

# Avaliação do tempo de congelamento da mangaba (*Hancornia Speciosa* Gomes) em ultrafreezer através dos modelos matemáticos de Planck e Pham

D. S. C. Soares; J. T. S. Santos; A. F. P. Campos; F. S. C. Costa; T. P. Nunes;  
A. M. O. Júnior<sup>1</sup>

*Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Sergipe, 49100-000, São Cristóvão-Se, Brasil*

*(Recebido em 06 de novembro de 2011; aceito em 02 de março de 2012)*

O trabalho teve a finalidade determinar a cinética de congelamento da polpa de mangaba em ultrafreezer através de modelos matemáticos propostos por Plank e Pham, e comparar os resultados destes com os dados obtidos experimentalmente, além de propor o modelo mais adequado para a cinética de congelamento. As propriedades termofísicas da polpa foram determinadas pelo modelo de contribuição de grupos de Choi e Okos. Verificou-se que a temperatura inicial de congelamento da polpa foi de aproximadamente  $-1^{\circ}\text{C}$  com um tempo de congelamento em torno de 11 minutos. Notou-se que o modelo de Pham é o mais apropriado para prever o tempo de congelamento da polpa de mangaba, pois apresentou um erro relativo de 1,45% em relação aos dados experimentais devido à inclusão dos termos entálpicos. Já o modelo proposto por Plank não se mostrou adequado com um erro relativo de 52,64%.

Palavras-chave: mangaba; congelamento rápido; cinética

The study aimed to determine the kinetics of freezing the pulp mangaba in ultrafreezer using mathematical models proposed by Plank and Pham, and compare these results with data obtained experimentally, besides proposing the most appropriate model for the freezing kinetics. The thermophysical properties of the pulp were determined by group contribution model of Choi and Okos. It was found that the initial temperature of pulp freezing was approximately  $-1^{\circ}\text{C}$  with a freezing time around 11 minutes. It was noted that the Pham model is most appropriate for predicting the freezing mangaba pulp time, because showed a relative error of 1.45% compared to the experimental data due to the inclusion of the terms of enthalpy. The model proposed by Plank was not adequate with a relative error of 52.64%.

Keywords: mangaba, quickfreeze, kinetic.

## 1. INTRODUÇÃO

No decorrer do tempo as frutas tropicais vêm conquistando seu espaço no mercado, pelo fato delas possuírem um sabor exótico diferenciado das demais frutas, além de serem boas fontes nutricionais. Dentre estas frutas encontra-se a mangaba, que apresenta grande potencial de exploração, principalmente na agroindústria. O fruto apresenta ótimo aroma e sabor, sendo utilizados principalmente na produção de doces, polpas, compotas, sorvetes e sucos, sua utilização industrial está cada vez mais sendo difundida, devido a sua grande aceitação. Aliado a este fato, a mangaba apresenta um alto rendimento de polpa, na ordem de 93,7% (VIEIRA, 1997).

A mangabeira (*Hancornia speciosa* Gomes) é uma árvore frutífera de clima tropical, nativa do Brasil e encontrada em várias regiões do País, desde os Tabuleiros Costeiros e Baixadas Litorâneas do Nordeste, onde é mais abundante, até os cerrados das regiões Centro-Oeste, Norte e Sudeste. Seu fruto, a mangaba, é classificado como climatérico, ou seja, pode amadurecer na planta ou após a colheita. Este aspecto proporciona a mangaba um elevado índice de perecibilidade, o que provoca a redução da vida útil do produto (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

A existência de alimentos deste tipo propicia o desenvolvimento de técnicas capazes de garantir sua conservação em longo prazo. Dentre elas, o congelamento surge como uma

tecnologia que alia qualidade à redução de perdas. Dessa maneira, a diminuição da temperatura como método de preservação de alimentos é de grande importância, pois se pode, por meio dela, retardar reações químicas e enzimáticas, decaindo assim o ritmo de crescimento microbiano (OETTERER, et. al., 2006).

