

ESTIMATIVA DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO REQUEIJÃO CREMOSO TRADICIONAL SOB RESFRIAMENTO

ESTIMATION OF THE THERMAL DIFFUSIVITY OF TRADITIONAL SPREADABLE CHEESE UNDER REFRIGERATION

JONATHAN DA SILVA FERNANDES

Químico Industrial pela Universidade Estadual de Goiás / CCET
jhonessednaref@gmail.com

ORLENE SILVA DA COSTA

Professora Doutora da Universidade Estadual de Goiás / CCET / Curso de Química
Industrial
orlene_costa@yahoo.com.br

JOSÉ DE SOUZA SALES

Professor Doutor da Universidade Estadual de Goiás / CCET / Curso de Engenharia
Civil
jose.sales@ueg.br

JONAS ALVES VIEIRA

Professor Doutor da Universidade Estadual de Goiás / CCET / Curso de Química
Industrial
jonas@ueg.br

Resumo: Requeijão, espécie de queijo fundido de origem brasileira, requer condições específicas de temperatura, durante e após o processamento, como a refrigeração. Sendo importante a determinação da difusividade térmica, que relaciona a habilidade de conduzir e armazenar energia do material para projetos de equipamentos. Este trabalho visou a estimativa da difusividade térmica (α) do requeijão cremoso tradicional, quando submetido ao resfriamento, a fim de suprir a escassez de dados para uma formulação específica. Um sistema de transmissão de calor foi construído com um recipiente cilíndrico metálico contendo o requeijão, isolado termicamente no topo e na base, para promover um fluxo de retirada de calor unidimensional radial, por condução e em regime transiente. Três termômetros (T_1 , T_2 e T_3) foram instalados na tampa de isopor nas posições radiais ($r_1 = 0,0$ cm, $r_2 = 2,8$ cm e $r_3 = 5,8$ cm) para registrar as temperaturas em função do tempo. Os dados da distribuição de calor encontrados experimentalmente estavam de acordo com a previsão teórica, mostrando um decaimento adiabático. A partir desses dados, temperatura *versus* tempo, curvas de $T(r, t)$ foram geradas em função de α , via Maple. Desta forma, o valor médio da difusividade térmica para o requeijão cremoso tradicional foi estimado igual a $3,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, por meio de um método simples e pouco dispendioso, na mesma ordem de grandeza do queijo *cheddar* ($1,07 \cdot 10^{-7}$ a $1,536 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Porém, fora da faixa de α_{queijo} , provavelmente porque o requeijão cremoso tradicional tem menor quantidade de água, diminuindo a capacidade térmica e, conseqüentemente, aumentando a difusividade térmica.

Palavras-chave: Calor. Condutividade térmica. Queijo. Coalhada. Maple.

Abstract: Spreadable cheese, which is a type of processed cheese of Brazilian origin, requires specific temperature conditions during and after its processing, such as refrigeration. It is important to determine the thermal diffusivity that relates the ability to conduct and store energy from the material for equipment projects. This study aimed at estimating the thermal diffusivity (α) of traditional spreadable cheese when submitted to cooling, in order to fill the scarcity of data for a specific formulation. A heat transfer system was constructed with a metal cylindrical vessel containing spreadable cheese thermally insulated at the top and base to promote a radial one-dimensional heat withdrawal flow by conduction and at a transient regime. Three thermometers T_1 , T_2 and T_3 were installed to the styrofoam cap in the radial positions ($r_1 = 0.0$ cm, $r_2 = 2.8$ cm and $r_3 = 5.8$ cm) to register the temperatures as a function of time. The heat distribution data found experimentally were in

agreement with the theoretical prediction showing an adiabatic decay. From these data, temperatures versus time curves of $T(r, t)$ were generated as a function of α , via Maple. Thus, the average thermal diffusivity value for the traditional spreadable cheese was estimated as $3,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, using a simple and inexpensive method, in the same order of magnitude of cheddar cheese ($1,07 \cdot 10^{-7}$ a $1,536 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). However, outside of the range of α_{cheese} , probably because traditional spreadable cheese has less water which reduces thermal capacity and consequently increases thermal diffusivity.

Keywords: Heat. Thermal conductivity. Cheese. Curd. Maple.

