,977	35,70	73,89
4,54±1,8	55	40	2	55	2,5380	0,980	10,64	33,57
5,14±0,6	55	40	2	55	2,9620	0,991	32,36	49,63
4,70±0,1	70	30	1	40	6,7433	0,963	246,78	469,35
4,59±0,1	70	30	3	40	7,1267	0,957	397,92	756,08
4,56±0,8	70	30	1	70	7,1842	0,987	251,64	457,25
4,66±0,3	70	30	3	70	7,8425	0,966	333,80	822,93
4,81±0,3	70	50	1	40	6,1900	0,965	553,36	1042,00
5,10±0,3	70	50	3	40	5,6650	0,959	316,00	930,95
4,78±0,2	70	50	1	70	5,2890	0,937	826,85	1689,30
4,98±0,1	70	50	3	70	7,5635	0,967	155,33	287,52

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Antonio (2006), relata que valores mais elevados de difusividade efetiva foram obtidos para amostras de batata doce *in natura*. Esse comportamento é explicado pela diminuição do coeficiente de difusão em função do ganho de sólidos ocorrido durante pré-tratamento osmótico que formam uma barreira à remoção de umidade.

Os valores da difusividade (D_{eff}) obtidos nesse trabalho estão próximos aos relatados por Oliveira et al. (2006) na secagem de raiz de chicória, que obtiveram coeficientes que variaram de $3,51 \times 10^{-10}$ e $10,36 \times 10^{-11} m^2 s^{-1}$. Os autores concluíram ainda que somente a temperatura do ar de secagem foi significativa ($p \leq 0,05$) dentre as variáveis estudadas. Oliveira et al. (2005), na secagem de caju em secador convencional, encontraram valores para o mesmo coeficiente entre $1,71 \times 10^{-9}$ e $8,85 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$. Park et al. (2002) obtiveram valores de difusividade efetiva entre $6,719 \times 10^{-9}$ e $1,37 \times 10^{-9} m^2 s^{-1}$ na secagem de pêra em secador convencional. Santos et al. (2010), ao aplicarem a solução analítica da 2ª Lei de Fick na cinética de secagem de carambola, concluíram que a difusividade da água, no decorrer da secagem, aumentou com a elevação da temperatura. Córdova (2006) encontrou em seu trabalho coeficientes de difusão, na secagem de maçã, que variaram de $5,1 \times 10^{-10}$ a $5,6 \times 10^{-10} m^2 s^{-1}$.

Analisando a Tabela 1, pode-se notar uma tendência dos valores da difusividade efetiva aumentar com a temperatura do ar de secagem, entretanto, a maior

temperatura de secagem contribuiu com o aumento dos desvios estatísticos. Esse incremento nos erros pode ser efeito do enrijecimento da superfície e a caramelização de açúcares e colapso estruturais que interferem diretamente na difusividade da água em meio sólido.

O efeito das variáveis independentes (TAR, TDO, CDO, tDO) sobre a difusividade efetiva foi avaliado por meio da superfície de resposta, aplicando análise de variância (ANOVA) com significância de 95% ($p \leq 0,05$). Somente o efeito linear da temperatura do ar foi significativo ($p \leq 0,05$) sobre os valores da difusividade efetiva. O modelo matemático que descreve o comportamento da difusividade efetiva em função da temperatura do ar de secagem (TAR), calculado pelo software, é representado pela Eq. 5, desconsiderando o efeito das demais variáveis independentes (TDO, CDO, tDO) por não apresentarem resultados significativos ($p \leq 0,05$).

