

Efeito de ondas ultrassônicas e de pulso de vácuo nos parâmetros de qualidade de peras osmoticamente desidratadas

Letícia Fernandes de Oliveira¹, Kamilla Soares de Mendonça², Jefferson Luiz Gomes Corrêa³, João Renato de Jesus Junqueira^{4*}, Ariana Justus⁵

Resumo

O uso de pulso de vácuo ou de ondas ultrassônicas pode melhorar a eficiência da desidratação osmótica. As influências do pulso de vácuo e do ultrassom durante a desidratação osmótica de pedaços de pera (65 kg sacarose 100 kg⁻¹ solução, 300 min) foram testadas. Parâmetros de qualidade foram avaliados: propriedades mecânicas (tensão na ruptura, deformação na ruptura e elasticidade), estrutura celular e encolhimento. Com o uso de planejamento experimental, em cada processo, testaram-se temperatura (25,9 a 54,1°C) e tempo de aplicação de pulso de vácuo ou ultrassom no início do processo (0 a 17,5 min) como variáveis independentes. A influência do pulso de vácuo foi verificada para a elasticidade. O ultrassom apresentou influência nos parâmetros tensão na ruptura e elasticidade. O aumento da temperatura promoveu maior encolhimento das amostras. De modo geral, o tratamento osmótico, assistido ou não, promoveu mudanças na microestrutura, deformação e ruptura celular de peras osmoticamente desidratadas.

Palavras-chave: Propriedades mecânicas. Encolhimento. Microestrutura.

Influence of ultrasound waves and vacuum pulse on quality parameters of osmotically dehydrated pears

Abstract

Osmotic dehydration can be improved with the use of vacuum pulse or ultrasound waves. The influence of vacuum pulse and ultrasound waves on the osmotic dehydration of sliced pears (65 kg sucrose 100 kg⁻¹ solution, 300 min) was tested. Several quality parameters were evaluated: mechanical properties (stress at fracture, strain at fracture and elasticity), cell structure and shrinkage. Experimental design was performed for each process using temperature (25.9 to 54.1°C) and time of the assisted process in the first minutes of the osmotic dehydration (vacuum pulse or ultrasound waves, 0 to 17.5 min) as the independent variables. The influence of vacuum pulse was verified for elasticity. Ultrasound waves influenced stress at fracture and elasticity. Temperature increasing promoted larger shrinkage of the samples. In general, the osmotic treatment, assisted or not, promoted changes in microstructure, cell deformation and cell rupture of osmotically dehydrated pear.

¹Professora da Universidade Federal de São João Del-Rei/UFSJ - Divinópolis

²Doutoranda do Departamento de Ciências dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras/UFLA

³Professor da Universidade Federal de Lavras/UFLA

⁴Doutorando do Departamento de Ciências dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras/UFLA

*Autor para correspondência: jrenatojesus@hotmail.com

⁵Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciências dos Alimentos – Universidade Estadual de Londrina

Recebido para publicação em 10 de dezembro de 2015

Aceito para publicação em 28 de março de 2016

Keywords: Mechanical properties. Shrinkage. Microstructure.

Introdução

A desidratação osmótica (DO) tem sido amplamente utilizada para obtenção de produtos semidesidratados. Este método envolve a imersão do alimento em uma solução hipertônica e, devido a um gradiente de pressão osmótica, uma quantidade de água é removida por difusão através da membrana semipermeável dos tecidos celulares (CORRÊA *et al.*, 2010; NAHIMANA *et al.*, 2011). Além do fluxo de água do produto para a solução osmótica, a incorporação de solutos solúveis e a perda de solutos nativos são responsáveis por mudanças nas propriedades mecânicas do material (CASTELLÓ *et al.*, 2009), microestrutura (MORENO *et al.*, 2011) e volume (MAYOR; MOREIRA; SERENO, 2011; NAHIMANA *et al.*, 2011).

O uso de pulso de vácuo (PV) ou ondas ultrassônicas (US) durante a DO, usualmente promove um incremento nos coeficientes de transferência de massa. No caso da aplicação de US, o incremento ocorre pela redução nas resistências interna e externa à transferência de massa. A resistência externa é minimizada pela cavitação com implosão de bolhas na solução osmótica e a interna, pela ocorrência, no alimento, de rápidas e sucessivas compressões e expansões, fenômeno conhecido como efeito esponja (FERNANDES; RODRIGUES, 2008; CÁRCEL *et al.*, 2012). A aplicação de PV nos primeiros minutos da DO provoca uma expansão dos gases oclusos nos poros dos frutos, provocando sua saída, aumentando a área superficial de transferência de massa (VIANA; CORRÊA; JUSTUS, 2014).

A DO de peras provoca mudanças na microestrutura (redução no tamanho das células e ruptura celular) e nas propriedades mecânicas (perda de firmeza) em solução de sacarose (65 kg soluto 100 kg⁻¹ solução) (MORENO *et al.*, 2011). O processo de DO é um efetivo pré-tratamento que promove um acréscimo na taxa de secagem. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do tempo de aplicação de PV e US e temperatura na desidratação osmótica de peras. Alterações nas propriedades mecânicas, tensão na ruptura (σ), deformação na ruptura (ε), elasticidade (E), estrutura celular e encolhimento foram avaliadas. A aplicação de US na DO de peras constituiu uma inovadora alternativa para

umentar a difusão de água, para obtenção de produtos semidesidratados de alta qualidade. Os efeitos da aplicação de PV e US na DO foram comparadas.

