

TÉCNICAS PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE A OPERAÇÃO DE FRITURA

Nathalia Pezini¹; Gustavo Ferreira Leonhardt²

¹Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

²Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *A operação de fritura é controlada pelo coeficiente de transferência de calor entre o óleo e o alimento, garantindo uma textura adequada da superfície ao mesmo tempo que o cozimento da região central. Com o conhecimento do coeficiente de transferência de calor, é possível estimar o tempo de processo, estabelecendo uma relação entre a geometria do alimento e o tempo do processo, e determinar as dimensões da fritadeira. Este trabalho teve por objetivo testar as técnicas de determinação do coeficiente de transferência de calor propostas na bibliografia: Costa et al (1999) e Budzaki & Seruga (2005). Ao realizar os dois métodos notou-se que ambos foram reprodutíveis e apresentaram resultados dentro da faixa de valores obtidos na literatura 433 a 750 W·m⁻²·K⁻¹ (Budzaki and Seruga, 2005). O método proposto por Costa et al (1999), apresentou uma melhor reprodutibilidade com menor tempo de processo, menor quantidade de material utilizado e maior precisão.*

Introdução

O conhecimento do coeficiente de transferência de calor durante a operação de fritura é de grande importância. Por meio dele é possível determinar: o tempo de fritura, otimizando as transformações que ocorrem durante o processamento; a relação do tempo de processo com a geometria do alimento utilizado e as dimensões da fritadeira (Fellows, 2006).

O processo de fritura depende de diferentes parâmetros: temperatura de fritura, tipo de óleo, agitação do óleo — que pode ser natural ou forçada —, a geometria do alimento e o equipamento utilizado. A taxa de transferência de calor determina o tempo de fritura com a consequente perda de umidade. Taxas elevadas favorecem a criação de crostas diminuindo a taxa de evaporação. Taxas muito reduzida favorecem a perda de umidade com consequente perda de textura. Dessa forma, é de suma importância o conhecimento do coeficiente de transferência de calor entre o óleo e o alimento, permitindo selecionar a taxa mais adequada em função da geometria e da temperatura do óleo de fritura.

Alvis et al (2009), relatam a importância do conhecimento do coeficiente de transferência de calor e a necessidade de seu conhecimento para a concepção de equipamentos e para melhor avaliar os processos. Os autores ressaltam que os métodos utilizados na literatura para determinar o coeficiente de transferência de calor durante processos de fritura possuem algumas limitações, assim como a falta de padrão técnico. A transferência de massa muitas vezes não é considerada. Além disso, muitos desses estudos determinam o coeficiente de transferência de calor de acordo com a posição do material avaliado. Em seu artigo, os autores analisam diferentes aspectos da operação de fritura e revisam os mais importantes métodos utilizados para determinar o coeficiente de transferência de calor.

Tendo em vista o trabalho de Alvis et al (2009), este trabalho teve como objetivo primeiro colocar em prática as técnicas de determinação do coeficiente de transferência de calor encontradas na bibliografia. Dominadas as técnicas elas foram comparadas para selecionar, com base nos resultados obtidos, a melhor entre elas. Ou seja, aquela que leve em conta a maioria das variáveis de processo e seja, ao mesmo tempo, a mais simples de se executar e precisa.

Materiais e Métodos

Materiais e utensílios

Para todos os estudos foram utilizados os seguintes materiais e utensílios: batata congelada do tipo palito pronta para fritura, óleo de soja, fritadeira (capacidade de 5 litros), cesto de arame, grade de arame para o cesto da fritadeira, termopar, cronômetro, termopar com esfera de cobre acoplada, estufa, placa de Petri, balança analítica, balança semianalítica, dessecador, saco plástico e papel toalha.

Métodos

Para atender o objetivo da pesquisa, foram reproduzidos dois métodos para determinar o coeficiente de transferência de calor durante o processo de fritura.