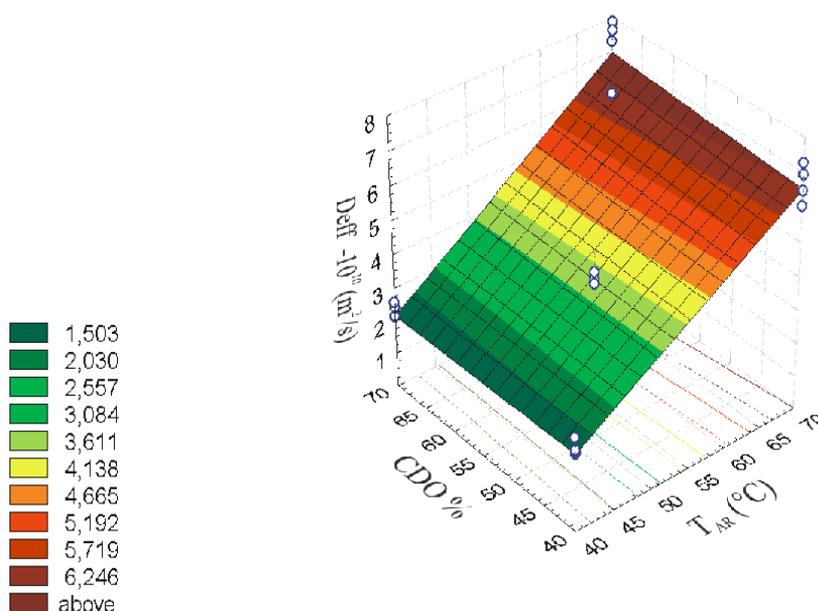
$$D_{eff} = -6,0998 \times 10^{-10} + 0,2141 \times 10^{-10} \times T_{AR}$$

(Eq. 5)

onde T está em °C e Deff em (m²s⁻¹).

De forma ilustrativa, a Figura 4 apresenta a superfície de resposta da difusividade efetiva em função da TAR e CDO. Como esperado pelos resultados da ANOVA, observa-se somente o efeito da temperatura do ar sobre a difusividade efetiva, evidenciando pelo aumento dos valores conforme a temperatura é aumentada.

Figura 4 – Superfície de resposta para difusividade efetiva de fatias de pimentão verde em função da temperatura do ar e concentração da solução osmótica



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Na Tabela 2 estão representados os valores dos parâmetros “n” e “k” do modelo de Page e seus respectivos R², MRE e RMSE como resultado da qualidade do ajuste da equação (2), que comprovam melhores valores quando comparado com o ajuste da solução analítica da 2ª Lei de Fick (Eq. 1).

Tabela 2 – Parâmetros da equação de Page (k e n) em função das variáveis de processo e os respectivos valores de R², RME e RMSE.

Parâmetros da equação de Page (k e n) em função das variáveis de processo e os respectivos valores de R ² , RME e RMSE								
T _{AR} (°C)	T _{DO} (°C)	t _{DO} (h)	C _{DO} (m/m)	Parâmetros - Page		R ²	MRE%	RMS%
				Kx10 ⁴	n			
40	<i>In natura</i>			0,2	0,9980	0,993	89,28	148,80
55				0,8	0,9133	0,995	62,10	392,12
70				1,6	0,9279	0,996	253,33	572,71
40	30	1	0,8644	0,8	0,8644	0,998	1,16	5,95
40	30	3	0,8333	1,2	0,8333	0,997	1,9	8,43
40	30	1	0,8284	1,1	0,8284	0,998	4,19	5,70
40	30	3	0,8251	1,1	0,8251	0,998	1,73	4,40
40	50	1	0,8660	0,9	0,8660	0,999	2,32	3,51
40	50	3	0,8249	1,5	0,8249	0,999	1,86	2,66
40	50	1	0,8207	1,4	0,8207	0,998	2,3	4,41
40	50	3	0,8872	0,7	0,8872	0,996	6,48	17,55
55	40	2	0,8943	1,2	0,8943	0,997	1,73	2,38
55	40	2	0,7852	2,7	0,7852	0,998	1,1	1,43
55	40	2	0,7192	6,5	0,7192	0,996	2,17	2,86
70	30	1	1,1005	0,3	1,1005	0,997	37,07	74,21
70	30	3	1,1685	0,2	1,1685	0,994	36,31	72,31
70	30	1	0,9279	1,9	0,9279	0,998	19,53	40,74
70	30	3	1,0908	0,4	1,0908	0,998	32,15	65,03
70	50	1	1,0898	0,4	1,0898	0,994	55,14	106,90
70	50	3	1,1254	0,2	1,1254	0,995	66,67	116,6
70	50	1	1,3024	0,05	1,3024	0,995	43,69	100,40
70	50	3	1,0918	0,4	1,0918	0,994	31,2	47,89

Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

O parâmetro K da equação de Page não apresentou uma tendência definida, evidenciado pelos resultados obtidos pela análise de variância, sendo que nenhuma das variáveis independentes avaliada teve efeito significativo sobre seus valores ($p \leq 0,05$). Em relação ao parâmetro n, somente o efeito linear da temperatura do ar apresentou significância de 95%..

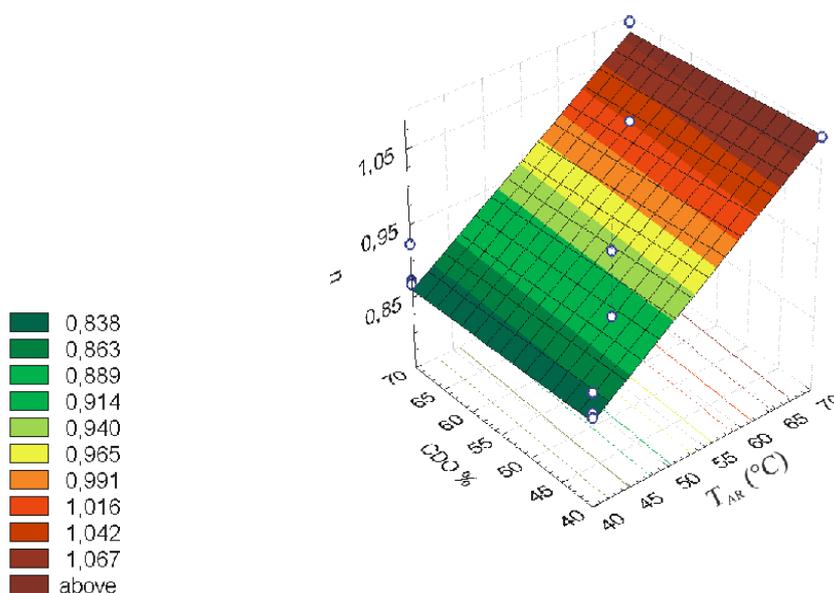
A equação que descreve o comportamento do parâmetro n, considerando somente o fator significativo da temperatura do ar, é apresentada pela Equação 6, com a TAR em °C.

$$n = -0,895 + 0,000451 \times T_{AR}$$

(Eq. 6)

A superfície de resposta para o parâmetro n, fornecida pelo software Statistica 7.0, está representada pela na Figura 5, em função das variáveis (TAR) e (CDO). Pode-se observar que o parâmetro n tem um aumento somente com a elevação da temperatura do ar de secagem (TAR).

Figura 5 – Superfície de resposta para parâmetro n do modelo de Page em função da temperatura do ar e concentração da solução osmótica



Fonte: Elaborado pelo autor (2014).

Segundo Madureira et al. (2011), os parâmetros “k” e “n” da equação de Page aumentam com a elevação da temperatura. Melo (2008), ao estudar a secagem da polpa do fruto do mandacaru e Hii et al. (2009) na secagem de grãos de cacau, verificaram que o parâmetro k aumentou e o n diminuiu com o aumento da temperatura.