Durante o congelamento, primeiramente o calor sensível é removido para diminuir a temperatura do alimento até o ponto de congelamento. Esta remoção pode interferir ou não na composição e estrutura do produto através da formação de cristais. Desta forma existe o congelamento lento, no qual há a formação de grandes cristais de gelo, pontiagudos, que provocam o rompimento das estruturas celulares, tendo como consequência a perda de suco celular e, portanto, redução do valor nutricional, durante o descongelamento. E em oposição, o congelamento rápido evita a formação de grandes cristais de gelo e a ruptura de membranas celulares, mantendo o valor nutricional do alimento (CORREIA, FARAONI, PINHEIRO-SANT'ANA, 2008).

O tempo de congelamento é um parâmetro difícil de determinação experimental com precisão devido às diferenças da temperatura inicial, no tamanho e forma dos alimentos, diferenças no ponto de congelamento e na taxa de formação dos cristais de gelo entre diferentes pontos do alimento, além de mudanças na densidade, condutividade térmica, calor específico e na difusividade térmica com a redução de temperatura do alimento (FELLOWS, 2006).

Os modelos teóricos existentes são baseados em equações razoavelmente precisas se as condições de contorno e a variação dos fatores envolvidos forem consideradas. Na prática, para a maioria dos casos, uma solução aproximada é baseada no modelo proposto por Plank, no entanto existem diversas adaptações que tem uma aplicação mais abrangente, como no caso do modelo de Pham.

Plank foi o primeiro a descrever a cinética e determinar o tempo de congelamento em produtos alimentícios. No seu primeiro trabalho ele apresentou uma fórmula para calcular o tempo de congelamento por um bloco de gelo. Diferentes formas geométricas foram consideradas: hastes dos cilindros, quadrática e retangulares. Um segundo método de cálculo similar foi usado para produtos alimentícios, porém apresentou como limitação a hipótese da forma regular para os alimentos (LEIVA, HALLSTROM, 2002). Este modelo está baseado em três relações simples: descreve a transferência de calor convectivo do meio de resfriamento à superfície do corpo, a segunda descreve a liberação de calor latente no ponto de congelamento e a terceira estabelece a transmissão de calor por condução através do material congelado. Plank ainda assume que a temperatura do material a ser congelado permanece no ponto de congelamento do início até o fim do processo e toda água do produto está na fase líquida antes da operação de congelamento.

O modelo de Pham é uma modificação da equação de Plank, que na realidade já era derivada de Rjutov. Ele descreve a cinética de congelamento utilizando formas irregulares dos alimentos, considerando-os similares a elipsóides. A equação de Pham supõe a liberação de calor latente à uma temperatura definida e despreza os efeitos de calor sensível. Como isto não acontece na prática, duas considerações são feitas: primeiro pela definição de um “ponto médio de congelamento um pouco abaixo do ponto de congelamento do material, já que o congelamento acontece numa faixa de temperatura; e segundo são calculadas separadamente as componentes do tempo devido ao pré-resfriamento, congelamento e super resfriamento (PHAM, 1996).

Deste modo, objetivou-se neste trabalho avaliar o tempo de congelamento da polpa de mangaba em um ultrafreezer, através dos modelos matemáticos de Plank e Pahm e compará-los com o tempo de congelamento obtido experimentalmente, assim como determinar qual o modelo é mais apropriado para a cinética de congelamento.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi conduzido no Laboratório de Processamento de Produtos de Origem Vegetal da Universidade Federal de Sergipe. Os frutos utilizados, neste experimento, foram adquiridos na praia do Abaís, Estância/SE e transportados para o Laboratório, à temperatura ambiente.

No laboratório, os frutos foram selecionados de acordo com o grau de maturação, aqueles que apresentavam coloração amarelada, com o teor de sólidos solúveis de aproximadamente de 15 ° Brix, além da aparência dos frutos, para os que apresentavam injúrias eram descartados. Em seguida, foi feita a sanitização dos frutos com solução de cloro a 200 ppm por 20 min, logo após estes foram lavados com água potável em abundância. Depois deste processo, os frutos foram submetidos a extração da polpa, que foi realizada em uma despoldadeira modelo Compacta nº 189, fase 220 m. Com isto, colheu-se amostras para as análises físico-químicas e para o congelamento em ultrafreezer da marca Sanio, modelo MDF.