O primeiro método foi executado de acordo com as técnicas encontradas no artigo do Budzaki e Seruga (2005). Em primeiro lugar, com o auxílio da balança semianalítica, foi pesado setenta e cinco gramas de batata congelada do tipo palito e colocadas na cesta da fritadeira com a grade de arame inserida sobre a amostra, para garantir que elas permanecessem submersas no óleo. Com o óleo de soja aquecido em uma das temperaturas preestabelecidas, 140°C, 160°C ou 180°C, colocou-se a cesta de arame na cuba da fritadeira. Esse processo foi executado em quinze intervalos de tempo para cada uma das temperaturas, sendo eles: 5, 7, 10, 14, 20, 28, 39, 55, 77, 108, 151, 211, 295, 413, 578 segundos. Após a amostra permanecer submersa no óleo durante o referente intervalo de tempo, ela foi retirada da cesta de arame e o óleo em excesso foi enxugado com papel toalha, em seguida guardadas em um saco plástico para não perderem umidade para o ambiente.

A fim de obter a quantidade de água evaporada durante a operação de fritura determinou-se sua umidade. Inicialmente, foi preciso tarar as placas de Petri e para isso elas foram submetidas à uma hora de estufa a 105°C, após esse tempo colocou-se as placas no dessecador para que estas esfriassem até atingir a temperatura ambiente e assim pudessem ser pesadas com o auxílio da balança analítica. Colocou-se aproximadamente cinco gramas de cada amostra na placa de Petri e pesou-se o conjunto (placa mais amostra). Inseriram-se os conjuntos na estufa por 4 horas, a 105°C. Após esse tempo os conjuntos foram colocados no dessecador para resfriarem até atingirem a temperatura ambiente e, em seguida pesados. Esse processo foi repetido a cada meia hora até atingir sete horas de permanência na estufa. Esse método foi reproduzido em duplicata para cada uma das temperaturas estudadas.

Com os dados obtidos referentes à variação de massa de água evaporada com o tempo, foi possível determinar o coeficiente de transferência de calor por meio da equação (I) (Hubbard e Farkas, 1999).

$$h = \frac{dm}{dt} \cdot \frac{\Delta H_{vap}}{A(T_0 - T_s)} \quad (I)$$

Sendo: ΔH_{vap} a entalpia de vaporização da água ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$); A a área superficial (cm^2); (dm/dt) a taxa de evaporação ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$); T_0 a temperatura do óleo (K); T_s a temperatura da superfície (K); h o coeficiente convectivo de transferência de calor ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$).

A taxa de evaporação foi obtida aplicando-se o método de regressão linear aos dados de variação da massa em função do tempo.

O segundo método usa como base a metodologia apresentada no artigo do Costa et al (1999). Em primeiro lugar, pesaram-se setenta e cinco gramas de batata congelada do tipo palito com o auxílio de uma balança semianalítica. A amostra foi colocada na cesta de arame da fritadeira com a grade de arame sobre ela, para garantir que permanecessem submersas durante o processo. Aqueceu-se o óleo de soja da fritadeira até uma das temperaturas preestabelecidas de 140°C, 160°C ou 180°C, colocou-se a cuba de arame na cesta da fritadeira. Logo em seguida, o termopar com a esfera de cobre acoplada foi inserido acima das

fatias de batatas para que as condições hidrodinâmicas fossem garantidas. Esse método foi reproduzido em triplicata para cada uma das três temperaturas.

