

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

Freeze drying of pineapple slices: evaluation of drying kinetics and product quality

Autores | Authors

Ana Paula VIEIRA

Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Departamento de Engenharia e Tecnologia
de Alimentos
São José do Rio Preto/SP - Brasil
e-mail: anapaulaengal@yahoo.com.br

Joel Fernando NICOLETI

Universidade Tecnológica Federal do
Paraná (UTFPR)
Apucarana/PR - Brasil
e-mail: nicoleti@utfpr.edu.br

✉ Vânia Regina Nicoletti TELIS

Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Departamento de Engenharia e Tecnologia
de Alimentos
Rua Cristóvão Colombo, 2260
CEP: 15054-000
São José do Rio Preto/SP - Brasil
e-mail: vanianic@ibilce.unesp.br

✉ Autor Correspondente | Corresponding Author

Recebido | Received: 25/10/2010

Aprovado | Approved: 06/09/2011

Publicado | Published: mar./2012

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de secagem e os parâmetros de qualidade – conteúdo de vitamina C, reidratação e textura – de fatias de abacaxi liofilizadas em função da espessura e da temperatura de congelamento. Abacaxis do tipo Havaí, variedade Smooth Cayenne, foram fatiados transversalmente em espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm. As fatias foram congeladas nas temperaturas de -14, -24 e -34 °C, sendo, em seguida, conduzidas ao liofilizador. Uma parcela das amostras era destinada ao estudo da cinética de secagem pela pesagem periódica das mesmas, enquanto outra foi reservada para os testes de qualidade. O teor de vitamina C foi quantificado por adição de ácido oxálico na amostra e titulado com 2,6-diclorofenolindofenol. O parâmetro de textura avaliado foi a dureza, por testes de compressão em texturômetro, enquanto a reidratação foi obtida pela pesagem das amostras antes e após a imersão em água destilada por 5 min. Os resultados do presente trabalho mostraram que existe uma forte dependência da cinética de secagem e dos atributos de qualidade de fatias de abacaxi liofilizadas em função das condições utilizadas durante a etapa de congelamento, mesmo sendo este classificado como congelamento lento. Por outro lado, a taxa de congelamento não é a única variável que tem influência sobre a cinética de secagem e os atributos de qualidade. A combinação de temperatura e umidade, tanto durante a liofilização propriamente dita, quanto durante a etapa de reidratação, tem influência sobre a transição vítrea do material que, por sua vez, afeta a extensão do colapso estrutural sofrido pelo produto.

Palavras-chave: Abacaxi; Liofilização; Cinética; Qualidade.

Summary

The aim of this study was to evaluate the drying kinetics and quality parameters - vitamin C content, rehydration and texture - of freeze dried pineapple slices, according to the thickness and temperature of freezing. Pineapples of the Hawaii type, Smooth Cayenne variety, were sliced transversely with thicknesses of 0.5, 1.0 and 1.5 cm. The slices were frozen at temperatures of -14, -24 and -34 °C, and then freeze dried. One part of the samples was used to study the drying kinetics by periodic weighing, while the other was reserved for the quality tests. The vitamin C content was quantified by adding oxalic acid to the sample and titrating with 2,6-dichlorophenolindophenol. The texture parameter evaluated was that of hardness, evaluated by compression tests in a texturometer, while rehydration was determined by weighing the samples before and after immersion in water for 5 min. The results of this study showed there was a strong dependence of the drying kinetics and quality attributes of the dried pineapple slices on the conditions used during the freezing step, even though this was classified as slow freezing. Nevertheless the freezing rate was not the only variable that influenced the drying kinetics and quality attributes. The combination of temperature and humidity, both during the freeze drying process itself, and also during the rehydration step, influences the glass transition of the material which, in turn, affects the extent of structural collapse suffered by the product.

Key words: Pineapples; Freeze drying; Kinetics; Quality.

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

1 Introdução

O abacaxi é uma fruta muito apreciada, não só pelo seu aroma agradável e sabor refrescante e ácido, mas também por suas qualidades nutricionais, pois a fruta apresenta uma boa fonte de vitamina A, vitamina B1, vitamina C, sais minerais e carboidratos. Também é um adjuvante da digestão pela ação de sua enzima natural, a bromelina (MEDINA et al., 1978).

A produção mundial de abacaxi, em 2006, foi de aproximadamente 18,2 milhões de t. Cerca de 60% dessa produção concentrou-se nos seis principais países produtores, que são: Tailândia (15%); Brasil (14%); Filipinas (10%); China (8%); Índia (7%), e Costa Rica (7%) (ANTONIALI e SANCHES, 2008). Segundo fontes do IBGE (2010), a safra brasileira de abacaxi em 2009 foi de 1,478 milhão de t da fruta, apresentando um déficit de produção de aproximadamente 17% em relação à safra recorde do ano de 2007, avaliada no decênio de 2000-2009.

Apesar de o abacaxi ser consumido preferencialmente como fruta fresca, há a necessidade de buscar novas tecnologias de preservação da fruta, disponibilizando, dessa forma, um alimento de consumo alternativo, reduzindo o desperdício da produção excedente. Além das formas industrializadas mais comuns do abacaxi – as geleias, as bebidas e em calda –, a fruta em sua versão seca vem ganhando maior espaço.

O processo de liofilização consiste em um processo de secagem do material por meio da sublimação da parte congelada a temperaturas baixas e sob vácuo. O desempenho do processo é fortemente dependente da escolha adequada das condições operacionais e, portanto, há necessidade de uma extensiva análise de seus efeitos no tempo de processamento e na qualidade do produto obtido. Essa tecnologia foi desenvolvida para superar as perdas de compostos responsáveis pelos aromas nos alimentos, os quais são muito suscetíveis às modalidades de processamento que empregam temperaturas elevadas, como a secagem convencional (IBARZ e BARBOSA-CANOVAS, 1999).