## 2.1. Determinação das propriedades físico-químicas

As polpas de mangaba submetidas ao congelamento apresentaram espessura e diâmetro, com os valores de, 1,5 cm e 4,7 cm, respectivamente, Foi utilizado um paquímetro Mitutoyo com divisões de 0,01 mm. As amostras foram submetidas às análises de proteínas, umidade, fibras e cinzas de acordo com as metodologias descritas pelo Instituto Adolfo Lutz (1985). Estas foram realizadas em triplicata.

## 2.2. Cinética de congelamento das frutas

### 2.2.1. Tratamento experimental

Para determinar a cinética de congelamento da mangaba, foram colocados termopares, da marca MT 600, tipo K, no centro geométrico das fatias da polpa de mangaba dispostas em placa circular. A temperatura do freezer foi monitorada por termopar instalado próximo as amostras. Os dados de temperatura foram registrados a cada minuto, até que atingisse a temperatura próxima à de equilíbrio (-78,3°C).

Com o auxílio de termômetros digitais MT 600, foram obtidos dados de temperatura e tempo de congelamento com aquisição de dados em tempo real.

### 2.2.2. Modelos Matemáticos

Utilizou-se os modelos descritos por Plank e Pham para descrever a cinética e determinar o tempo de congelamento das fatias de polpa de mangaba, que tem um formato semelhante de placa. As propriedades termofísicas foram determinadas numericamente usando o modelo de Choi e Okos (1986). Os resultados encontrados foram comparados aos obtidos experimentalmente.

#### 2.2.2.1. Modelo de Plank

O modelo de Plank, permite determinar uma solução aproximada do tempo de congelamento das fatias da polpa de mangaba, de acordo com a equação 1.

$$t_F = \frac{\rho_f L_f}{T_F - T_a} \left( \frac{P^* a}{R} + \frac{R^* a^2}{K_f} \right) \quad (1)$$

Para o cálculo do calor latente ( $L_f$ ) utilizou-se a relação umidade do produto ( $U$ ) e calor latente de fusão da água, 333,2 KJ/Kg, conforme Equação 2.

$$L_f = U \cdot L \quad (2)$$

### 2.2.2.2. Equação de Pham

O modelo de Pham é descrito segundo a Equação 3, esta é calculada com o tempo total de congelamento de uma temperatura uniforme  $T_1$  até a temperatura final no centro da fatia em formato de placa.

$$t = \frac{\rho d_c}{2k} \left[ \frac{\Delta H_1}{\Delta T_1} + \frac{\Delta H_2}{\Delta T_2} \right] \left( 1 + \frac{Bt^*}{4} \right) \quad (3)$$

### 2.3. Determinação das propriedades termofísicas

As propriedades termofísicas são dependentes da composição e temperatura do alimento. Estas foram determinadas usando os modelos de Choi e Okos para massa específica, calor específico, difusividade e condutividade térmica. Os valores foram ponderados pela composição centesimal. A fórmula genérica deste modelo é dada pela Equação 4 :

$$\text{propriedade} = e + bT + cT^2 \quad (4)$$

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores obtidos da determinação das propriedades físico-químicas da polpa de mangaba encontram-se na Tabela 1. Com estes dados, podem-se estimar as propriedades termofísicas da fruta, pelo modelo de Choi e Okos (1986).

*Tabela 1. Propriedades físico-químicas da mangaba.*

Parâmetros	Amostra
Umidade (%)	72,39 ± 0,25
Lípidios (%)	11,01 ± 2,45
Carboidratos (%)	9,69 ± 1,67
Fibra Alimentar (%)	5,06 ± 1,94
Cinzas (%)	0,93 ± 0,45
Proteína (%)	0,93 ± 0,18

Com a análise da Tabela 1, percebe-se que a mangaba possui um elevado teor de umidade, o que possibilita a formação de uma curva de congelamento da fruta semelhante com a curva da água pura. As propriedades termofísicas da mangaba estão dispostas na Tabela 2. Estas são imprescindíveis para os cálculos do tempo de congelamento da mangaba.

