

CINÉTICA DA TEMPERATURA DOS GRÃOS NA TORREFAÇÃO DO CAFÉ

GUILLERMO VARGAS-ELÍAS¹, STEPHANIE PERAZA-ALPÍZAR², DAVID VARGAS-GÓMEZ³, SABRINA PAULA DE ASSIS⁴

¹ D. Sc., Eng. Agrícola. Professor. Universidad de Costa Rica (U.C.R.) San José-Costa Rica. guillermo.vargaselias@ucr.ac.cr

² Estudante da Engenharia Agrícola e de Biosistemas, U.C.R., San José-C.R.

³ Estudante de Gestão de Empresarial, Faculdade de Ciências Econômicas, U.C.R., San José-C.R.

⁴ Eng. Agrônoma, CENTREINAR-U.F.V., Viçosa-Minas Gerais

Apresentado no
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

RESUMO: Objetivou-se com este trabalho ajustar um modelo de aquecimento para representar a cinética da temperatura dos grãos durante a torração do café comercial. Foram usadas amostras de 350 g de grãos beneficiados retidos em peneira 17 e 18, de café arábica com teor de água de $0,1032 \text{ kg}_{\text{água}} \text{ kg}_{\text{produto}}^{-1}$ ($\text{kg}_a \text{ kg}^{-1}$). Usou-se um torrador de cilindro giratório a queima constante de gás, cujas temperaturas iniciais foram de 290, 310, 345 e 380 °C, que diminuíram exponencialmente durante a operação até se equilibrar. O aquecimento dos grãos foi contínuo durante todo o processo. Observou-se que o processo de torrefação foi realizado em condições não isotérmicas da parede e no final do processo os grãos aqueceram em taxas constantes. A cinética do aquecimento dos grãos dependeu da temperatura do torrador, onde a máxima taxa de aquecimento foi para os grãos submetidos à máxima temperatura de torrefação. Foi adaptado o modelo matemático de aquecimento linear dos grãos com coeficiente de determinação r^2 maior que 0,991. A energia de ativação para o aquecimento dos grãos durante a torrefação foi $25,78 \text{ kJ mol}^{-1}$.

PALAVRAS-CHAVE: *Coffea arabica*, modelagem matemática, taxa do aquecimento.

KINETICS OF GRAIN TEMPERATURE IN COFFEE ROASTING

ABSTRACT: In this research, the relationship between the variation rate of temperature of coffee beans and the initial roaster temperature was determined. Samples of 350 g of arabic green coffee beans with moisture content of $0.1032 \text{ kg}_{\text{water}} \text{ kg}_{\text{product}}^{-1}$ ($\text{kg}_w \text{ kg}^{-1}$) were used. A burning gas drum roaster with initial temperatures of 290, 310, 345 e 380 °C was used. While maintaining gas burned in constant rate, the roaster initial temperature decreased to equilibrium exponentially. It was observed that coffee roasting process is non-isothermal process. The grain heating kinetics depended on the roaster temperature, where the maximum heating rate was for the grains submitted to the maximum roasting temperature. The mathematical model of linear heating of grains with a coefficient of determination r^2 greater than 0.991 was adapted. The activation energy for heating the beans during roasting was $25.78 \text{ kJ mol}^{-1}$.

KEYWORDS: *Coffea arabica*, Mathematical modelling, Rate heating.

INTRODUÇÃO: Os torradores nomeados de leito fluidizado funcionam com ar aquecido em condições isotérmicas onde a transferência de calor ocorre por convecção pura, diminuindo significativamente o tempo de torra e produzindo uniformidade na torra do café (PERRONE et al., 2010). No torrador de cilindro horizontal os grãos aquecem devido às diversas formas de transferência de calor: condução, radiação e convecção natural (FABBRI et al., 2011). As condições de operação variam segundo o tipo de torrador, por exemplo, as temperaturas variam entre 240 e 270 °C em 5 min para o torrador tipo leito fluidizado, já o torrador horizontal precisa aquecer entre 400 e 500 °C com tempos entre 8 e 20 min (BASILE; KIKIC, 2009). Na perda de massa do café podem-se diferenciar as fases da secagem e da torra, na primeira etapa predomina a remoção de água e eliminação de compostos voláteis, e na segunda fase iniciam-se as reações exotérmicas liberando principalmente compostos orgânicos e dióxido de carbono (WANG; LIM, 2013; FRANÇA et al., 2009). O mecanismo exotérmico pode ser estudado a partir do modelo de aquecimento dos grãos (HERNÁNDEZ et al., 2007), o qual depende da transferência de calor efetiva, já que os grãos atingem a temperatura em diferentes taxas para iniciar a pirólise em tempos diferentes. A taxa de aquecimento no interior do cilindro depois de 210 °C foi constante e dependente da temperatura do torrador com valores entre 6,5 e 9,1 °C/min (PORRAS et al., 2019). Sendo o torrador de cilindro horizontal utilizado amplamente, tanto na indústria brasileira quanto a costarriquenha, objetivou-se com esse trabalho determinar a relação entre a temperatura dos grãos e a temperatura do torrador durante a torração do café.