A temperatura no centro da esfera foi medida durante um minuto com o intervalo de tempo de cinco segundos e assim, por meio da equação (II) foi possível obter o coeficiente de transferência de calor segundo o método da capacitância de Holman (1990).

$$\frac{T_m - T_0}{T_{mi} - T_0} = \exp\left(-\frac{hA_m}{V_m\rho_m c_{pm}}t\right) \quad (\text{II})$$

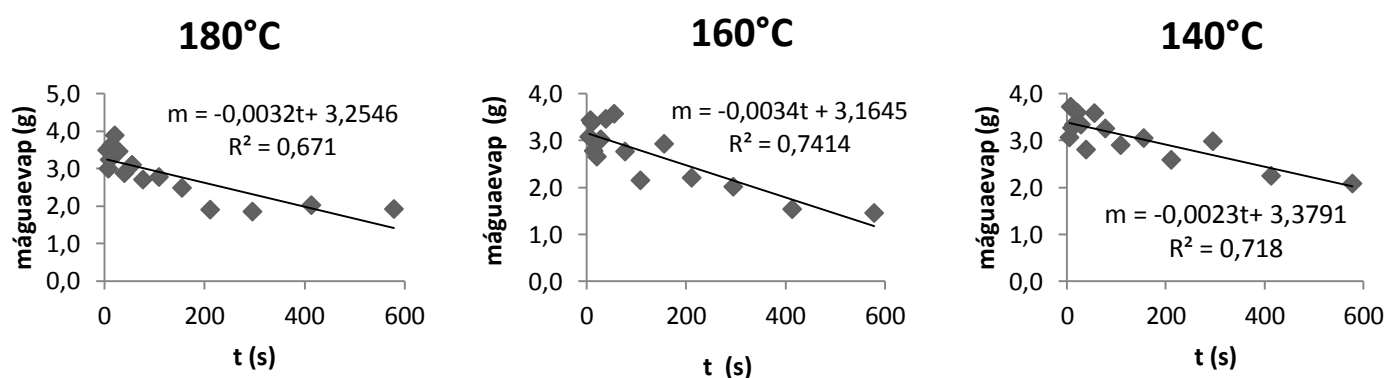
Sendo: T_m a temperatura do metal (K); T_{mi} a temperatura inicial do metal (K); T_0 a temperatura do óleo; A_m a área superficial do metal (m²); V_m o volume do metal (m³); ρ_m a massa específica do metal (kg·m⁻³); c_{pm} o calor específico do metal (J·kg⁻¹·K⁻¹); t o tempo de fritura (s); h o coeficiente de transferência de calor (W·m⁻²·K⁻¹).

O coeficiente de transferência de calor foi obtido aplicando-se o método de regressão linear aos dados de variação do logaritmo natural do adimensional de temperatura em função do tempo. O coeficiente angular permite calcular o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Resultados e Discussão

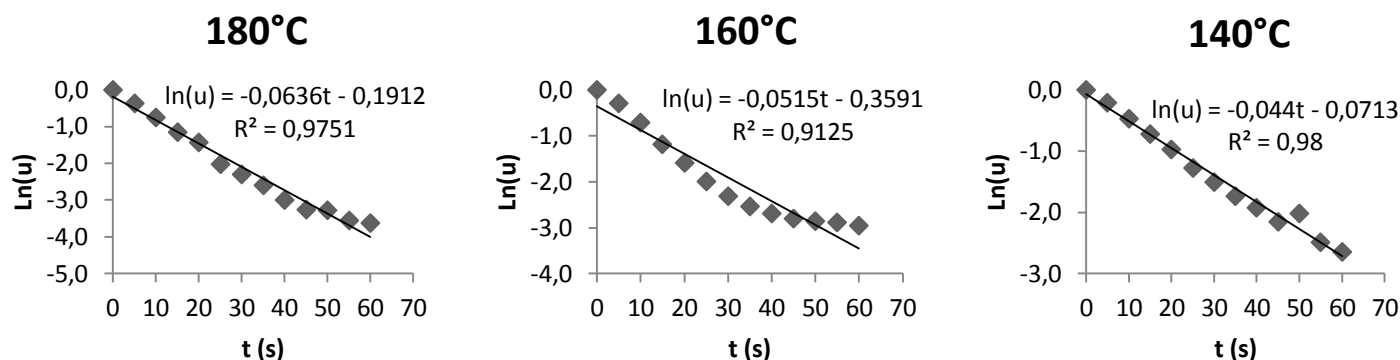
A Figura 1 mostra uma curva típica de variação da massa em função do tempo que são análogas àquelas que serviram de base para a determinação do coeficiente de transferência de calor empregando a Equação (I). Já a Figura 2 mostra uma curva típica da variação do adimensional de temperatura em função do tempo, análogas àquelas que serviram de base para a determinação do coeficiente de transferência de calor empregando a Equação (II). Os coeficientes de determinação dos dois métodos variaram de 0,64 a 0,79 para a retirada da amostra em diferentes tempos (Budzaki e Seruga, 2005), e de 0,89 a 0,999 para o método da esfera de cobre com termopar embutido (Costa et al, 1999).