Alimentos liofilizados são produtos com alto valor agregado por reter grande parte de seus nutrientes originais, uma vez que emprega baixas temperaturas em seu processamento. Entretanto, seu custo é expressivamente maior quando comparado aos produtos secos por outras técnicas, necessitando-se, assim, de pesquisas que minimizem os custos operacionais, ofertando, dessa maneira, produtos a um preço competitivo. Além disso, a qualidade final do produto, considerando-se os aspectos nutritivos e sensoriais, também deve ser investigada para garantir alimentos seguros e nutritivos aos consumidores. Dentre os índices

de qualidade, podem-se citar o teor de retenção de vitamina C, a capacidade de reidratação e a textura.

A atividade de vitamina C em alimentos está associada ao seu conteúdo de ácido L-ascórbico, que pode ser facilmente oxidado, sendo a intensidade do processo dependente de fatores como pH, conteúdo de umidade, oxigênio, temperatura e luz. Geralmente, é observado que se o ácido ascórbico contido nos alimentos apresentar pouca degradação, os outros nutrientes também sofreram perdas brandas. Dessa forma, o ácido ascórbico geralmente é considerado como um índice da qualidade nutricional durante o processamento e a armazenagem de gêneros alimentícios (FENNEMA, 1977).

Diversas investigações que levam em consideração a degradação de vitamina C em frutas submetidas aos processos de secagem podem ser encontradas na literatura, como Nicoletti et al. (2007), na secagem de caquis, Madrau et al. (2009), para damascos, entre outros autores.

A reidratação de um produto seco caracteriza a qualidade do produto final e os índices de reidratação indicam os danos provocados aos tecidos do alimento (GABAS et al., 1999). Marques et al. (2009) reidrataram frutas liofilizadas, entre estas abacaxi, acerola, manga, mamão e goiaba. De acordo com os resultados, apesar de o abacaxi apresentar menor capacidade de reidratação – absorver menores quantidades de água –, a fruta atingiu o equilíbrio de reidratação, caracterizado pela não alteração de sua massa, em um tempo menor quando comparada às demais frutas, com exceção da manga.

Os testes reológicos são importantes na obtenção de parâmetros de projeto de equipamentos, na compreensão da estrutura de produtos alimentícios e como indicativo de sua qualidade (BAGLEY e CHRISTIANSON, 1987). A Análise de Perfil de Textura (TPA) vem sendo muito utilizada como forma de obtenção de alguns parâmetros de textura em alimentos. Os resultados obtidos por esses testes têm tido elevada correlação com aqueles realizados por meio de análise sensorial (MORGADO e ABREU, 2001). A correlação de textura instrumental com a sensorial tem sido empregada com o propósito de melhorar os produtos disponíveis, bem como no desenvolvimento de novos produtos e no controle de qualidade do processamento e da manipulação dos alimentos. Nicoletti et al. (2005) avaliaram as propriedades reológicas em testes de compressão-relaxação em caquis secos; Gabas et al. (2002) obtiveram resultados correlacionados à textura para ameixas secas em função do conteúdo de umidade, enquanto Ferreira et al. (2008) aplicaram testes de TPA em peras secas em secador solar.

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

Os níveis de alteração da qualidade durante o processo de secagem de alimentos são fortemente dependentes da temperatura, do tempo e do conteúdo de umidade. A cinética de secagem fornece o histórico desses três fatores, sendo uma importante informação para o design de secadores e para o processamento, minimizando os efeitos adversos da qualidade do produto final (ADE-OMOWAYE et al., 2003).

Com exceção de poucas informações na literatura sobre a liofilização da polpa e do suco de abacaxi levando-se em consideração a qualidade do produto, ainda há a necessidade de investigação da fruta liofilizada em pedaços, a qual apresenta um mercado crescente e em expansão. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de secagem e os parâmetros de qualidade – conteúdo de vitamina C, reidratação e textura – de fatias de abacaxi liofilizadas em função da espessura e da temperatura de congelamento.

2 Material e métodos

2.1 Preparo e Caracterização da matéria-prima

Abacaxis do tipo Havaí, variedade Smooth Cayenne, foram adquiridos no mercado local (São José do Rio Preto-SP) algumas horas antes do processamento. Em cada ensaio, foram utilizados dois a três abacaxis, de tamanho médio, maduros e sem injúrias nas cascas, descascados manualmente e fatiados transversalmente com auxílio de um fatiador mecânico nas espessuras de 0,5, 1,0 e 1,5 cm. Para garantir a uniformidade do diâmetro nas fatias, utilizou-se apenas a região central da fruta, descartando as extremidades.

As frutas apresentaram concentrações de sólidos solúveis entre 10 e 19 °Brix lidos em refratômetro, enquanto a umidade inicial das amostras variou entre 78 e 88% (b.u.), obtida pelo método gravimétrico em estufa a vácuo (Marconi, Modelo MA 030) a 60 °C por 48 h, em triplicata. As pesagens foram feitas em balança analítica (Chyo, modelo JK 200).

As amostras foram levadas ao congelamento por 24 h sobre as prateleiras de um freezer vertical (modelo FV-500, marca Liotop, São Carlos-SP, Brasil), empregando-se três temperaturas de congelamento: -14, -24 e -34 °C. Durante o congelamento, foram monitoradas as temperaturas da superfície e do centro das fatias de abacaxi, empregando-se um registrador de dados (Field Logger, modelo 128k, marca Novus). Essas medições serviram como base para o cálculo da velocidade de congelamento (MARQUES et al., 2007) e, paralelamente, para detectar o momento em que a temperatura do centro das fatias entrasse em equilíbrio com a temperatura de sua superfície, quando então estas eram conduzidas ao liofilizador.