Material e métodos

Material

Peras (*Pyrus communis* L.) da variedade Packhams Triumph foram adquiridas no mercado local (Lavras, Minas Gerais). O material foi classificado conforme o grau de maturação, formato e coloração uniformes, para minimizar diferenças.

Caracterização e preparo das amostras

Os frutos foram descascados e cortados, com auxílio de um molde de aço inox, em amostras com as seguintes dimensões: 0,020 m x 0,020 m x 0,005 m (comprimento x largura x espessura).

O teor de umidade foi determinado com a secagem das amostras em estufa a vácuo a 70°C (A.O.A.C., 2007). A atividade de água foi analisada em um higrômetro (Aqualab 3-TE – Decagon Device Inc., EUA) e as propriedades mecânicas em um texturômetro (Universal Texture Analyzer – TA-TX2). Uma análise de compressão uniaxial foi conduzida a uma taxa de deformação constante de 1 mm s⁻¹. O eixo das amostras (aproximadamente 4 cm² de área) foi disposto paralelamente ao prato de compressão, e as amostras foram pressionadas a 55% de sua altura original.

Curvas de deformação foram obtidas e utilizadas no cálculo da tensão na ruptura (σ) e deformação na ruptura (ε) (Equações 1 e 2).

$$\sigma = \frac{F_t}{A_t} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \left| \ln \frac{H_t}{H_0} \right| \quad (2)$$

onde F_t corresponde à força do material [N] no tempo t [s]; A_t corresponde à área em função do tempo [m²]; H_0 e H_t correspondem às alturas ini-

cial [m] e no tempo t [s] das amostras, respectivamente.

A área de contato em cada tempo t durante o teste de compressão foi obtida através da área das amostras antes da compressão (A_0), altura inicial (H_0) e altura em cada tempo de ruptura (H_t), considerando constante o volume da amostra durante a compressão, como descrito na Equação 3 (MAYOR; CUNHA; SERENO, 2007).

$$A_t = \frac{A_0 H_0}{H_t} \quad (3)$$

Processos osmóticos

A solução osmótica foi preparada com sacarose comercial (65%) e água destilada. A proporção fruta:solução foi de 1:20 (p/v) para evitar diluição significativa da solução durante o processamento (VIANA; CORRÊA; JUSTUS, 2014). O processo foi conduzido em Erlenmeyers com volume de 250 mL. Os tratamentos com US foram realizados com a imersão dos Erlenmeyers em um banho ultrassônico equipado com um controlador de tempo (Unique, model USC 2850A, Indaiatuba, Brasil), onde as ondas ultrassônicas (Frequência 25 kHz, Intensidade de potência 8 kWm⁻³) foram aplicadas (MENDONÇA *et al.*, 2016).

Os tratamentos com PV foram conduzidos em um equipamento de aço inox, com controle de temperatura, agitação e pressão interna. O equipamento para desidratação osmótica com pulso de vácuo (DOPV) constituía em um tanque de 50 L, com volume mínimo de trabalho de 10 L, recoberto por uma jaqueta externa por onde o fluido térmico (água) escoava (VIANA; CORRÊA; JUSTUS, 2014). A pressão de vácuo foi mantida constante em 50 mbar (MORENO *et al.*, 2011).

Tanto os tratamentos com PV quanto os com US foram aplicados ao sistema nos primeiros minutos do processo osmótico. Os experimentos foram realizados em três repetições.

A temperatura da solução osmótica e o tempo de aplicação de PV ou US foram variáveis de acordo com o planejamento experimental nos tratamentos osmóticos, mas eram mantidos constantes durante cada ensaio (300 min). Após a aplicação do PV ou do US, o pro-

cesso osmótico foi conduzido como uma DO ordinária. Propriedades mecânicas, microscopia e encolhimento foram realizadas nas amostras desidratadas após 300 minutos de DO. Todas as análises foram realizadas em três repetições, e os valores foram reportados como média. O coeficiente de encolhimento (S) foi avaliado em função da redução no volume das amostras. A alteração do volume das amostras foi obtida por deslocamento de tolueno, como descrito por Mohsenin (1986). S foi expresso como comparação entre o volume da amostra desidratada e seu volume inicial [%], como demonstrado na Equação 4.

$$S = \left(\frac{V_0 - V_f}{V_0} \right) \times 100 \quad (4)$$

onde V_0 corresponde ao volume inicial da amostra e V_f corresponde ao volume final da amostra, após a desidratação.