Oliveira et al. (2006) ajustaram o modelo de Page e Fick na secagem de raiz de chicória e concluíram que o modelo de Page se ajustou melhor aos dados experimentais. Madureira et al. (2011), também encontraram que os parâmetros de qualidades encontrados para o modelo de Page foram superiores aos resultados obtidos na secagem de polpa de figo-da-índia. O mesmo fato foi observado por Reis et al. (2011), na secagem de pimenta cumari, verificando que a equação Page proporcionou os melhores ajustes comprovados pelos valores de R² acima de 0,99. Resultados diferentes foram observados por Santos et al. (2012), na secagem de pimenta malagueta, onde os melhores ajustes foram obtidos pela solução analítica de Fick.

CONCLUSÃO

A temperatura do ar de secagem (TAR) foi à única variável significativa do processo sobre os parâmetros Deff do modelo de Fick e “n” da equação de Page de acordo com a avaliação ANOVA. Os modelos difusional de Fick e de Page apresentaram bons ajustes aos dados experimentais de secagem em todos os tratamentos realizados, sendo os melhores ajustes obtidos pelo modelo de Page de acordo com a avaliação dos parâmetros de qualidade. O pré-tratamento osmótico afeta levemente a cinética de secagem, mas suas variáveis – temperatura da desidratação osmótica (TDO), concentração da solução (CDO) e tempo de contato alimento/solução (tDO) - não apresentaram efeitos significativos (p≤0,05) de

acordo com avaliação estatística, quando correlacionadas aos parâmetros D_{eff} do modelo de Fick e “ k ” e “ n ” do modelo Page, sendo que estes fatores, com exceção de “ k ”, tiveram seus valores acrescidos conforme a temperatura do ar de secagem foi aumentada.

Influence of process variables on the drying osmo-convective green bell pepper

ABSTRACT

The bell pepper is a tropical fruit rich in beneficial constituents in the human diet. Its bright color and its pungent flavor are attractive in various food formulations. However, it has a very short shelf life due to its high moisture content. The osmotic dehydration then conventional drying is a technique that provides increased shelf life of the product. The present study aimed to evaluate the effect of process variables, including the osmotic dehydration (OD) - contact time, concentration and temperature of the solution - and drying air temperature on the kinetics of convective drying of sliced peppers green. It was proposed a factorial design with three center points, combined with the response surface methodology. Osmotic solution was prepared with salt, sugar and distilled water in predefined proportions and convective drying in an oven with forced circulation was employed. The drying kinetics was fitted by theoretical models of the second Fick's law and empirical Page. The numerical models used suggests that the Page model was the one that best described the drying kinetics. By the factorial design was possible to observe that only the linear effect of drying air temperature had a significant effect ($p \leq 0.05$) on the effective diffusivity and the "n" parameter of the Page equation, while the constant "k" of this last model did not show a trend defined according to of process variables.

KEYWORDS: Agricultural production. Conventional drying. Osmotic dehydration. Kinetic parameters. Experimental design.

REFERÊNCIAS

ANTONIO, G. C. **Avaliação do efeito dos pré-tratamentos de desidratação osmótica e secagem HTST na obtenção de snacks de batata doce (*Ipomoea batatas* Lam).** Campinas, 2006. 185 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**, 16 ed. Association of Official Analytical Chemists, v. 1, p. 40, 1997.

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

CAMARGO, Gisele A. et al. Avaliação da qualidade de tomate seco em conserva. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 521-526, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000500012>

CÓRDOVA. K. R. V. **Desidratação osmótica e secagem maçã fuji comercial e industrial.** Curitiba, 2006. 148 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná.

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

EREN, I.; KAYMAK-ERTEKIN, F. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 344-352, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.069>

GONÇALVES. A. A.; BLUME. A. R. Efeito da desidratação osmótica como tratamento preliminar na secagem do abacaxi. **Estudos Tecnológicos**, v. 4, n. 2, p. 124-134, 2008.