O planejamento experimental avaliado foi do tipo fatorial 3², isto é, dois fatores ou variáveis independentes, que foram as espessuras e as temperaturas de congelamento das amostras, totalizando nove ensaios. As superfícies de resposta e a análise de variância (ANOVA) foram obtidas com auxílio do software *Statistica* 6.0.

2.2 Liofilizador e operação

O equipamento utilizado foi um liofilizador de bancada (modelo L-101, marca Liotop, São Carlos-SP, Brasil), que consiste basicamente de uma câmara de secagem acrílica cilíndrica e transparente. Na parte superior da câmara, há uma tampa em aço inox que acopla oito torneiras de silicone para o encaixe dos frascos (cones) de vidro com o sistema de alívio de vácuo e, no interior da câmara de secagem, há um suporte em aço inoxidável para quatro bandejas de inox.

Após o congelamento das amostras, três quartos delas foram dispostos no interior da câmara de secagem do liofilizador em operação por um período de 24 h, para a avaliação dos testes de textura, vitamina C e reidratação, enquanto o restante das amostras foi colocado no interior dos cones laterais do liofilizador e pesados em conjunto para a obtenção da cinética de secagem.

Em intervalos de tempos espaçados a cada 1,5 h nas primeiras 7,5 h do processo, os cones contendo as amostras foram retirados com alívio do vácuo pelo fechamento das válvulas que interligam os cones com a câmara de secagem e então pesados para o posterior cálculo da perda de umidade em função do tempo de secagem.

2.3 Vitamina C

A determinação da vitamina C foi realizada utilizando-se o método padrão da AOAC, modificado por Benassi e Antunes (1998). Os testes foram realizados em duplicata nas amostras *in natura*, que apresentaram conteúdos médios de vitamina C na faixa de 0,32 a 1,16 mg de Vit C.g⁻¹ de matéria seca e imediatamente após liofilização.

2.4 Textura

As amostras liofilizadas por 24 h foram cortadas com auxílio de uma faca em aço inoxidável em tamanhos uniformes (1,5 × 1,5 cm) para serem acondicionadas em dessecadores contendo solução saturada (K₂CO₃) a 25 °C, correspondente à umidade relativa de equilíbrio de 0,432. As amostras, de peso inicial conhecido, foram então sobrepostas às placas de suporte perfuradas dos dessecadores, sendo pesadas em dias consecutivos até atingirem peso constante.

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

Os ensaios de TPA conduzidos às amostras anteriormente postas em equilíbrio com o sal foram realizados em um texturômetro TA – XT2i (Texture Analyzer, Stable Micro Systems), utilizando-se um probe circular de acrílico de 35 mm de diâmetro e empregando deformação de 10%, velocidade de compressão de 1 mm/s e um intervalo de tempo entre as duas compressões de 2 s (SILVA, 2004). Os resultados foram fornecidos pelo software Texture Expert V.1.22 (Stable Micro Systems) e uma média foi calculada a partir de cinco réplicas para cada condição de liofilização experimental fixada.

2.5 Reidratação

Após as amostras terem atingido a umidade de equilíbrio no dessecador contendo a solução saturada de (K_2CO_3), as mesmas foram pesadas e, em seguida, transferidas para um béquer, no qual se introduziu um volume de 100 mL de água destilada. O tempo de reidratação das amostras foi estabelecido em 5 min em temperatura ambiente. Posteriormente a esse tempo de contato com a água, as amostras foram colocadas em descanso em papel absorvente por 10 min expostas ao ar ambiente e novamente pesadas (NICOLETI, 2005). O índice de reidratação foi obtido pelo quociente entre as massas registradas após e antes da reidratação pela média de cinco réplicas.

3 Resultados e discussão

Pelos perfis de temperaturas monitorados na superfície e no centro das fatias de abacaxi, foi possível obter as taxas de congelamento de acordo com a Equação 1 (MARQUES et al., 2007):

$$\theta = \frac{(0 - T_f)}{\Delta t} \quad (1)$$

em que: θ = taxa de congelamento, dada em $^{\circ}C.min^{-1}$; T_f = temperatura de equilíbrio ao final do congelamento; Δt = intervalo de tempo necessário para que o centro térmico da amostra passe de $T = 0^{\circ}C$ para $T = T_f$.

Os valores encontrados pela Equação 1, variando as espessuras de fatias de abacaxi e as temperaturas do ar de congelamento, são apresentados na Tabela 1. A análise de variância (ANOVA) mostrou que ambas as variáveis independentes apresentaram efeito linear (L) significativo no nível de 95% ($p < 0,05$).

Como esperado, houve um aumento nas taxas de congelamento com a redução da temperatura de congelamento e com a diminuição da espessura das fatias. No entanto, todas as condições de congelamento testadas neste trabalho podem ser classificadas como condições de congelamento lento.

Tabela 1. Taxas de congelamento das fatias de abacaxi em função da temperatura do ar de congelamento e da espessura das fatias de abacaxi.

| Espessura da fatia (cm) | Temperatura do ar de congelamento ($^{\circ}C$) | Taxa de congelamento ($^{\circ}C.min^{-1}$) |
|-------------------------|---|---|
| 0,5 | -14 | 0,067 |
| 1,0 | -14 | 0,054 |
| 1,5 | -14 | 0,031 |
| 0,5 | -24 | 0,135 |
| 1,0 | -24 | 0,074 |
| 1,5 | -24 | 0,067 |
| 0,5 | -34 | 0,377 |
| 1,0 | -34 | 0,220 |
| 1,5 | -34 | 0,138 |

3.1 Cinética de secagem

De acordo com a Figura 1, a maior parte das curvas segue a mesma tendência de comportamento em sua parte inicial, de modo que se optou por ajustar a solução analítica da Segunda Lei de Fick para placas planas aos pontos correspondentes às 7,5 h iniciais da secagem, a fim de estabelecer uma comparação dos efeitos da espessura da fatia e da temperatura do ar de congelamento sobre a difusividade efetiva (D_{eff}) da água nas fatias de abacaxi durante o início da liofilização.