INTRODUÇÃO

O requeijão é uma espécie de queijo fundido, um produto típico brasileiro, obtido pela fusão da massa fresca coalhada do leite (por meio do coalho), dessorada, lavada e misturada com creme, gordura e/ou nata, água e sal fundente. É fabricado em todo o território nacional, desde a produção caseira e artesanal até a industrial de grande porte, fator que contribui para existência de diferentes tecnologias de processamento. De acordo com o modo de preparo e a região do Brasil onde é fabricado, um nome típico é designado a esse produto, sendo conhecido como: a) requeijão do Nordeste ou do Norte, ou ainda, requeijão de manteiga; b) requeijão mineiro ou crioulo e c) requeijão do sul. Conferindo a este produto uma grande variedade a ser encontrada no mercado (VAN DENDER, 2013; SILVA *et al.*, 2011).

A Portaria n. 359, de 04/09/1997, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), classifica esse produto lácteo como: 1) requeijão, 2) requeijão cremoso e 3) requeijão de manteiga ou requeijão do norte. Os três tipos de produtos são obtidos da fusão de uma massa coalhada, cozida ou não, dessorada e lavada, sendo a coalhada realizada por meio de coagulação ácida e/ou enzimática do leite. Opcionalmente, adiciona-se creme de leite, e/ou manteiga, e/ou gordura anidra de leite (ou *butter oil*). O produto ainda poderá conter condimentos, especiarias e/ou outras substâncias alimentícias. A diferença entre o requeijão, requeijão cremoso e requeijão de manteiga reside nos teores de gordura em extrato seco (mínimo de 55 %) e umidade (máxima de 65 %). Em geral, o requeijão cremoso é composto com 38 a 40 % de extrato seco total, 60 a 62 % de gordura no extrato seco, 30 a 33 % de nitrogênio total, 1,0 a 1,5 % de cloreto de sódio e pH entre 5,2 e 5,7 (BELSITO, 2016; VAN DENDER, 2014; BRASIL, 1997).

O requeijão cremoso é encontrado no mercado sob duas formas, tradicional e culinário. O requeijão cremoso tradicional é normalmente comercializado em copo e apresenta a característica de formar fios com uma textura untável. E o requeijão culinário é vendido geralmente na forma de bisnaga, apresentando uma consistência entre a do requeijão de barra e a do requeijão cremoso, permitindo o envase em bisnagas e posterior escoamento, e quando utilizado como ingredientes em pizzas e salgados, tem a característica de não derreter sob

condições de forneamento. A legislação brasileira não menciona o requeijão culinário, sendo portanto classificado como cremoso (DIAS, 2015).

O requeijão cremoso também pode vir nas versões comerciais: A) *light* – com 25 % de redução de gordura, sódio, calorias e/ou até proteínas; B) *diet* – isento de algum ingrediente como açúcares, carboidratos e proteínas, sendo indicado para quem possui exigências alimentares específicas; C) sem lactose – isento de lactose e D) zero lactose *light* – livre de açúcar, bem como a gordura é reduzida para um público que possui diabetes e intolerância a lactose (ANVISA, 2016; OLIVEIRA, 2013; VAN DENDER, 2013; PEREIRA, 2013).

Por ser o requeijão um produto derivado do leite, ele também apresenta um grande valor nutricional, pois é constituído de proteínas, carboidratos, gorduras, sais minerais, vitaminas e água. Sendo também considerado como uma fonte de cálcio de maior proporção de biodisponibilidade, uma vez que este elemento químico é o mineral de principal aproveitamento dentro do organismo humano, atuando para a formação e a manutenção estrutural dos ossos e dos dentes e no sistema circulatório, juntamente com a vitamina K, auxiliando na coagulação do sangue (BRINGEL *et al.*, 2014; CAMPOS *et al.*, 2003).

Assim como o queijo, o requeijão tem lugar de destaque entre os consumidores por seu alto valor nutritivo e grande aceitabilidade. É uma forma de preservação do leite, sob o ponto de vista tecnológico, é um concentrado proteico gorduroso, resultado da coagulação do leite.

Como o requeijão é passível de contaminação por diferentes microrganismos, causando sua deterioração, o produto é submetido ao aquecimento e resfriamento para reduzir as ações microbianas e enzimáticas. Como por exemplo, a pasteurização, que consiste na elevação da temperatura, desnaturando algumas enzimas e destruindo a maioria dos patógenos, facilitando o envase pela diminuição da viscosidade. Logo em seguida, ocorre um resfriamento rápido para evitar mudanças no produto final e crescimento das bactérias termófilas que não se desenvolvem em baixas temperaturas (MORENO, VIALTI, VALLE, 2006).