HII, C. L.; LAW, C. L.; CLOKE, M.; SUZANNAH, S. Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. **Biosystems engineering**, v. 102, n. 2, p. 153-161, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.007>

HOYI, M. R.; HESARI, J. Osmotic dehydration kinetics of apricot using sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 1355-1360, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.007>

ISPIR, A.; TOGRUL, I. T. Osmotic dehydration of apricot: Kinetic and the effect of process parameters. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 87, p. 166-180, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2008.07.011>

KOTOVICZ, V. **Otimização da desidratação osmótica e secagem do yacon (*Polymnia sonchifolia*)**. Curitiba, 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná.

KOWALSKA, H.; LENART, A. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetables. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 137-140, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00214-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00214-4).

MADUREIRA, I. A.; FEITOSA M. R. F.; QUEIROZ, A. J. M.; FILHO, E. D. S. Cinética de secagem da polpa do figo-da-india. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 13, n. Especial, p. 345-354, 2011.

MELO, K. S. **Secagem da polpa do mandacaru**. Campina Grande, 2008. 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

MOURA, C. P. **Aplicação de redes neuronais para a predição e otimização do processo de secagem de yacon (*Polymnia sonchifolia*) com pré-tratamento osmótico**. Curitiba, 2004. 100 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos), Universidade Federal do Paraná.

OLIVEIRA, F. M. N.; SILVA, A. S.; ALEMIDA, F. A. C. Influência do branqueamento no processo da cinética de secagem do caju. In: **I Simpósio Brasileiro de Pós-Colheita de Frutos Tropicais (SBPCFT)**, João Pessoa, Brasil, v. 4, p. 23-29, 2005.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K. J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 181-189, 2006. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162006000100020>

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BRPD, F. P. R. Estudo da secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 3, p. 288-292, 2002. <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612001000300007>.

PARTI, M. Evaluation of diffusion based drying models: their bases and limitation. **Hungarian Journal of Industrial Chemistry**, n. 26, p. 221-228, 1998.

RAUPP, D. S. Processamento de tomate seco de diferentes cultivares. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 2, p. 415-422, 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672009000200021>

REIS, R. C.; BARBOSA, L. S.; LIMA, M. L.; REIS, J. S.; DEVILLA, I. A.; ASCHERI, D. P. R. Modelagem matemática da secagem da pimenta cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 4, p. 347–353, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662011000400003>

SANTOS, C. T.; BONOMO, R. F.; CHAVES, M. A.; FONTAN, R. C. I.; BONOMO, P. Cinética e modelagem da secagem de carambola (*Averrhoa carambola* L.) em secador de bandeja. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 32, n. 3, p. 309–313, 2010. <http://dx.doi.org/10.4025/actascitechnol.v32i3.6048>

SANTOS, J. A. B.; SILVA, G. F.; PAGANI, A. A. C. Estudo da cinética de secagem da pimenta malagueta (*Capsicum spp*) cultivada no estado de Sergipe. **Revista GEINTEC**, v. 2, n. 5, p. 465–471, 2012. <http://dx.doi.org/10.7198/S2237-0722201200050004>

VASCONCELOS, J. L. L. A. **Desidratação osmótica de figo da índia (*Opuntia ficus indica*)**. Recife, 2010. 76 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e tecnologia em Alimentos), Universidade Federal de Pernambuco.

Recebido: 04 ago. 2014.

Aprovado: 31 jul. 2015.

Publicado: 30 jun. 2016.

DOI:10.3895/rbta.v10n1.2014

Como citar:

ALVES, T. P.; NICOLETI, J. F. Influência das variáveis de processo sobre a secagem osmo-convectiva de pimentão verde. **R. bras. Tecnol. Agroindustr.**, Ponta Grossa, v. 10, n. 1, p. 2022–2037, jan./jun. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Joel Fernando Nicoletti

Rua Marcílio Dias, 635, Jardim. Paraíso, Apucarana, Paraná, Brasil

Direito autorial: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