Considerou-se apenas o primeiro termo da série infinita, o qual pode ser linearizado, permitindo o cálculo da difusividade efetiva a partir do valor do coeficiente angular das curvas de $\ln(X/X_0)$ em função do tempo (t).

Utilizando o programa computacional Origin versão 6.0 Professional, obtiveram-se os valores de difusividade efetiva e dos coeficientes de determinação (R^2) conforme a Tabela 2.

Observa-se que a difusividade efetiva correspondente ao período inicial da liofilização ($t \leq 7,5$ h) foi fortemente influenciada pelas condições de congelamento da fatia, já que estas se refletem na taxa de congelamento. Como já referido, a taxa de congelamento tem grande influência sobre a distribuição dos poros no material a ser seco e, conseqüentemente, influencia as taxas de transferência de massa.

A análise dos efeitos das condições de congelamento sobre a difusividade efetiva pode ser feita de forma mais abrangente a partir do gráfico de superfície (Figura 2). Por meio da análise de variância (Tabela 3), verificou-se que tanto a espessura das fatias quanto a temperatura de congelamento tiveram efeitos significativos sobre a difusividade efetiva ($p < 0,05$).

A difusividade foi maior nas fatias de maior espessura, o que pode estar relacionado ao fato de que, nessas condições, as taxas de congelamento

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

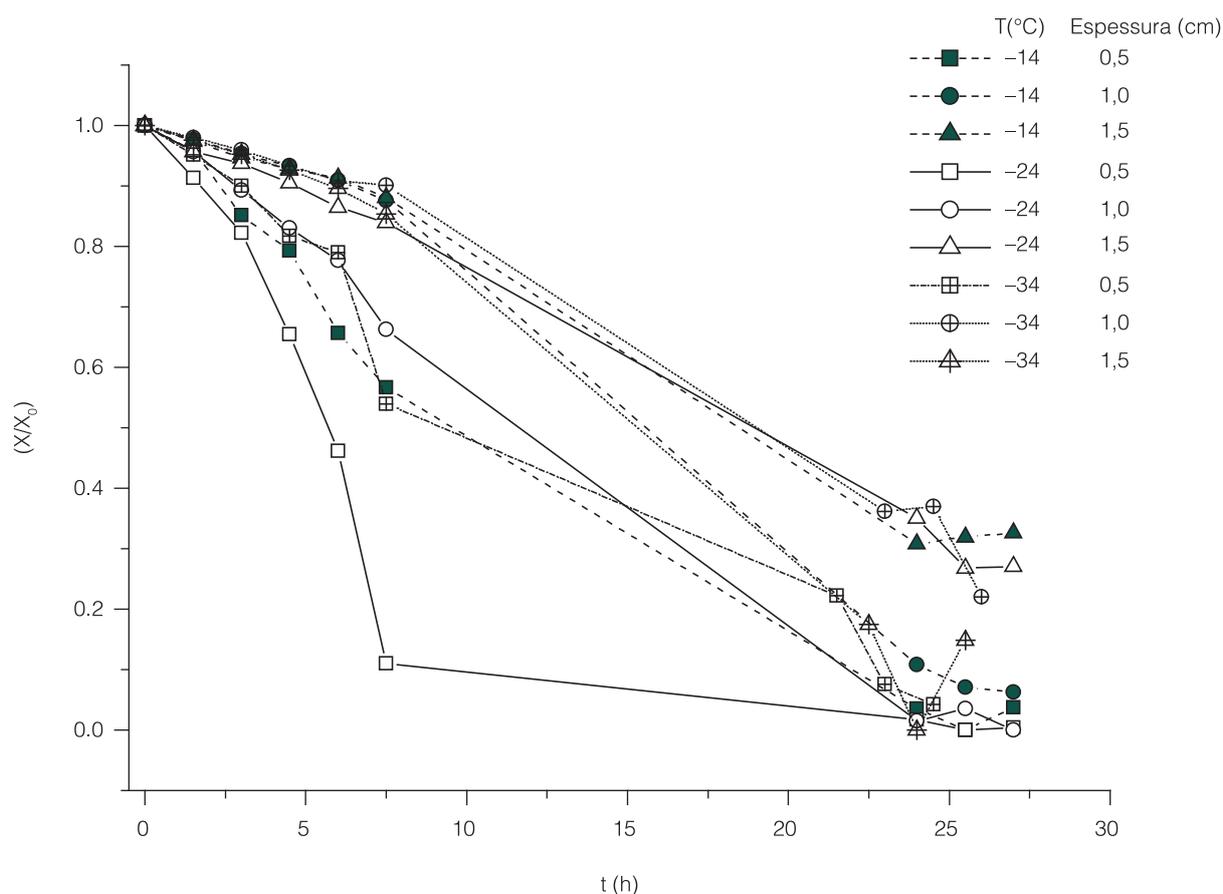


Figura 1. Efeito da espessura das fatias de abacaxi e da temperatura do ar de congelamento sobre a cinética de secagem.