Tanto a operação de aquecimento quanto a operação de resfriamento são corriqueiras nas indústrias alimentícias, sendo portanto, importante conhecer o comportamento do alimento submetido à transferência de calor. Logo, a determinação das propriedades termofísicas do alimento é essencial para a eficiência e controle dessas operações, destacando-se a difusividade térmica necessária no projeto de equipamentos de aquecimento, refrigeração e armazenamento, bem como, na avaliação da distribuição da temperatura dentro de reatores, nas simulações do perfil de temperatura durante o tratamento térmico, envase, transporte, estocagem, entre outros.

Quando a condução de calor é o mecanismo principal que controla a transmissão da energia térmica, dentro do volume de controle, em coordenadas cilíndricas e sob o fluxo de calor tridimensional em regime transiente, a expressão matemática que a descreve é a Equação do calor (1).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1)$$

Sendo, $U = U(r, \phi, z, t)$ o campo de temperatura; r , ϕ e z as coordenadas espaciais cilíndricas, representando as três dimensões do cilindro (r é a posição radial, ϕ é o ângulo e z a altura do cilindro); \dot{q} a taxa de calor gerado dentro do volume de controle; k a condutividade térmica, assumindo-se que, o material é isotrópico, k se torna constante, independente da temperatura; α a difusividade térmica e t o tempo.

O coeficiente de difusividade térmica ou, simplesmente, difusividade térmica (α) é a propriedade que permite prever a velocidade de penetração de calor no interior do material, bem como, o tempo necessário para que certa região do material atinja uma temperatura específica. Esta propriedade termofísica pode variar em função da composição química, umidade, grau de homogeneidade e porosidade do material (TRES *et al.*, 2011; BETTA *et al.*, 2009; SOUSA, 2009).

A difusividade térmica (α) é dada, como expresso na Equação (2), pela razão entre a condutividade térmica (k) e o produto entre a massa específica (ρ) e o calor específico (C_p), a capacidade calorífica volumétrica. Esta relação significa a habilidade do material em conduzir energia pela capacidade de armazenar energia na forma de calor (TRES *et al.*, 2011).

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

Assim, quanto maior for o valor da difusividade térmica (α), mais rapidamente o calor irá se difundir através do material. Para isso, o valor de sua condutividade térmica deverá ser mais elevado do que a capacidade de armazenamento de calor, para que a energia térmica se propague mais rapidamente por todo material (OLIVEIRA, 2009).

Por outro lado, quando o valor da difusividade térmica é baixo, isto implica que é necessário uma grande quantidade de energia térmica para se elevar a temperatura por todo o

volume do material, já que apresentará uma condutividade menor do que a capacidade calorífica volumétrica (HOLMAN, 1983).

Há diversas formas de obtenção da difusividade térmica como aqueles baseados em aproximações analíticas, soluções numéricas e aplicações de fórmulas diretas como reportado por Carbonera (2003), em que a difusividade térmica é a razão entre a condutividade térmica e o produto da capacidade calorífica e massa específica, mostrada na Equação (2). Em 2001, Marschoun, Muthukumarappan, Gunasekaran determinaram a seguinte faixa de valores para a difusividade térmica (α) do queijo *cheddar*: $1,070.10^{-7}$ a $1,536.10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, em função da idade de fabricação e da composição (para as faixas de 30 – 60 % de umidade, 8 – 37 % de gordura e 22 – 36 % de proteína, em base úmida).

Dentro dessa perspectiva, a determinação da difusividade térmica de produtos genuinamente nacionais, escasso ou inexistente na literatura, como é o caso do requeijão fabricado por diferentes tecnologias e formulações típicas de cada região do Brasil, é importante, neste caso, no dimensionamento de projetos de equipamentos de refrigeração. Portanto, este estudo se justifica, especialmente pela forma metodológica simples e pouco dispendiosa, tanto na coleta dos dados de temperatura, em relação à posição espacial e no tempo, quanto no ajuste do modelo matemático representativo da transferência de calor aos dados coletados experimentalmente. Este trabalho visou a estimativa do coeficiente de difusividade térmica do requeijão tradicional, de consistência cremoso, por meio da operação de resfriamento, com fluxo de calor unidimensional radial e em regime transiente.

METODOLOGIA

O ensaio de transferência de calor por condução foi conduzido no Laboratório de Físico-Química do Campus Anápolis de Ciências Exatas e Tecnológicas (CCET), Henrique Santillo, da Universidade Estadual de Goiás (UEG), onde foi montado um sistema para operação de resfriamento do requeijão cremoso tradicional. O sistema de resfriamento consistia de um recipiente cilíndrico para contenção do requeijão, conjunto de termômetros e banho de gelo.