Para microscopia eletrônica de varredura (MEV), após cada experimento, as amostras foram cortadas e fixadas em solução Karnovisk por 24 horas a temperatura ambiente, em seguida foram transferidas para uma solução de glicerol (30%) por 30 min. As amostras foram pós-fixadas em solução de tetróxido de ósmio e lavadas três vezes com água destilada, em seguida desidratadas em gradiente de acetona. Para completar a secagem, as amostras foram levadas ao aparelho de ponto crítico (CPD 030), e os stubs cobertos por uma fina camada de prata. Os stubs com as amostras foram cobertos por banho de ouro em um Sputtering (SDC 050). As análises de MEV dos tecidos das amostras foram realizadas em microscópio eletrônico de varredura (Leo Evo 40).

Tratamento estatístico

Um delineamento composto central rotacional foi utilizado considerando dois fatores (variáveis independentes) durante a DO: temperatura e tempo de aplicação de PV ou US. As variáveis independentes foram codificadas em cinco níveis, -1,41; -1; 0; 1 e 1,41, correspondentes à uma faixa de variáveis reais, 25,9; 30,0; 40,0; 50,0 e 54,1 °C, para temperatura e 0; 2,50; 8,75; 15,00 e 17,50 min, para tempo de processo. Este planejamento gerou um conjunto de 11 experimentos para cada processo avaliado (PV ou US), com 3 repetições no ponto central e 4 pontos axiais. As variáveis dependentes foram

encolhimento e propriedades mecânicas. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software STATISTICA 8.0 (Statsoft, Tulsa, USA), que tem licença adquirida pelo programa de Pós-graduação em Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras (UFLA). A metodologia de superfície de respostas foi empregada para avaliação dos resultados.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1^2 + \beta_4 X_2^2 + \beta_5 X_1 X_2 \quad (5)$$

onde Y corresponde à resposta predita, β são os coeficientes de regressão e X corresponde à variável independente codificada.

A adequabilidade do modelo foi testada através de análise de variância (ANOVA), ao nível de confiança de 95%, e do teste de falta de ajuste (Teste de F).

Resultados e discussão

Tabela 1 - Caracterização das peras frescas utilizadas no experimento

Análises	Valores médios
Teor de umidade (kg de água 100 kg de amostra ⁻¹)	85,84±1,37
Atividade de água	0,985±0,002
Teor de sólidos (kg de sólido 100 kg de amostra ⁻¹)	11,32±0,05
Tensão na ruptura (KPa)	223,28±12,33
Deformação na ruptura (%)	63,30±0,09
Elasticidade (Pa)	43,55±5,81

Fonte: Elaborada pelos autores, 2015.

Propriedades mecânicas e estrutura do tecido

Os valores máximos de tensão na ruptura (σ), deformação na ruptura (ϵ) e elasticidade (E) de frutos frescos e osmoticamente desidratados com aplicação de PV ou US são apresentados no Gráfico 1. A Tabela 2 apresenta os coeficientes de regressão dos modelos estatísticos obtidos para variáveis dependentes, σ , ϵ e E, com os resultados obtidos experimentalmente durante a DO com aplicação de PV ou US. A deformação na ruptura para amostras tratadas com US e a elasticidade para amostras tratadas com PV, obtiveram bons ajustes (TABELA 3), sendo possível a aplicação de um modelo de regressão (GRÁFICO 2).