Tabela 2. Valores de difusividade efetiva obtidos pelo ajuste da Segunda Lei de Fick linearizada ao período inicial da liofilização ($t \leq 7,5$ h).

| Temperatura do ar de congelamento (°C) | Espessura (cm) | Difusividade efetiva ($D_{ef} \times 10^{10}, m^2.s^{-1}$) | (R ²) |
|--|----------------|--|-------------------|
| -14 | 0,5 | 2,17 | 0,961 |
| -14 | 1,0 | 1,93 | 0,992 |
| -14 | 1,5 | 4,08 | 0,989 |
| -24 | 0,5 | 3,52 | 0,920 |
| -24 | 1,0 | 5,90 | 0,957 |
| -24 | 1,5 | 5,85 | 0,992 |
| -34 | 0,5 | 1,17 | 0,981 |
| -34 | 1,0 | 1,66 | 0,988 |
| -34 | 1,5 | 5,19 | 0,979 |

Tabela 3. Análise de variância dos dados de difusividade efetiva em função da espessura da fatia e da temperatura de congelamento.

| Fator | SQ | gl | QM | F | p |
|---------------------|------------------------|----|------------------------|-------|-------|
| Temperatura (L + Q) | $1,14 \times 10^{-19}$ | 2 | $5,72 \times 10^{-20}$ | 6,06 | 0,046 |
| Espessura (L) | $1,13 \times 10^{-19}$ | 1 | $1,13 \times 10^{-19}$ | 12,00 | 0,018 |
| Erro | $4,72 \times 10^{-20}$ | 5 | $9,44 \times 10^{-19}$ | | |
| SQ total | $2,75 \times 10^{-19}$ | 8 | | | |

SQ: Soma dos quadrados dos resíduos; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio.

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

foram menores, gerando cristais maiores e deixando o produto com poros também maiores. Por outro lado, quanto ao efeito da temperatura, os maiores valores de difusividade foram observados na temperatura de congelamento intermediária ($-24\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esse resultado pode estar refletindo a interação de dois fatores: por um lado, na menor temperatura ($-34\text{ }^{\circ}\text{C}$), os cristais formados podem ter sido menores, levando à formação de poros menores e com menor destruição do tecido celular do que no produto congelado a $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$; por outro lado, o congelamento a $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$ pode não ter sido suficiente para congelar uma fração significativa da água presente na fruta, causando o colapso da matriz durante a liofilização e diminuindo a eficiência do processo.

Poucos trabalhos levam em consideração a cinética de secagem nos processos de liofilização de frutas, sendo outros métodos de secagem, como os convencionais a ar quente, bastante discutidos. Krokida e Philippopoulos (2006) avaliaram a cinética de secagem durante a liofilização de maçãs, porém empregaram apenas uma condição de congelamento do produto, que foi de $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ por 48 h, combinado com imersão em N_2 líquido por 1 h. Ainda podem-se encontrar em Stawczyk (2007) dados de cinética de secagem de maçãs congeladas empregando gás frio produzido por bomba de calor para promover a sublimação do gelo.

3.2 Vitamina C

A variação da retenção do conteúdo de vitamina C em função de duas variáveis responsáveis pelo congelamento – espessura das fatias de abacaxi e temperatura do ar de congelamento – é apresentada na Figura 3. A análise de variância (Tabela 4) mostrou que nenhum dos efeitos foi significativo no nível de 95%. Porém, o efeito linear (L) da espessura das fatias mostrou um nível de significância (93%, $p < 0,07$) bem maior do que a temperatura do ar de congelamento (82%, $p < 0,18$).

Observa-se maior retenção de vitamina C para as fatias de menor espessura, o que pode ser atribuído à maior taxa de congelamento e, conseqüentemente, ao menor tempo de secagem observado nessas condições. Nesse caso, os cristais de gelo formados são menores, levando à menor destruição do tecido celular e favorecendo a preservação do nutriente no interior do produto. Por outro lado, em relação à temperatura de congelamento, esse efeito não é tão claro, com um máximo de retenção sendo observado na temperatura intermediária ($-24\text{ }^{\circ}\text{C}$). Uma explicação para esse resultado aparentemente contraditório pode ser encontrada analisando-se a grande variação do teor inicial de vitamina C, bem como do teor de sólidos solúveis das amostras, os quais devem estar associados a diferentes estágios de maturação das frutas. Marques et al. (2007) observaram que a retenção de

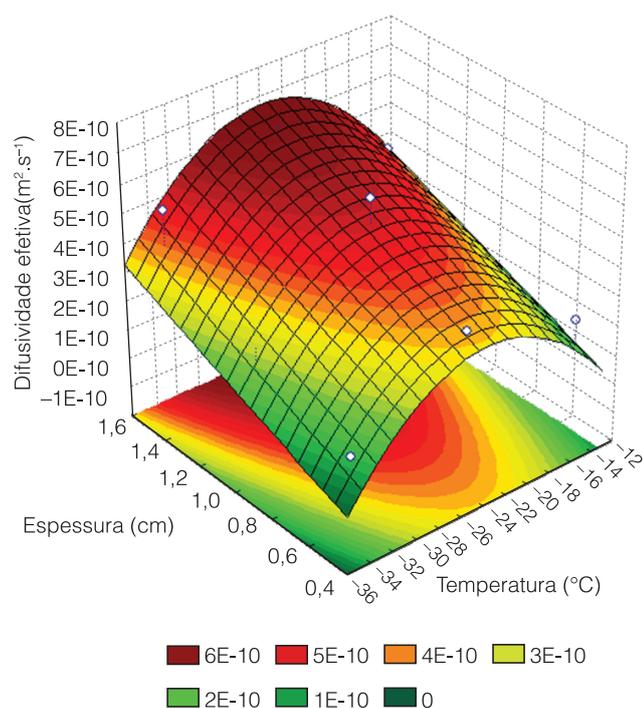


Figura 2. Efeitos da espessura das fatias e da temperatura de congelamento sobre a retenção de vitamina C durante a liofilização.