Confecção do recipiente de condução de calor

Um recipiente cilíndrico metálico de alumínio repuxado, sem costuras na parede lateral, foi adquirido no mercado, a fim de conter o requeijão cremoso tradicional a ser submetido à

operação de resfriamento. As paredes internas do recipiente cilíndrico serviram de fronteira delimitadora para o volume de controle, formado pela massa de requeijão. A espessura delgada da parede lateral metálica, teve também a função de minimizar a resistência térmica da parede (R_{parede}) ao fluxo de calor. Com a finalidade de induzir uma transferência de calor unidimensional, na direção radial, a base e o topo do recipiente foram isolados termicamente com isopor (Figura 1).



Figura 1 – Recipiente cilíndrico metálico destinado à transferência de calor com fluxo unidimensional, radial.
Fonte: autores, 2019.

A Equação (3), descrita nas clássicas e consagradas literaturas de transmissão de calor, de Kreith (1977) e Özışık (1990), expressa a resistência térmica à transferência de calor na direção radial de um sistema cilíndrico. Então, nas condições de espessura de parede delgada e condutividade térmica (k) alta, a resistência à transferência de calor poderá ser desprezada. Uma vez que, o raio interno (R_i) do recipiente cilíndrico é aproximadamente igual ao raio externo (R_e), $R_i \cong R_e$, o numerador da Equação (1) tende a zero. Por sua vez, para um elevado valor de k , como é o caso do alumínio ($205,0 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$), segundo Young, Sears (1992), o denominador da Equação (3) é demasiadamente acrescido, diminuindo assim a resistência térmica.

$$R_{parede} = \frac{\ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right)}{2\pi kl} \quad (3)$$

A tampa de isolamento térmico de isopor foi confeccionada com uma espessura maior do que a base isolante, também de isopor, com a finalidade de garantir: 1) um encaixe com vedação entre a tampa e o recipiente, da Figura 1, e 2) um contato direto da tampa com a massa de requeijão devido à altura de encaixe, para eliminar o espaço vazio entre a tampa e o requeijão, eliminando a possibilidade de transferência de calor por convecção.

Ensaio da operação de resfriamento do requeijão cremoso

Duas embalagens, em copo contendo 220 g de requeijão cremoso tradicional por unidade, da mesma marca e mesmo lote, foram homogeneizadas e deixadas estabilizar à temperatura ambiente. Este procedimento foi adotado, pois sabe-se que a difusividade térmica pode variar em função das diferentes formulações de um mesmo produto. Assim, a operação de resfriamento foi conduzida após o preenchimento do recipiente cilíndrico metálico de alumínio com o requeijão, que foi vedado com uma tampa de isopor dotada com três termômetros digitais, do tipo espeto, da marca Incoterm e incerteza de ± 1 °C. Sendo o requeijão delimitado pelo invólucro do recipiente cilíndrico, tomada como o volume de controle, e a parede lateral de alumínio foi assumida como a superfície de controle.

Depois da colocação da tampa com os termômetros, as temperaturas T_1 , T_2 e T_3 foram registradas nas respectivas posições radiais equivalentes a $r_1 = 0,0$ cm, $r_2 = 2,8$ cm e $r_3 = 5,8$ cm. Logo após, este conjunto foi inserido em um banho de gelo, neste momento considerado como instante zero ($t = 0$), sendo o binômio tempo (t) e temperatura (T) registrados no volume de controle, em regime transiente, para avaliar a distribuição da temperatura durante o resfriamento por um período de uma hora e 45 minutos (105 minutos).

Dedução analítica e estabelecimento das condições de contorno da transferência de calor radial

A Equação (3) foi simplificada de acordo com as seguintes condições experimentais: 1) o volume de controle era o cilíndrico formado pela massa de requeijão (cremoso tradicional); 2) a área de controle de troca térmica foi constituída da superfície lateral do cilindro, local por onde o calor fluiu na direção radial (r), havendo variação de temperatura; 3) nas direções angular (ϕ) e axial (z) não houve variação de temperatura, porque tanto o topo quanto a base do volume de controle foram isolados termicamente; 4) não existiu geração interna de calor no volume de controle, pois o calor foi retirado por meio de resfriamento com banho de gelo e

5) o fluxo de calor ocorreu em regime transiente, com variação de temperatura durante um período de tempo. Resultando-se assim, na Equação (4).