O processo de desidratação osmótica provocou mudanças substanciais na textura

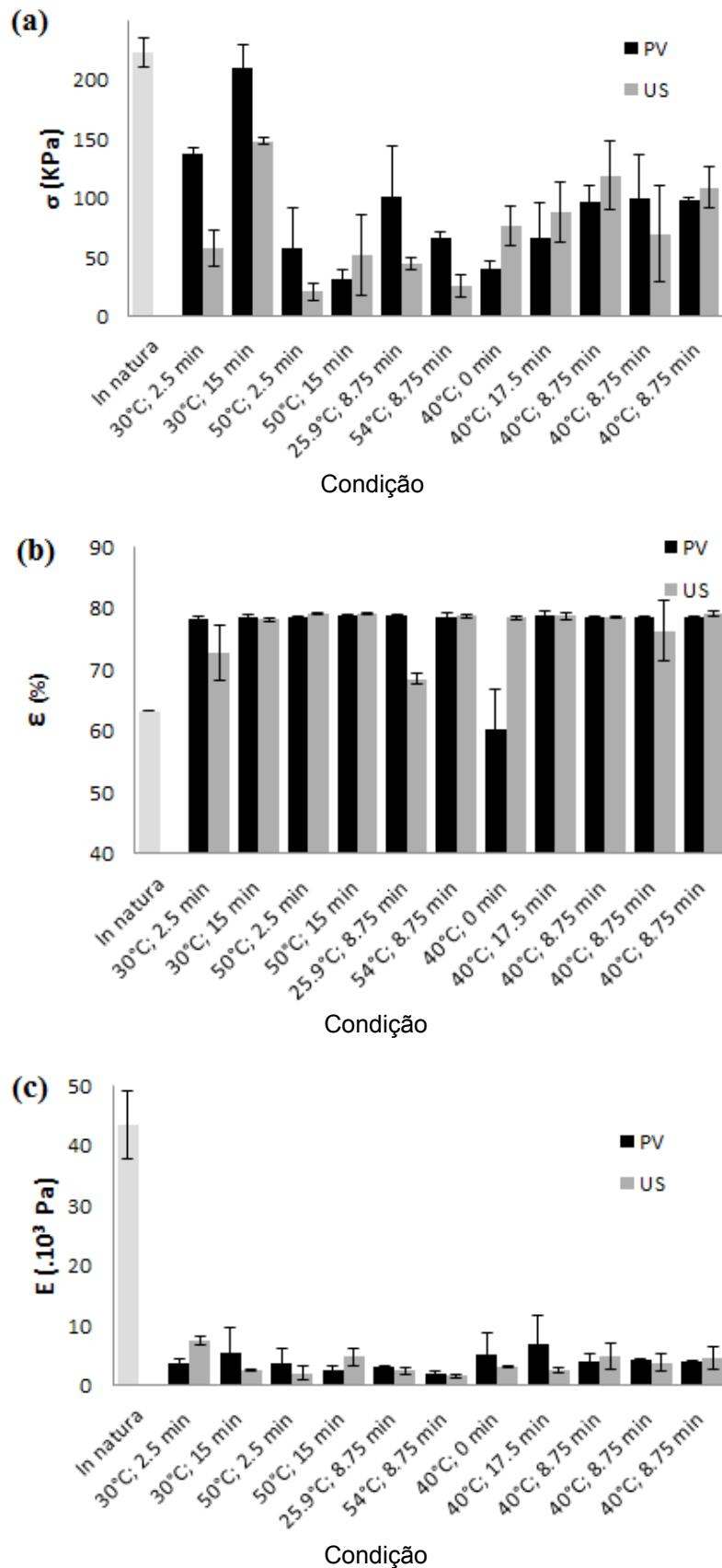
Os dados experimentais da DO de peras puderam ser analisados e ajustados a um modelo polinomial de segunda ordem (Equação 5). A significância dos termos foi indicada pelo p-valor, e o teste rejeita a hipótese de nulidade se o p-valor for menor do que o nível de significância (0,05).

Caracterização do material

Na Tabela 1, estão apresentados os teores médios de umidade inicial, atividade de água, teor de sólidos e propriedades mecânicas do fruto fresco. Os resultados obtidos estão de acordo com os observados por Moreno *et al.* (2011).

de peras (GRÁFICO 1). As amostras frescas apresentaram maior tensão na ruptura que os frutos osmoticamente desidratados, como demonstrados por diversos autores (CASTELLÓ *et al.*, 2009; CASTELLÓ; FITO; CHIRALT, 2010). Castelló, Fito e Chiralt (2010) reportaram que quanto maior a desidratação, menor a força em testes de textura. O decréscimo na tensão de ruptura nas amostras osmoticamente desidratadas (GRÁFICO 1) pode ser explicado pela perda de água durante a desidratação, fazendo com que o produto apresente uma estrutura mais frágil e quebradiça e susceptível a uma ruptura em menores tensões. A influência do nível de desidratação está associada à grande perda de turgescência e um maior nível de alteração da zona de ligação entre as células através da lamela média com tratamento osmótico (CASTELLÓ *et al.*, 2009).

Gráfico 1 - Tensão na ruptura (a), deformação na ruptura (b) e elasticidade (c) dos frutos *in natura* e osmoticamente desidratados com PV ou US.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2015.

Tabela 2 - Coeficientes da equação de regressão para respostas de propriedades mecânicas de peras osmoticamente desidratadas

Efeitos	Pulso de Vácuo					
	Tensão na ruptura		Deformação na ruptura		Elasticidade	
	Coefficiente	p-valor	Coefficiente	p-valor	Coefficiente	p-valor
Média	98485,3	0,009*	78,655	0,000*	4106,43	0,000*
T (L)	-38400,7	0,049*	0,022	0,990	-588,25	0,017*
T (Q)	2764,9	0,882	1,141	0,605	-867,50	0,007*
t (L)	10488,2	0,512	3,370	0,111	341,75	0,098
t (Q)	-11969,1	0,529	-3,357	0,166	887,62	0,007*
T x t	-24649,6	0,294	0,011	0,997	-765,14	0,024*
Ultrassom						
Média	99533,4	0,001*	78,041	0,000*	4432,689	0,001*
T (L)	-19634,3	0,065	27,467	0,008*	-798,609	0,104
T (Q)	-29237,7	0,032*	-1,907	0,056	-468,083	0,373
t (L)	21573,9	0,049*	0,733	0,308	-379,932	0,388
t (Q)	-1276,0	0,902	0,600	0,470	-343,321	0,505
T x t	-7941,7	0,530	-1,385	0,190	2254,026	0,010*

*coeficiente significativo quando p-valor < 0,05; T significa temperatura, t significa tempo de aplicação de US ou PV. L e Q indicam os coeficientes lineares e quadráticos, respectivamente.