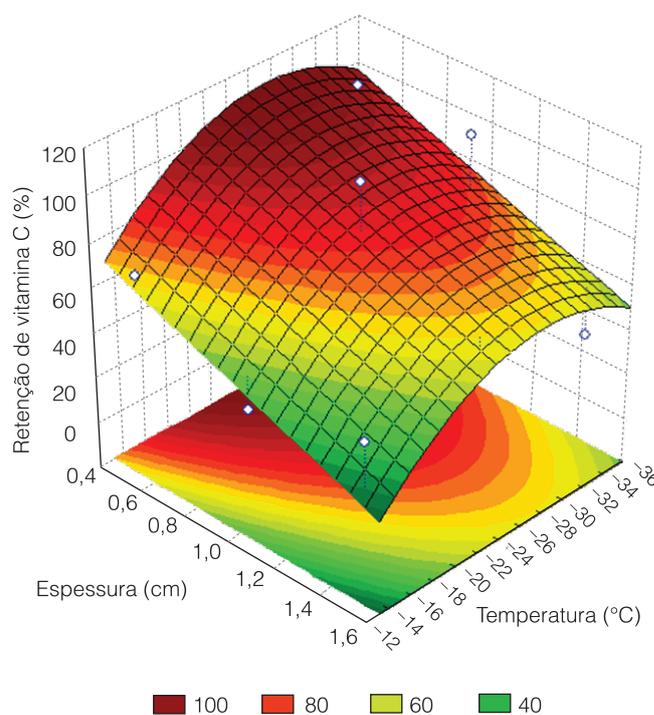


Figura 3. Efeitos da espessura das fatias e da temperatura do ar de congelamento sobre a retenção de vitamina C durante a liofilização.

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

Tabela 4. Análise de variância dos dados de retenção de vitamina C em função da espessura da fatia e da temperatura de congelamento.

| Fator | SQ | gl | QM | F | p |
|---------------------|--------|----|--------|------|-------|
| Temperatura (L + Q) | 2180,6 | 2 | 1090,3 | 2,56 | 0,172 |
| Espessura (L) | 2318,7 | 1 | 2318,7 | 5,44 | 0,067 |
| Erro | 2132,2 | 5 | 426,4 | | |
| SQ total | 6631,5 | 8 | | | |

SQ: Soma dos quadrados dos resíduos; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio.

vitamina C durante o processo de liofilização de acerolas é fortemente dependente do estágio de maturação da fruta, sendo as maiores perdas (69,3 e 51,6%) observadas para acerolas verdes e completamente maduras, respectivamente.

3.3 Reidratação

Os índices de reidratação obtidos variaram na faixa de 1,08 a 1,71, ficando na mesma faixa obtida por Nicoletti (2001) para fatias de abacaxi desidratadas por ar quente.

Os efeitos das temperaturas do ar de congelamento e das espessuras das fatias de abacaxi foram avaliados por meio do gráfico de superfície apresentado na Figura 4. Como mostra a Tabela 5, ambos os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) da espessura das fatias e da temperatura de congelamento foram significativos no nível 95% ($p < 0,05$).

O índice de reidratação foi maior para as maiores temperaturas de congelamento (menor taxa de congelamento), o que pode estar refletindo o efeito da maior destruição do tecido celular causada pelo congelamento mais lento. Esse comportamento está de acordo com os resultados observados para vários outros produtos liofilizados (HAMMAMI e RENÉ, 1997).

O aumento do índice de reidratação observado com a redução da espessura das fatias mostrou-se um comportamento contrário ao esperado, pois as fatias de menor espessura apresentaram as maiores taxas de congelamento. Esse comportamento contraditório poderia ser resultado da própria metodologia de reidratação adotada. Nesse caso, a etapa inicial de acondicionamento em umidade relativa constante, a qual já causou certo grau de reidratação no produto, pode ter provocado o colapso estrutural das fatias ao longo do tempo, prejudicando a reidratação na etapa final. Marques et al. (2009), estudando a cinética de reidratação de diferentes frutas tropicais liofilizadas, concluíram que o colapso do material observado durante o próprio processo de reidratação foi responsável pelos menores índices de reidratação atingidos ao final do mesmo. A propriedade de reidratação, ou seja, a facilidade de reconstituição, dependendo do alimento, tem maior importância para a sua boa aceitação.

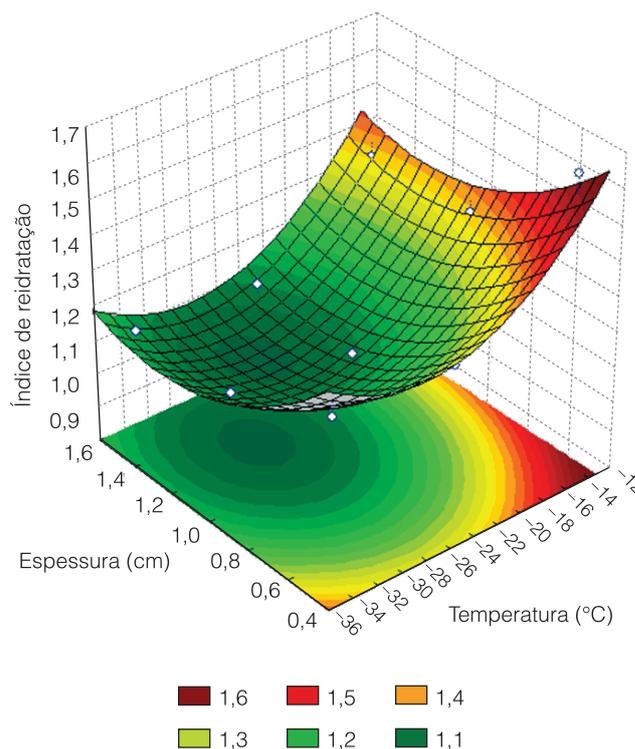


Figura 4. Efeitos da espessura das fatias e da temperatura de congelamento sobre o índice de reidratação das fatias de abacaxi liofilizadas e condicionadas a $a_w = 0,432$.