Figura 1 – Variação da massa em função do tempo para a determinação da taxa de massa evaporada em função do tempo para as três temperaturas de estudo.



Fonte: Os autores

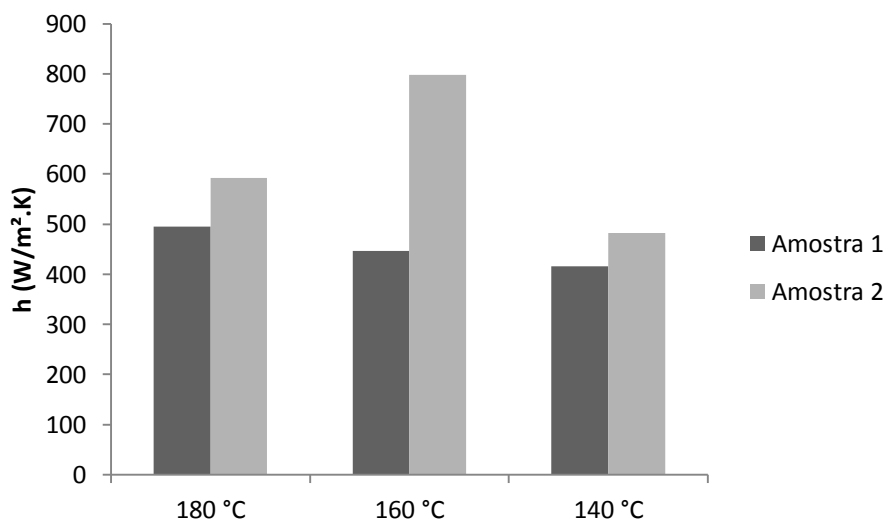
Figura 2 – Variação do logaritmo natural do adimensional de temperatura em função do tempo para a determinação do coeficiente de transferência de calor para as três temperaturas de estudo.



Fonte: Os autores

Analisando os resultados obtidos por ANOVA, para o método da amostra retirada em diferentes tempos, verificou-se que o tempo de permanência na estufa não influenciou significativamente, com um grau de significância de 3%, na obtenção do coeficiente de transferência de calor durante o processo de fritura para nenhuma das temperaturas utilizadas. Ou seja, o método poderia ser realizado em um tempo menor. No entanto, deve ser ressaltado que o tempo de permanência na estufa é um dos fatores que acarreta imprecisão ao método. A Figura 3 mostra os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção para a temperatura de 160 °C calculado empregando-se três tempos diferente para a determinação da massa de água evaporada.

Figura 3 – Coeficiente de transferência de calor obtido com seis horas de estufa para as três diferentes temperaturas.



Fonte: Os autores

A Tabela 1 apresenta os valores médios e o desvio padrão do coeficiente de transferência de calor obtido para as temperaturas de 140 °C, 160°C e 180 °C pelos dois métodos testados. Analisando a temperatura de fritura por ANOVA para ambos os métodos, não houve diferença significativa, considerando um grau de significância de 3%, entre os valores obtidos do coeficiente de transferência de calor. Isso pode ser decorrente aos altos valores de desvio padrão encontrados.