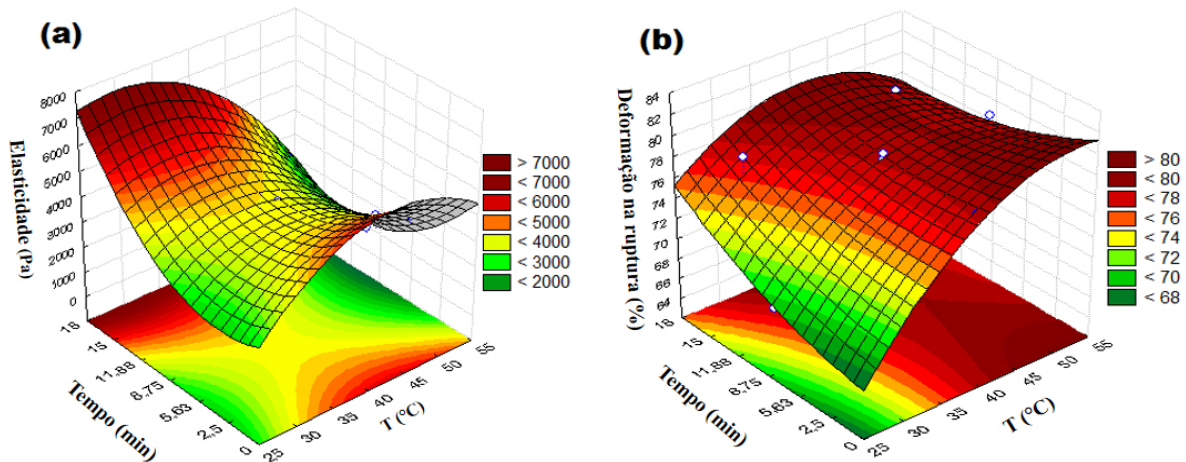
Fonte: Elaborada pelos autores, 2015.

Tabela 3 - Análise de variância (ANOVA) das respostas modeladas por regressão σ , ϵ , E e encolhimento

Fator	Modelo					
	GL	SQ	QM	F-valor	p-valor	R ²
Tensão na ruptura						
PV	5	1,61x10 ¹⁰	3,23x10 ⁹	1,826	0,262	0,65
US	5	1,22x10 ¹⁰	2,44x10 ⁹	4,412	0,065	0,82
Deformação na ruptura						
PV	5	182,504	36,501	1,506	0,332	0,60
US	5	101,196	20,239	6,060	0,035	0,85
Elasticidade						
PV	5	1,83x10 ⁷	3673428	16,159	0,004	0,94
US	5	2,81x10 ⁷	5615649	4,344	0,066	0,81
Encolhimento						
PV	5	1783,72	356,74	2,463	0,172	0,71
US	5	3280,47	656,09	7,161	0,025	0,88

Fonte: Elaborada pelos autores, 2015.

Gráfico 2 - Superfície de resposta da elasticidade das amostras tratadas com PV (a) e deformação na ruptura de amostras tratadas com US (b).



Fonte: Elaborado pelos autores, 2015.

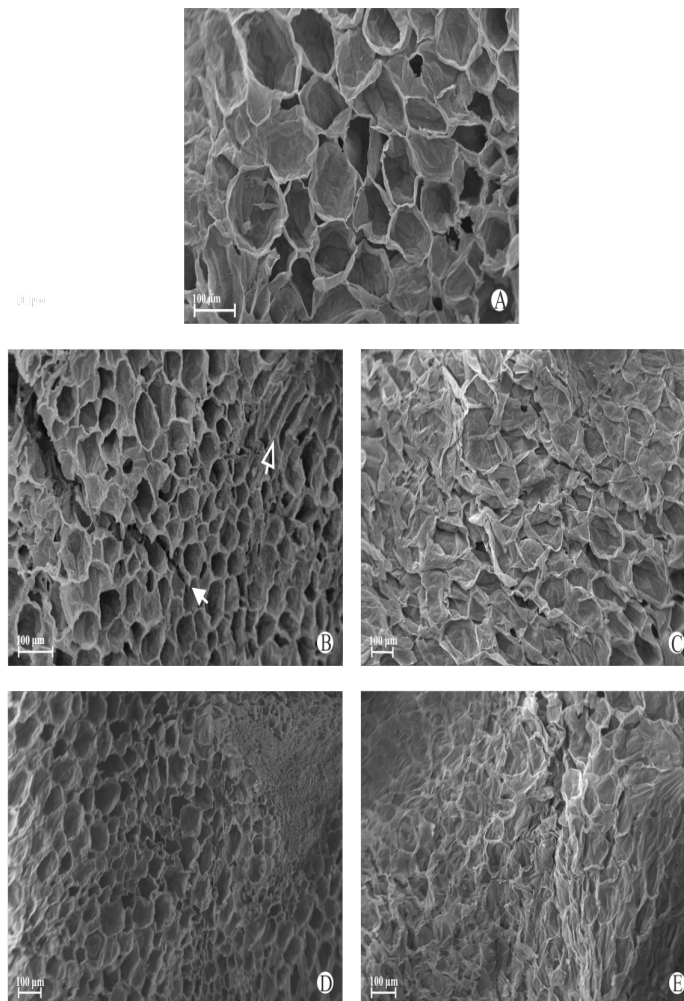
Ocorreram danos mecânicos no arranjo celular, tais como descolamento das células, associado com a deformação da amostra quando PV ou US foram aplicados (CHIRALT; TALENS, 2005). Os gases oclusos ocupam papel importante no volume das amostras. Como boa parte desses gases são removidos pela aplicação do PV, ocorre uma compressão na matriz celular, principalmente a partir de um valor crítico de viscosidade da solução externa (VIANA; CORRÊA; JUSTUS, 2014). A desidratação com aplicação de US provoca o rompimento das células e a criação de microcanais na estrutura da amostra (GARCIA-NOGUERA *et al.*, 2010). Resultados similares foram encontrados por Moreno *et al.* (2011) e Fernandes e Rodrigues (2008). As micrografias dos frutos frescos (FIGURA 1a) e dos frutos desidratados por aplicação de PV e US (FIGURAS 1b, 1c, 1d e 1e) mostraram que o tratamento osmótico provoca a plasmólise das células de pera, com conseqüente deformação, contração e colapso. A análise microscópica de imagens para frutos desidratados confirmaram o efeito da aplicação do PV e do US. Em amostras tratadas com 15 min de aplicação de US (FIGURAS 1b e 1c), longos canais microscópicos são formados pela ruptura das células, e a alongação das células. Resultados similares foram observados por Rodrigues *et al.* (2009). Segundo Deng e Zhao (2008a), a maior perda de firmeza em processo ultrassônico pode ser resultado da