3.4 Textura

O grau de dureza de um alimento é correlacionado a partir de duas compressões uniaxiais, com um intervalo de relaxamento entre ambas. Com os dados de *força versus tempo* obtidos por esse ensaio, é possível obter o parâmetro dureza (BOURNE, 2002). Com os resultados experimentais coletados no texturômetro, fez-se uma análise dessa grandeza.

A Figura 5 ilustra um gráfico de superfície em que se pode visualizar o efeito das variáveis consideradas, enquanto a Tabela 6 registra os resultados da análise de variância, a qual demonstrou que apenas o efeito da espessura das fatias foi significativo no nível de 95% ($p < 0,05$).

Observa-se uma tendência de maior dureza em amostras de espessura e temperatura de congelamento intermediário. De forma aproximada, pode-se considerar

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

Tabela 5. Análise de variância dos dados de reidratação em função da espessura da fatia e da temperatura do ar de congelamento.

| Fator | SQ | gl | QM | F | p |
|---------------------|-------|----|-------|------|-------|
| Temperatura (L + Q) | 0,153 | 2 | 0,076 | 33,3 | 0,003 |
| Espessura (L + Q) | 0,073 | 2 | 0,037 | 15,9 | 0,012 |
| Erro | 0,009 | 4 | 0,002 | | |
| SQ total | 0,235 | 8 | | | |

SQ: Soma dos quadrados dos resíduos; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio.

Tabela 6. Análise de variância dos dados de dureza em função da espessura da fatia e da temperatura de congelamento.

| Fator | SQ | gl | QM | F | p |
|---------------------|--------|----|-------|------|-------|
| Temperatura (L + Q) | 32368 | 2 | 16184 | 2,53 | 0,194 |
| Espessura (L + Q) | 104222 | 2 | 52111 | 8,15 | 0,039 |
| Erro | 25566 | 4 | 6392 | | |
| SQ total | 162156 | 8 | | | |

SQ: Soma dos quadrados dos resíduos; GL: Graus de liberdade; QM: Quadrado médio.

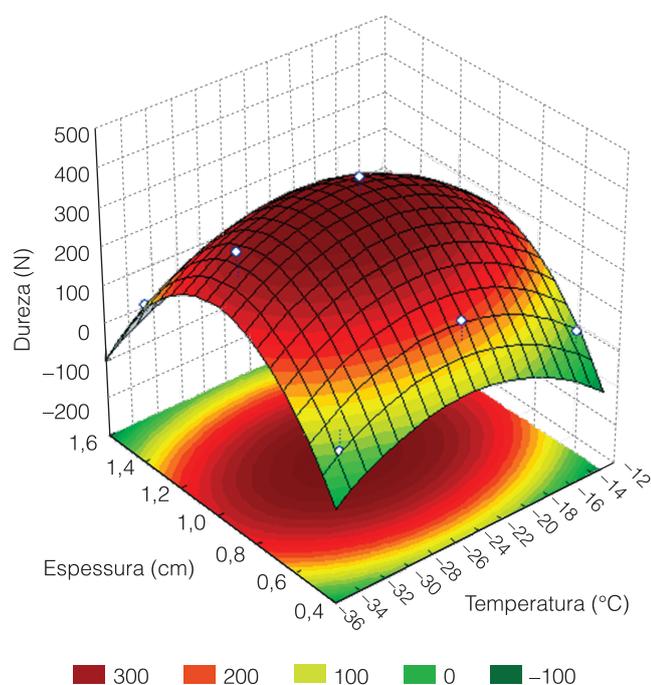


Figura 5. Efeitos da espessura das fatias e da temperatura de congelamento sobre a dureza das fatias de abacaxi liofilizadas e condicionadas em $a_w = 0,432$.

que as combinações de espessura e temperatura que resultaram em maior dureza são aquelas que apresentaram menor índice de reidratação. Este é um resultado que pode ser explicado pelo grau de colapso sofrido pelas amostras, seja durante a liofilização propriamente dita, seja pela etapa de acondicionamento em umidade relativa constante.

De acordo com Hammami e René (1997), as condições de congelamento que mais bem preservam a textura de produtos liofilizados são as que oferecem altas taxas de congelamento. Esse efeito foi observado

nos resultados deste trabalho, porém a dureza também foi menor para amostras de maior espessura, o que não pode ser explicado com esse argumento. Existem poucos trabalhos publicados sobre a textura de frutas liofilizadas em pedaços, dificultando a comparação com os resultados de outros autores.

4 Conclusões

Os resultados do presente trabalho mostraram que existe uma forte dependência da cinética de secagem e dos atributos de qualidade de fatias de abacaxi liofilizadas em função das condições utilizadas durante a etapa de congelamento, mesmo sendo este classificado como congelamento lento. Em relação à difusividade efetiva e ao teor de vitamina C retido ao final do processo, o comportamento dessas variáveis teve efeitos distintos quanto à espessura das fatias, sendo maior a retenção de vitamina C para as fatias de menor espessura enquanto a difusividades efetiva de maiores valores foram observadas para as fatias mais grossas; porém, a temperatura do ar de congelamento intermediária ($-24\text{ }^{\circ}\text{C}$) foi a mais favorável para ambas as espessuras. O maior grau de dureza foi encontrado nas amostras submetidas a condições intermediárias de temperatura de congelamento e de espessura (1,0 cm), enquanto o índice de reidratação mostrou-se mais vantajoso em temperaturas mais altas de congelamento e em fatias mais finas.