*Tabela 2. Propriedades termofísicas da mangaba*

Parâmetros	Amostra
Massa específica(kg/m <sup>3</sup> )	1047,42
Calor específico (J/kg.°C)	3513,33
Difusividade térmica (m <sup>2</sup> /s)	1,03
Condutividade térmica (W/m °C)	0,48

Foi possível observar a cinética de congelamento através da Figura 1. Notou-se que a curva se aproximou com a curva da água devido ao alto teor de umidade existente na mangaba.

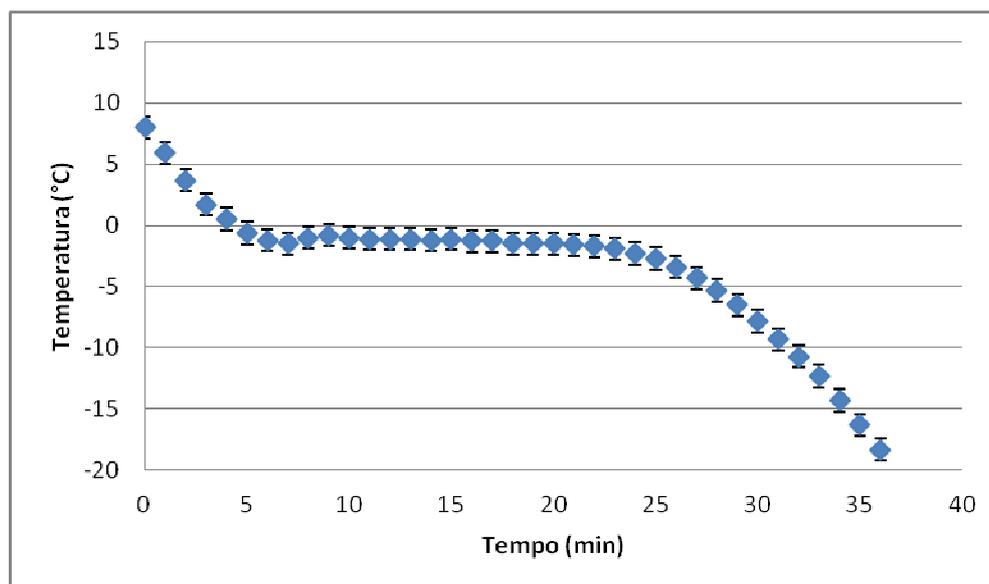


Figura 1. Curva de congelamento da mangaba em ultrafreezer.

Através da Figura 1, pode-se observar que a temperatura inicial ao ponto de sub-resfriamento,  $-1,1^{\circ}\text{C}$  ocorre uma retirada imediata de calor sensível, sem mudança de fase. O ponto de sub-resfriamento é abaixo de  $0^{\circ}\text{C}$  devido a existência de sólidos solúveis no produto antes da formação de cristais de gelo, devido ao estágio de maturação da polpa. Nos frutos neste estágio de maturação ocorre o aumento dos sólidos solúveis, além do que, a água presente na polpa ainda se encontra no estado líquido mesmo com a temperatura abaixo do seu ponto de congelamento. O início da nucleação acontece em  $-1,1^{\circ}\text{C}$ . Neste momento os cristais de gelo liberam calor latente de solidificação mais rápido do que a perda de calor para o meio, isto vai elevar a temperatura até  $-1^{\circ}\text{C}$ , que é o ponto inicial de congelamento da polpa. O período de congelamento compreende a região do ponto inicial de congelamento até  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . Nesta fase ocorre o aumento dos cristais de gelo e remoção do calor latente, assim como o aumento da concentração dos sólidos solúveis. Logo após o congelamento, a temperatura diminui através da retirada do calor sensível abaixo do ponto de congelamento até chegar em  $-78,3^{\circ}\text{C}$ . Para efeito de visualização, a curva de congelamento foi apresentada até a temperatura de  $-18,3^{\circ}\text{C}$ .