combinação entre a grande perda de turgescência pela perda de água e o dano mais acentuado no tecido causado pelo US. Foi possível verificar uma compressão na matriz celular durante a DO com 15 min de aplicação de PV (FIGURAS 1d e 1e).

Como observado no Gráfico 1, diferentes tratamentos osmóticos (aplicação de PV ou US) não afetaram significativamente a firmeza final do produto, considerando que a tensão e a deformação na ruptura não foram afetadas pelo tempo de aplicação do PV ou do US. Resultados semelhantes foram reportados por Deng e Zhao (2008b). Entretanto, a faixa de temperatura utilizada na DO influenciou significativamente a tensão na ruptura (TABELA 4) e maior temperatura da solução provocou maiores danos à integridade da estrutura celular (FIGURAS 1c e 1e), reduzindo a tensão na ruptura e promovendo maior perda de água.

A deformação na ruptura aumentou com o decréscimo no teor de umidade (GRÁFICO 1b). A compactação das fibras indica prevalência de um mecanismo de descolagem celular nas amostras desidratadas, uma diminuição na pressão de turgor pode reduzir a área de contato entre as células e, conseqüentemente, a resistência da união intercelular (MAYOR; CUNHA; SERENO, 2007).

Figura 1 - Micrografias da pera *in natura* (a) desidratada osmoticamente com 15 min de aplicação de US a 30°C (b) e 50°C (c), e 15 min de aplicação de PV a 30°C (d) e 50°C (e).



Seta cheia: canais microscópicos formados; seta vazia: região com células alongadas.

Fonte: Elaborada pelos autores, 2015.

Como ocorrem alterações no volume das amostras pelo fluxo de água, ganho de sólidos e incorporação de solução osmótica nos espaços antes preenchidos por ar, a tensão e a deformação na ruptura foram afetados pelo volume total do produto. Em resposta à tensão pelo tecido da pera, a incorporação de sólidos após a desidratação provoca mudanças no comportamento viscoelástico (MEDINA-TORRES *et al.*, 2008), e a pera deforma conforme um corpo plástico, no qual aumenta a deformação na ruptura e reduz a tensão na ruptura. O produto apresenta-se mais gomoso e firme, porém menos rígido.

Como observado no Gráfico 1c, existe um decréscimo no módulo de elasticidade aparente após a desidratação. Mayor; Cunha; Sereño (2007) propuseram que a redução no teor de umidade reduz a pressão de turgor nas células,

plasmólise e redução da elasticidade do material.

Conforme a Tabela 2, o tempo de aplicação do US está relacionado com a tensão na ruptura, sendo que o aumento no tempo de aplicação do US promove aumento na tensão. Este resultado é explicado pelo maior ganho de açúcar associado a um pequeno decréscimo na perda de água, tornando o produto mais rígido. Rodrigues *et al.* (2009) observaram que a aplicação de US em uma solução osmótica promoveu uma distorção e rupturas nas células, com o aparecimento de regiões onde as membranas celulares não puderam ser observadas. Após aplicação de US na solução osmótica, vários canais contínuos foram formados nas células densas, o que resultou na incorporação de açúcar a partir da solução osmótica, aumentando o ganho de sólidos. Absorção de açúcar pelo fruto

cria uma resistência adicional à difusão de água, resultando numa redução da difusividade efetiva.