Referências

ADE-OMOWAYE, B. I. O.; RASTOGI, N. K.; ANGERSBACH, A.; KNORR, D. Combined effects of pulsed electric field pre-treatment and partial osmotic dehydration on air drying behaviour of red bell pepper. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 60, n. 1, p. 89-98, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00021-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00021-9)

Liofilização de fatias de abacaxi: avaliação da cinética de secagem e da qualidade do produto

VIEIRA, A. P. et al.

- ANTONIALI, S. S.; SANCHES, J. **Abacaxi: Importância Econômica e Nutricional**. IAC, 2008. Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Abacaxi_Clima/Abacaxi.htm>. Acesso em: 20 nov. 2009.
- BAGLEY, E. B.; CHRISTIANSON, D. D. Measurement and interpretation of rheological properties of foods. **Food Technology**, Chicago, v. 41, n. 3, p. 96-99, 1987.
- BENASSI, M. T.; ANTUNES, A. J. A comparison of metaphosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, Curitiba, v. 34, n. 4, p. 507-513, 1988.
- BOURNE, M. **Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 2002. 427 p.
- FENNEMA, O. R. Loss of vitamins in fresh and frozen foods. **Food Technology**, Chicago, v. 31, n. 12, p. 32, 1977.
- FERREIRA, D.; SILVA, J. A. L.; PINTO, G.; SANTOS, C.; DELGADILLO, I.; COIMBRA, M. A. Effect of sundrying on microstructure and texture of S. Bartolomeu pears (*Pyrus communis* L.). **European Food Research and Technology**, New York, v. 226, n. 6, p. 1545-1552, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s00217-007-0685-x>
- GABAS, A. L.; TELIS-ROMERO, J.; MENEGALLI, F. Effect of chemical pretreatment on the physical properties of dehydrated grapes. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 17, n. 6, p. 1215-1226, 1999. <http://dx.doi.org/10.1080/07373939908917606>
- GABAS, A. L.; MENEGALLI, F. C.; FERRARI, F.; TELIS-ROMERO, J. T. Influence of drying conditions on the rheological properties of prunes. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 7, p. 1485-1502, 2002. <http://dx.doi.org/10.1081/DRT-120005863>
- HAMMAMI, C.; RENÉ, F. Determination of freeze-drying process variables for strawberries. **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 32, p. 133-154, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774\(97\)00023-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0260-8774(97)00023-X)
- IBARZ, A.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. **Deshidratación y Operaciones Unitarias en la Ingeniería de Alimentos**, Lancaster, Basel, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. IBGE, 2010. Disponível em <www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/.../lspa/lspa_201011.pdf>. Acesso em: 27 junho 2011.
- KROKIDA, M. K.; PHILIPPOPOULOS, C. Volatility of apples during air and freeze drying. **Journal of Food Engineering**, v. 73, n. 2, p. 135-141, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.01.012>
- MADRAU, M. A.; PISCOPO, A.; SANGUINETTI, A. M.; DEL CARO, A.; POIANA, M.; ROMEO, F. V.; PIGA, A. Effect of drying temperature on polyphenolic content and antioxidant activity of apricots. **European Food Research and Technology**, New York, v. 228, n. 3, p. 441-448, 2009. <http://dx.doi.org/10.1007/s00217-008-0951-6>
- MARQUES, L. G.; FERREIRA, M. C.; FREIRE, J. T. Freeze drying of acerola (*Malpighia glabra* L.). **Chemical Engineering and Processing**, Lausanne, v. 46, n. 5, p. 451-457, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2006.04.011>
- MARQUES, L. G.; PRADO, M. M.; FREIRE, J. T. Rehydration characteristics of freeze dried tropical fruits. **LWT - Food Science and Technology**, Amsterdam, v.42, n. 7, p. 1232-1237, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2009.02.012>
- MEDINA, J. C.; BLEINROTH, E. W.; DE MARTIN, Z. J.; SOUZA JUNIOR, A. J.; LARA, J. C. C.; HASHIZUME, T.; MORETTI, V. A.; MARQUES, J. F. **Frutas Tropicais 2 - Abacaxi**. Instituto de Tecnologia de Alimentos - ITAL, 1978.
- MORGADO, R. H.; ABREU, J. D. A. Textura de sólidos y semisólidos. In: ALVARADO, E. D.; AGUILERA, J. D.; ZARAGOZA, J. M. (Eds). **Métodos para Medir Propriedades Físicas em Indústria de Alimentos**. Editora Acribia, Zaragoza, 2001. 410 p.
- NICOLETI, J. F. **Cinética de Secagem e Encolhimento de Fatias de Abacaxi**. 2001. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos)-Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2001.
- NICOLETI, J. F. **Secagem de Caqui Em Condições Controladas: Efeito Sobre a Qualidade do Produto e Consumo Energético**. 2005. 123 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- NICOLETI, J. F.; SILVEIRA JUNIOR, V.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Viscoelastic behavior of persimmons dried at constant air temperature. **LWT - Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 38, n. 2, p. 143-150, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lwt.2004.04.016>
- NICOLETI, J. F.; SILVEIRA JUNIOR, V.; TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N. Ascorbic acid degradation during convective drying of whole persimmons as affected by drying conditions. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 25, p. 891-899, 2007.
- SILVA, L. K. G. **Influência das Condições de Processo na Cinética de Secagem e na Textura de Abacaxi Orgânico Desidratado Utilizando Secador de Leito Fixo**. 2004. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos)-Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto, 2004.
- STAWCZYK, J.; LI, S.; WITROWAS-RAJCHERT, D.; FABISIAK, A. Kinetics of atmospheric freeze-drying of apple. **Transport in Porous Media**, Dordrecht, v. 66, n. 1-2, p. 159-172, 2007. <http://dx.doi.org/10.1007/s11242-006-9012-4>