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (4)$$

A Equação (4) é uma equação diferencial ordinária (EDO) de variáveis separáveis, sendo que a distribuição de temperatura, após a simplificação imposta pelas condições experimentais, agora dependente apenas do raio e do tempo, $U(r, \phi, z, t) = U(r, t)$. Aplicando-se o método de separação de variáveis, com $U(r, t) = R(r) \cdot T(t)$, se obtém duas equações independentes, dadas pela Equação (5) e pela Equação (6).

$$\frac{1}{\alpha T(t)} \frac{\partial T(t)}{\partial t} + \lambda^2 = 0 \quad (5)$$

$$r^2 \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + r \frac{\partial R(r)}{\partial r} + \lambda^2 r^2 R(r) = 0 \quad (6)$$

Sendo λ , a constante de acoplamento das Equações (5) e (6). E, cuja a combinação da solução da Equação (5) e da solução da Equação (6), resulta em uma solução geral, a Equação (7), de acordo com Sousa, Sales, Costa (2015), dada por:

$$U(r, t) = T_f + 2(T_m - T_f) \sum_{i=0}^{\infty} \frac{e^{-\lambda_i^2 \alpha t}}{x_i J_1(\lambda_i \alpha)} J_0(\lambda_i r) \quad (7)$$

Sendo T_f , a temperatura fim ou sumidouro do calor, a temperatura do banho de gelo; T_m , a temperatura do material, a temperatura do requeijão cremoso tradicional; J_0 , a função de Bessel de primeira espécie de índice zero e J_1 , a função de Bessel de primeira espécie de índice um, dada por:

$$J_1(\lambda r) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n! \Gamma(n+2)} \left(\frac{\lambda_i r}{2} \right)^{2n+1} \quad (8)$$

Com $x_i = \lambda_i r$, as raízes de J_0 e λ_i , série de constantes de acoplamentos. Verifica-se, na solução geral, em $t = 0$ s, a temperatura inicial do material que está na temperatura ambiente. Quando o tempo for muito grande, ou seja, $t \rightarrow \infty$, a temperatura da amostra tende a temperatura final $T(\infty) = T_f$, e na posição $r = a$, tem-se sempre a temperatura final, a temperatura do sumidouro de calor, o banho de gelo, $T(a) = T_f$.

Deste modo, a Equação (8) foi empregada para gerar as curvas de temperatura $T(r, t)$ em função da difusividade térmica (α), a partir dos dados registrados no ensaio de resfriamento do requeijão cremoso tradicional para as variáveis de tempo e temperatura com três termômetros (T_1 , T_2 e T_3) em diferentes posições radiais ($r_1 = 0,0$ cm, $r_2 = 2,8$ cm e $r_3 = 5,8$ cm), respectivamente.

Determinação dos coeficientes de difusividade térmica

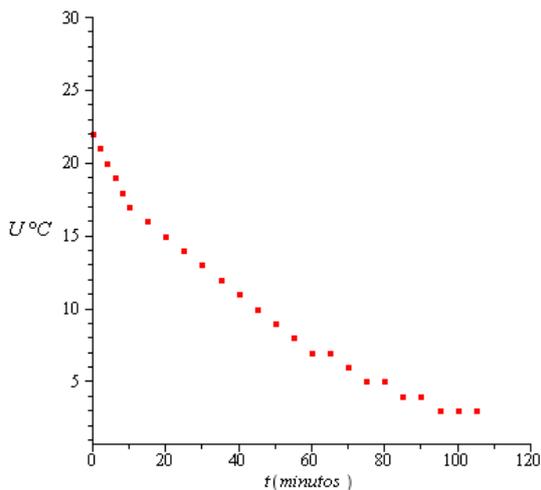
A Equação (8) foi inserida no programa *Maple* a fim de gerar várias curvas não lineares, de caráter exponencial, da temperatura em função da difusividade térmica fixando o tempo para todas as posições dos termômetros em $r_1 = 0,0$ cm, $r_2 = 2,8$ cm e $r_3 = 5,8$ cm, sempre nas condições de raio $a = 7,0$ cm (recipiente cilíndrico), temperatura fim $T_f = 0,0$ °C (banho de gelo) e temperatura ambiente do material $T_m = 22,0$ °C (requeijão cremoso tradicional).