Menor módulo de elasticidade indica que o material é menos resistente a deformação, e os tratamentos influenciaram a estrutura do fruto. A interação entre a temperatura e tempo determinam a elasticidade de peras tratadas e pode ser explicada pelas mudanças na estrutura do tecido. Em amostras tratadas com US, maiores temperaturas e maior tempo de aplicação provocaram maiores danos ao produto, criando canais nas células e rompendo a membrana celular, o que resultou em menor módulo de elasticidade. Na desidratação osmótica com pulso de vácuo, o uso de vácuo promoveu uma substituição parcial do ar presente nos poros com impregnação de solução osmótica. Maiores valores de perda de água foram observados em menores tempos de PV. Temperaturas elevadas causaram maiores danos à integridade da estrutura celular permitindo maior fluxo de água, diminuindo a elasticidade do produto (GRÁFICO 2a).

A temperatura foi responsável pelo aumento da perda de água e maior dano no produto tratado com US, maior temperatura provocou

maior deformação na ruptura (GRÁFICO 2b) e encolhimento (TABELA 3). Deng e Zhao (2008b) relataram que amostras que encolhem produzem materiais mais duros.

Encolhimento

A Tabela 4 apresenta os modelos estatísticos obtidos para encolhimento de amostras de peras desidratadas osmoticamente com uso de PV e US. O modelo estatístico para encolhimento durante a DOUS apresentou bons ajustes (TABELA 3). Assim sendo, o encolhimento pode ser ajustado por um modelo de regressão (GRÁFICO 3). No processo de DOPV, o coeficiente de encolhimento (S) das amostras variou entre 14,72% e 67,15%, e para DOUS variou entre 20,95% e 71,88%. O encolhimento em um processo osmótico ocorre devido a mudanças no formato das células e redução de tamanho, pela perda de fluidos celulares (MORENO *et al.*, 2011; NAHIMANA *et al.*, 2011). Muitos fenômenos podem provocar um colapso nos tecidos, como diferença de pressão e forças de capilaridade causadas pela remoção de água e perda de pressão de turgor nas células (MAYOR; MOREIRA; SERENO, 2011), como demonstrado na Figura 1.

Tabela 4 - Coeficientes da equação de regressão para respostas de encolhimento

Efeitos	Pulso de Vácuo		Ultrassom	
	Coeficiente	p-valor	Coeficiente	p-valor
Média	60,95	0,002*	66,85	0,00*
T (L)	9,88	0,068	15,47	0,01*
T (Q)	-10,73	0,088	-11,21	0,04*
t (L)	0,15	0,972	7,96	0,06
t (Q)	-2,59	0,631	-5,85	0,21
T x t	9,36	0,181	-5,22	0,32

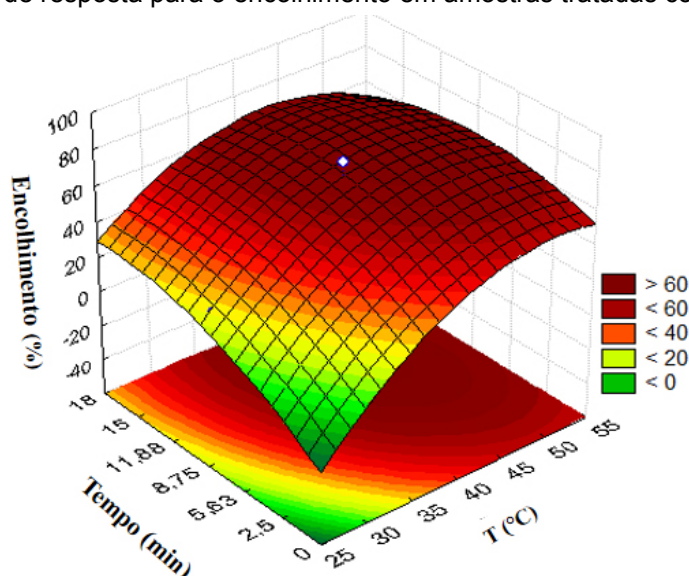
*coeficiente significativo quando p-valor < 0,05; T significa temperatura, t significa tempo de aplicação de US ou PV. L e Q indicam os coeficientes lineares e quadráticos, respectivamente.

Fonte : Elaborada pelos autores, 2015.

Para amostras tratadas com US, a temperatura foi um fator estatisticamente significativa, sendo que um aumento na temperatura levou a um maior encolhimento (TABELA 4). Para amostras tratadas com PV, apesar da temperatura não ser considerada um fator estatisticamente significativa, o p-valor de aproximadamente 0,068 demonstra a influência da temperatura no encolhimento. Segundo Mrad *et al.* (2012), um maior encolhimento das amostras com aumento na temperatura é causado pela maior eficiência

na remoção de água do que quando comparada com aquelas à baixas temperaturas. Entretanto, observações microscópicas dos tecidos das peras durante a DO foram realizadas para melhor explicação e entendimento do comportamento durante o processo. O Gráfico 3 demonstra que um maior encolhimento foi obtido a 45,9 °C e 11,35 min de aplicação de US. Menores valores de encolhimento foram observados em menores temperaturas e tempo de aplicação de US.

Gráfico 3 - Superfície de resposta para o encolhimento em amostras tratadas com US.



Fonte: Elaborado pelos autores, 2015.

Uma comparação entre as amostras frescas revelaram valores similares de deformação na ruptura e encolhimento para menores temperaturas (aproximadamente 30°C) e tempo de aplicação de US (aproximadamente 9 min). Para o parâmetro de elasticidade, existe uma correlação entre uma faixa mediana de temperatura (35 °C a 50 °C) e curto tempo de duração de aplicação de PV (aproximadamente 15 min).