Por meio das propriedades termofísicas determinadas, foi possível calcular o número de Fourier, e estimar o número de Biot através do Diagrama de Heisler para uma placa plana, uma vez que a polpa foi disposta em placa circular de camada delgada. O coeficiente de transferência de calor estimado foi de  $263,3 \text{ W/m}^2\text{K}^{-1}$ . Desta forma foi possível estimar o tempo de congelamento teórico da polpa e mangaba madura, em camada delgada, no ultrafreezer, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3. Tempos de congelamento experimental e teóricos.

Modelo	Amostra da polpa madura	
	Tempo de congelamento (min)	Erro Relativo (%)
Experimental	11	-
Modelo de Plank	5,21	52,6
Modelo de Pahn	10,84	1,4

Com isto observa-se que o modelo de Pham se aproxima mais com o tempo obtido pelo experimento. Isto implica que os parâmetros acrescentados na equação fornecem um resultado mais acurado e próximo ao da realidade, como no caso o uso da entalpia. Por outro lado o modelo de Plank, não teve um resultado satisfatório, pelo fato de que o próprio apresenta limitações, considera o mesmo tempo de congelamento do início ao fim, a densidade, a

condutividade térmica e o calor específico do alimento permanecem constantes, além de que as perdas de calor sensíveis são ignoradas.

#### 4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, verifica-se que a curva de congelamento da polpa de mangaba em ultrafreezer disposta em placa circular com camada delgada são semelhantes à curva de congelamento da água pelo fato de a mesma possuir um elevado teor de umidade. A modelagem matemática proposta por Pham foi mais apropriada com um tempo de 10,8 min quando comparado com o obtido experimentalmente, 11 min, este apresentou um erro relativo de 1,54%. Já o modelo proposto por Plank com um tempo de 5,2 min proporcionou um erro relativo de 52,64%. Com isto o modelo de Pham forneceu resultado satisfatório, e o modelo de Plank, sem os ajustes entápicos, apresentou tempo de congelamento inapropriado, com erro relativo superior a 50%. A determinação do tempo de congelamento é um parâmetro fundamental para os processos industriais que envolvem o congelamento de alimentos.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Iniciação Científica e pelo apoio financeiro necessário para a realização do experimento, e a UFS pelo apoio estrutural.

- 
1. ARAÚJO, M. S. O.; BRAGA, M. E. D.; MATA, M. E. R. M. C. Cinética de congelamento de polpa de acerola a baixas temperaturas. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.2, n.1, p.27-34, 2000.
  2. CHITARRA, M.I.F; CHITARRA, A.B. Pós colheita de frutas e hortaliças: Fisiologia e manuseio. 2.ed., Lavras, UFLA, 2005.
  3. CORREIA, L. F. M.; FARAONI, A. S.; PINHEIROSANT'ANA,H. M. Effects of industrial foods processing on vitamins stability. *Alim. Nutr.*, Araraquara, v.19, n.1,p. 83-95, jan./mar. 2008.
  4. FELLOWS, P. J. Tecnologia do processamento de alimentos: princípios e prática. 2 ed., 430 p., Porto Alegre: Artmed, 2006.
  5. IAL. Instituto Adolfo Lutz. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos. 3. ed. São Paulo, 1985. 533 p.
  6. IBARZ, A.; CÁNOVAS, B.; GUSTAVO V. Unit operations in food engineering: Food preservation technology. CRC PRESS, 2003.
  7. LÓPEZ-LEIVA, M. BENGT H. The original Plank equation and its use in the development of food freezing rate predictions. *Journal of Food Engineering*, 58, pp. 267-275, 2003.
  8. MELO, A.S.; Fruteiras potenciais para os Tabuleiros Costeiros e Baixadas Litorâneas. Embrapa, 2002.
  9. OETTERER, M; SPOTO, M.H.F;REGITANO-d'ARCE. Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos. São Paulo, Manole, 2006.
  10. SINGH R. P.; HELDMAN D. R. Introduction to Food Engineering, 4 edição, 2008.
  11. VIEIRA, R. F.; et. Al. Frutas nativas - Centro-Oeste – Brasil. I. 1ed. Brasília, Embrapa, 2006.