Desta forma, sempre com o mesmo raio, a mesma temperatura fim e a mesma temperatura do material, na Equação (8), inicialmente fixando um tempo medido, foi feita a curva no programa Maple, da temperatura U em função da difusividade térmica α , em $r = 0,0$ cm. Nesta curva observando a temperatura medida, determinou-se a difusividade térmica do requeijão.

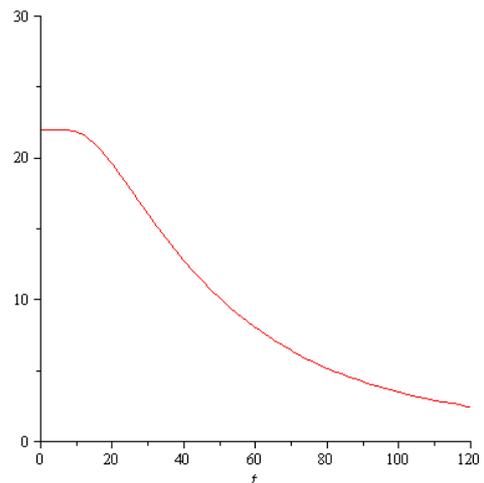
Com a mesma posição radial $r = 0,0$ cm, a mesma temperatura fim e a mesma temperatura do material, na Equação (8), fixando outro tempo medido, foi feita outra curva no Maple, da temperatura em função da difusividade térmica α , em $r = 0,0$ cm. Achou-se outro valor, nesta outra curva, da difusividade térmica do requeijão cremoso tradicional. Um valor diferente, porém próximo ao encontrado no primeiro procedimento.

E, repetiu-se os procedimentos, com o mesmo raio, a mesma temperatura da fonte e a mesma temperatura do material, na Equação (8), fixando vários tempos medidos, foram feitas outras curvas no Maple, da temperatura em função da difusividade térmica α , em $r = 2,8$ cm e $r = 5,8$ cm. Encontrando-se vários valores da difusividade térmica do requeijão tradicional e, por fim, o seu valor médio.

Para exemplificar, a Figura 2a mostra a distribuição da temperatura na posição $r = 0,0$ cm em função do tempo, encontrada experimentalmente no requeijão cremoso tradicional e na Figura 2b, a curva teórica com o uso da Equação (8), da temperatura em função do tempo com o valor da difusividade térmica.



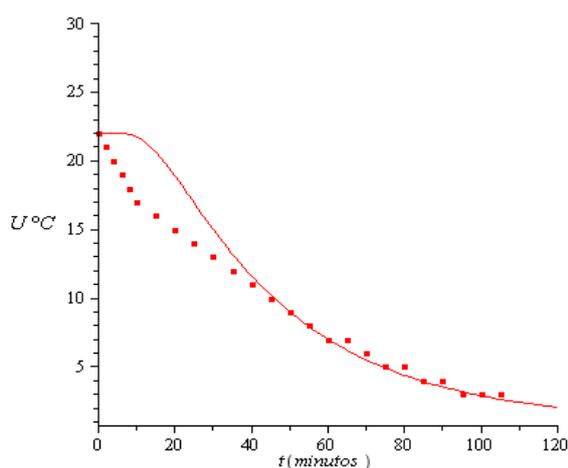
a. Temperatura (U) em função do tempo (t) para a posição $r = 0,0$ cm.



b. Curva teórica média ajustada aos dados experimentais de U e t para o $r = 0,0$ cm.

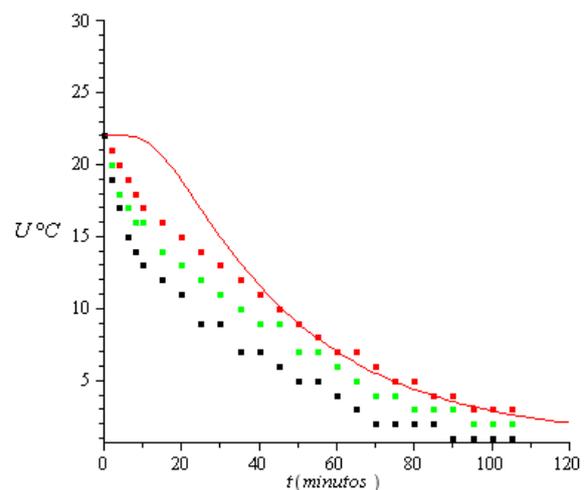
Figura 2 – Distribuição da temperatura (U) em função do tempo (t) e a curva teórica ajustada para a posição radial $r = 0,0$ cm. Fonte: autores, 2019.