Conclusão

O tratamento osmótico, assistido ou não por pulso de vácuo e ultrassom, promoveu mudanças na microestrutura, deformação e ruptura celular em peras osmoticamente desidratadas.

Em temperaturas mais elevadas, a aplicação de PV acentuou a redução da tensão na ruptura e na elasticidade das amostras, e a aplicação de US reduziu a tensão na ruptura e aumentou a deformação na ruptura. Maiores tempos de aplicação de PV levaram a um aumento na elasticidade, o tempo de aplicação de US aumentou a tensão na ruptura. Foi observado maior encolhimento e danos à integridade da estrutura celular em temperaturas mais elevadas, o que reduziu a tensão na ruptura e aumentou a deformação na ruptura. Apesar da aplicação de PV e US apresentarem efeitos significativos na alteração das propriedades mecânicas, encolhimento e estrutura dos tecidos, sua utilização em desidratação osmótica não compromete a qualidade do produto final.

Referências

Association of Official Analytical Chemists - A.O.A.C. **Official methods of analysis**. 18th ed. Washington: Association of Official Analytical Chemists, 2007.

CÁRCEL, J. A. *et al.* Food process innovation through new technologies: use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 110, n. 2, p. 200-207, 2012.

CASTELLÓ, M. L.; FITO, P. J.; CHIRALT, A. Changes in respiration rate and physical properties of strawberries due to osmotic dehydration and storage. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 97, n. 1, p. 64-71, 2010.

CASTELLÓ, M. L. *et al.* Influence of osmotic dehydration on texture, respiration and microbial stability of apple slices (Var. Granny Smith). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 91, n. 1, p. 1-9, 2009.

CHIRALT, A.; TALENS, P. Physical and chemical changes induced by osmotic dehydration in plant tissues. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 67, n. 1-2, p. 167-177, 2005.

CORRÉA, J. L. G. *et al.* Mass transfer kinetics of pulsed vacuum osmotic dehydration of guavas. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 96, n. 4, p. 498-504, 2010.

- DENG, Y.; ZHAO, Y. Effects of pulsed-vacuum and ultrasound on the osmodehydration kinetics and microstructure of apples (Fuji). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 85, n. 1, p. 84-93, 2008a.
- DENG, Y.; ZHAO, Y. Effect of pulsed vacuum and ultrasound osmopretreatments on glass transition temperature, texture, microstructure and calcium penetration of dried apples (Fuji). **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 9, p. 1575-1585, 2008b.
- FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Application of ultrasound and ultrasound-assisted osmotic dehydration in drying of fruits. **Drying Technology**, New York, v. 26, n. 12, p. 1509-1516, 2008.
- GARCIA-NOGUERA, J. et al. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pretreatment time and ultrasonic frequency. **Drying Technology**, New York, v. 28, n. 11, p. 294-303, 2010.
- MAYOR, L.; CUNHA, R. L.; SERENO, A. M. Relation between mechanical properties and structural changes during osmotic dehydration of pumpkin. **Food Research International**, Barking, v. 40, n. 4, p. 449-460, 2007.
- MAYOR, L.; MOREIRA, R.; SERENO, A. M. Shrinkage, density, porosity and shape changes during dehydration of pumpkin (*Cucurbita pepo* L.) fruits. **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 103, n. 1, p. 29-37, 2011.
- MEDINA-TORRES, L. et al. Drying kinetics of nopal (*Opuntia ficus-indica*) using three different methods and their effect on their mechanical properties. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 7, p. 1183-1188, 2008.
- MENDONÇA, K. S. et al. Optimization of osmotic dehydration of yacon slices. **Drying Technology**, New York, v. 34, n. 4, p. 386-394, 2016.
- MOHSENIN, N. R. **Physical properties of plant and animal materials, structure, physical characteristics and mechanical properties**. 2th ed. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- MORENO, J. et al. Influence of ohmic heating and vacuum impregnation on the osmotic dehydration kinetics and microstructure of pears (cv. Packham's Triumph). **Journal of Food Engineering**, Essex, v. 104, n. 4, p. 621-627, 2011.
- MRAD, N. D. et al. Influence of air drying temperature on kinetics, physicochemical properties, total phenolic content and ascorbic acid of pear. **Food and Bioprocess Technology**, Rugby, v. 90, n. 3, p. 433-441, 2012.
- NAHIMANA, H. et al. Mass transfer modeling and shrinkage consideration during osmotic dehydration of fruits and vegetables. **Food Reviews International**, Barking, v. 27, n. 4, p. 331-356, 2011.
- RODRIGUES, S. et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration on cell structure of sapotas. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 89, n. 4, p. 665-670, 2009.
- VIANA, A. D.; CORRÊA J. L. G.; JUSTUS A., Optimisation of the pulsed vacuum osmotic dehydration of cladodes of fodder palm. **International Journal of Food Science and Technology**, Reino Unido, v. 49, n. 3, p. 726-732, 2014.