Verifica-se, também, que ambos os métodos utilizados apresentaram resultados que se encontram na faixa de valores obtidos na literatura 433 a 750 W·m⁻²·K⁻¹ (Budzaki and Seruga, 2005), para temperaturas de 140 a 180°C.

Tabela 1 – Média dos coeficientes de transferência de calor com seu respectivo desvio padrão para os diferentes métodos e nas diferentes temperaturas.

Temperatura de fritura (°C)	Método diferentes tempos h (W·m ⁻² ·K ⁻¹)	Método peça de metal h (W·m ⁻² ·K ⁻¹)
180	440 ± 15	423 ± 28
160	546 ± 22	460 ± 7
140	649 ± 67	612 ± 41

Fonte: Os autores

Tendo em vista que ambos os métodos apresentaram semelhantes, é possível afirmar que o método proposto por Budzaki e Seruga (2005) não se trata de um método rápido de ser executado, além de apresentar maior variação. A determinação da massa de água evaporada é influenciada por muitas variáveis: como o tamanho das amostras, formação de crosta na superfície da amostra, volatilização incompleta da água, perda de compostos voláteis, reações de decomposição e absorção de umidade. Além disso, por ser feito em quinze intervalos de tempo, é gasto mais material, já que, em cada amostra é utilizado aproximadamente setenta e cinco gramas de batata congelada, além de requerer um maior tempo de processo.

Em contrapartida, o método proposto por Costa et al (1999), demonstrou ser de fácil reprodutibilidade, já que o tempo de processo consiste basicamente em um minuto de análise da temperatura no centro da esfera de cobre em relação ao tempo. Além disso, demanda menor quantidade de alimento para sua execução, pois em cada ensaio é gasto somente 75 gramas de batata congelada em comparação ao outro método que requer 1125 gramas de batata congelada por ensaio. Esse método pode ser aperfeiçoado se for possível dispor de registrador da temperatura em função do tempo, capaz de ler intervalos menores de tempo.

Conclusões

Ambos os métodos estudados apresentaram resultados com precisão satisfatória, já que todos os resultados obtidos referentes ao coeficiente de transferência de calor se encontram dentro da faixa de valores obtidos na literatura de 433 a 750 W·m⁻²·K⁻¹ (Budzaki and Seruga, 2005). Porém, o método da peça de metal com termopar embutido obteve maior coeficiente de determinação, o que indica que os valores obtidos experimentalmente se ajustam melhor na regressão linear e por isso, fornecem resultados mais precisos quando comparados aos valores do método da amostra retirada em diferentes tempos. Além de ter apresentado melhor reprodutibilidade, menor tempo de processo e menor quantidade de alimento utilizado para sua execução.

Agradecimentos

Janaina Fernandes Correia, Centro Universitário Instituto Mauá de Tecnologia.

Referências bibliográficas

Alvis, A., Vélez, C., Mendonza, M. R., Villamiel, M., Villada, H. S. (2009). Heat transfer coefficient during deep-fat frying. *Food Control*, 20, 321-325.

Budzaki, S.& Seruga, B. (2005). Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering*, 66, 307-314.

Costa, R. M., Oliveira, F. A. R., Delaney, O., & Gekas, V. (1999). Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 293-299.

Fellows, P. J. *Tecnologia do Processamento de Alimentos*. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602p.

Holman, J. P. (1990). Unsteady state heat conduction. *Heat Transfer*. 6th ed. New York: MacGraw-Hill Book. In: Costa, R. M., Oliveira, F. A. R., Delaney, O., & Gekas, V. (1998). Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. *Journal of Food Engineering*, 39(3), 293-299.

Hubbard, L. J. & Farkas, B. E. (1999). A method for determining the convective heat transfer coefficient during immersion frying. *Journal of Food Process Engineering*. 22,201-214. In: Budzaki, S.& Seruga, B. (2004). Determination of convective heat transfer coefficient during frying of potato dough. *Journal of Food Engineering*, 66, 307-314.