Na Figura 3a, é mostrada a distribuição da temperatura em função do tempo estabelecida no ensaio de resfriamento, juntamente com a curva teórica da amostra de requeijão tradicional, em $r = 0,0$ cm, para observar as diferenças entre os valores experimentais e os valores previstos teoricamente. E na Figura 3b, têm-se também os valores da distribuição da temperatura em função do tempo encontrado experimentalmente do requeijão cremoso tradicional da posição $r = 2,8$ cm e $r = 5,8$ cm. Neste caso, optou-se por não mostrar a curva teórica, pois o comportamento foi o mesmo.



■ Raio 0 cm — Curva da difusividade média teórica

a. Distribuição de temperatura (U) em função do tempo (t) em $r_1 = 0,0$ cm juntamente com a curva teórica ajustada para difusividade térmica média.



■ Raio 0 ■ Raio 2,8 cm
■ Raio 5,8 — Curva da difusividade média teórica

b. Distribuição da temperatura (U) em função do tempo (t) para os raios $r = 0,0$ cm, $2,8$ cm e $5,8$ cm

Figura 3 – Distribuição da temperatura (U) em função do tempo (t) juntamente com a curva teórica ajustada para as posições radiais $0,0$ cm, $2,8$ cm e $5,8$ cm. Fonte: autores, 2019.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os valores dos coeficientes de difusividades térmicas médios estimados para o requeijão cremoso tradicional ($\alpha_{m, \text{requeijão}}$), na faixa de $4,05$ a $3,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Observa-se que, $\alpha_{m, \text{requeijão}} = 2,29 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1} = 3,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ apresenta a mesma ordem de grandeza calculada por Sousa, Sales, Costa (2015) para a difusividade térmica média do creme hidratante corporal, igual a $\alpha_{m, \text{creme hid.}} = 1,49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1} = 2,48 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Também apresentam a mesma ordem de grandeza (10^{-7}) e a mesma tendência decrescente nos valores de α para os iogurtes comerciais, natural ($\alpha_{\text{iog.nat.}} = 2,27$ a $2,17 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) e desnatado ($\alpha_{\text{iog.desnat.}} = 2,04$ a $1,98 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), determinados por Oliveira (2009), aplicando uma outra metodologia, denominada de método *flash*.

Tabela 1 – Coeficientes de difusividade térmica do requeijão cremoso nas respectivas posições radiais.

Número do Termômetro	Posição radial (cm)	Difusividade térmica média do requeijão cremoso tradicional	
		($\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
T ₁	0,0	$2,43 \cdot 10^{-5}$	$4,05 \cdot 10^{-7}$
T ₂	2,8	$2,41 \cdot 10^{-5}$	$4,02 \cdot 10^{-7}$
T ₃	5,8	$2,02 \cdot 10^{-5}$	$3,37 \cdot 10^{-7}$
Média		$2,29 \cdot 10^{-5}$	$3,81 \cdot 10^{-7}$

Legenda: T₁ – termômetro 1, T₂ – termômetro 2, T₃ – termômetro 3. Organização: autores, 2019.

Os pesquisadores Marschoun, Muthukumarappan, Gunasekaran (2001) determinaram a difusividade térmica do queijo *cheddar* em função da idade e da composição (30 – 60 % de umidade, 8 – 37 % de gordura e 22 – 36 % de proteína, em base úmida), tendo encontrado uma faixa de $1,536$ a $1,070 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Não havendo uma relação significativa entre a difusividade térmica e o teor de umidade, a gordura e a proteína do queijo.

Em relação as diferenças mostradas nas curvas da distribuição de temperatura em função do tempo e a previsão dos valores teóricos, podem ser justificadas na solução da equação do calor em suas condições de contorno, uma vez que, o requeijão cremoso tradicional foi considerado uma substância homogênea e isotrópica, o que na verdade não é.

CONCLUSÃO

Os dados da distribuição do calor encontrados no ensaio de resfriamento estão de acordo com a previsão teórica, mostrando um decaimento adiabático. No método utilizado para encontrar a difusividade térmica média, tem-se uma grande vantagem devido a sua simplicidade de realização experimental e fácil, diretamente no gráfico da temperatura em função da difusividade térmica.

O valor estimado da difusividade térmica média do requeijão cremoso tradicional foi de $3,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, não estando na faixa da difusividade térmica do queijo *cheddar* ($1,07 \cdot 10^{-7}$ a $1,536 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) encontrado na literatura, provavelmente porque o requeijão cremoso tradicional tem menor quantidade de água, diminuindo a sua capacidade térmica, aumentando, conseqüentemente, o seu coeficiente de difusividade térmica.

Mas, em relação com outros materiais, verifica-se que o resultado está de acordo, com o esperado. A difusividade térmica do requeijão cremoso tradicional é menor que, por exemplo, a difusividade térmica do cobre, dada por $\alpha = 1153 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, uma vez que o cobre é um melhor condutor de calor que o requeijão, pois se considerada a mesma área e a mesma espessura, uma parede de requeijão cremoso tradicional se aquecerá mais lentamente do que o cobre nas mesmas condições.

REFERÊNCIAS

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Informações técnicas:** produtos diet e *light*. Disponível em: <<http://portal.anvisa.gov.br/informacoes-tecnicas>>. Acessado em dezembro de 2018.

BETTA, G., RINALDI, M., BARBANTI, D., MASSINI, R. A quick method for thermal diffusivity estimation: Application to several foods. **Journal of Food Engineering**, 2009.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. **Portaria n. 359 de 04 de setembro.** Regulamento técnico para fixação de identidade e qualidade do requeijão cremoso ou requesón. Brasília: MA/DIPOA, 1997.

BRINGEL, A. L. *et al.* Suplementação nutricional de cálcio e vitamina D para a saúde óssea e prevenção de fraturas osteoporóticas. **Revista Brasileira de Ciência e Saúde**, v.18, n.4, p. 353-358, 2014.

CARBONERA, L. *et al.* Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.06, n.2, p. 285 - 90, 2003.

CAMPOS, L. M. A. *et al.* Osteoporose na infância e na adolescência. **Jornal de Pediatria**, v. 79, n. 6, 2003.

DIAS, V. R. Requeijão culinário. In: DIAS, V. R. **Influência do tipo de sal emulsificante nas características de textura e derretimento do requeijão culinário.** 2015. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2015. p. 12-15.

KREITH, F. **Princípios da transferência de calor.** 3.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

MARSCHOUN, L. T., MUTHUKUMARAPPAN, K., GUNASEKARAN, S. Thermal properties of cheddar cheese: experimental and modeling. **International Journal of Food Properties**, v.4, n.3, p.383-403, 2001.

MORENO, I., VIALTA, A., VALLE, J. L. E. **Efeitos das várias etapas do processamento de requeijão e queijos fundidos na microbiota do leite.** 2006. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/requeijao/index.htm>. Acessado em dezembro de 2018.

ÖZİŞİK, M. N. **Transferência de calor.** Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1990.

OLIVEIRA, E. P. **Estimação da difusividade térmica de iogurtes comerciais:** aplicação do método *Flash*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

OLIVEIRA, V. C. D. **Alergia à proteína do leite de vaca e intolerância à lactose:** abordagem nutricional, pesquisa qualitativa e percepções dos profissionais da área de saúde. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia do Leite e Derivados) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

PEREIRA, F. C. **Estudo tecnológico de requeijão cremoso *light* com teor de sódio reduzido e adição de fibra alimentar.** Dissertação (Mestrado) Instituto Federal Triângulo Mineiro – Campus Uberaba, 2013.

SOUSA, T. N. **Modelagem matemática para estimativa da difusividade térmica:** experimentação em pasta de pequi e massa de tomate. Monografia (Graduação em Química Industrial) – Unidade Universitária de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás. Anápolis, Goiás, 2009.

SOUSA, M. F., SALES, J. S., COSTA, O. S. Aplicação da equação do calor em coordenadas cilíndricas: cálculo da difusividade térmica. **Revista de Processos Químicos**, ano 9, n. 7, jan./jun., p. 27-31, 2015.

TRES, M. V., BORGES, G. R., CORAZZA, M. L., ZAKRZEWSKI, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. **Perspectiva**, v. 35, n. 131, p. 43-56, set./2011.

VAN DENDER, A. G. F. **Requeijão cremoso:** pesquisas e inovações no século 21. ITAL. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.ital.sp.gov.br/tecnolat/anais/tl230513/Arquivos/Ariene%20Van%20Dender_ITA L.pdf>. Acessado em janeiro de 2019.

VAN DENDER, A. G. F. **Requeijão cremoso e outros queijos fundidos:** tecnologia de fabricação, controle do processo e aspectos de mercado. São Paulo: Fonte Setembro, 2014.

YOUNG, H. D., SEARS, F. W. **University Physics.** 7th ed. Massachusetts: Reading, Mass, 1992.