MATERIAL E MÉTODOS: Foi utilizado um torrador a gás de combustão direta marca Rod-Bel, com cilindro perfurado em movimento rotativo a 45 rpm, com queima constante de gás durante cada torra. Utilizou-se o termômetro infravermelho, marca Mult-Temp portátil, que fornece leituras entre -50 e 500 °C com tempo de resposta de 1 s e resolução de 1 °C, em distância de 20 cm entre o medidor e o alvo. As temperaturas de torração foram verificadas na superfície interna do cilindro em movimento 380, 345, 310 e 290 °C a cada 1 min como se observa na Figura 1. Foram feitas duas leituras na parede do cilindro para calcular a média de temperatura do torrador no início do processo. Foi necessário preaquecer o torrador até se manter estável a temperatura e após disso, foram colocadas as amostras de 350 g de grão cru.

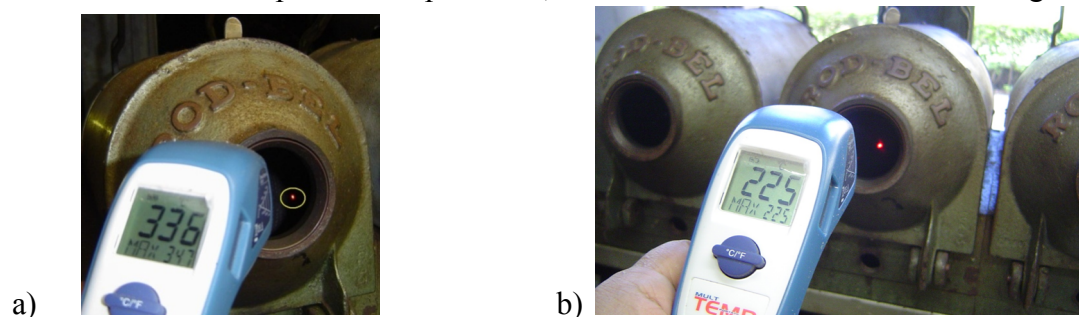


FIGURA 1. Medição da temperatura na parede do torrador (a) e da massa dos grãos (b). Em cada temperatura foram colocadas amostras de café para obter seis pontos de torração na faixa de temperatura dos grãos entre 170 e 240 °C. As mudanças da massa no processo de torrefação foi estudada pela cinética das reações químicas de ordem zero (VARGAS-ELÍAS et al., 2016), semelhante as taxas de aquecimento que foram constantes conforme a Equação 1 e 2.

$$dT/dt = k \quad (1)$$

$$T = k*t + a \quad (2)$$

em que: T : a temperatura dos grãos (°C), t : o tempo de torração (min), k : taxa do aquecimento dos grãos de café durante a torra (°C min⁻¹), a : coeficiente.

As taxas foram relacionadas com a temperatura pelo modelo de Arrhenius (Equação 3).

$$k = k_0 * \exp(-E_a/T_a * R_g) \quad (3)$$

em que : k_0 : fator pré-exponencial (min^{-1}); E_a : energia de ativação da expansão aparente dos grãos de café durante a torra (J mol^{-1}); R_g : constante dos gases ($8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); e T_a : temperatura absoluta do torrefador (K).

Para o ajuste linear foi utilizado o programa SIGMAPLOT 15.0. Para verificar o grau de ajuste dos modelos, foi considerada a magnitude do coeficiente de determinação (r^2), do erro médio relativo (P) e do desvio-padrão da estimativa (SE).

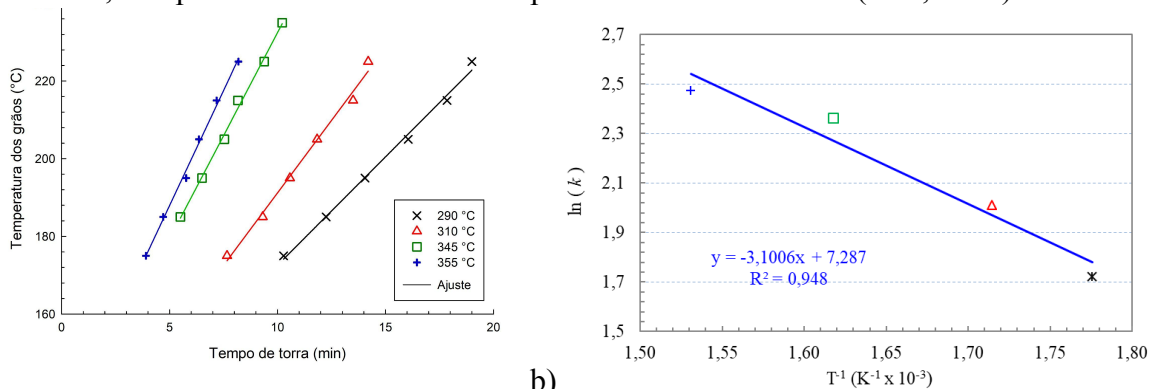
RESULTADOS E DISCUSSÃO: A temperatura dos grãos foi obtida na superfície do café em movimento, mas a classificação por forma e tamanho permitiu que a temperatura dos grãos fosse homogênea com tendência linear. Os valores obtidos pode-se inferir que o modelo foi ajustado adequadamente para cada temperatura do torrador com magnitude do coeficiente de determinação (r^2) maior que 0,991 como se observa na tabela 1.

Tabela 1. Taxas do aquecimento para a transformação linear e parâmetros estatísticos.

T_e (°C)	T_k (K)	T_k^{-1} (10^{-3} K^{-1})	k^{**} (°C min^{-1})	$\ln(k)$ (°C)	a^{**} (°C)	R^2 (dec.)	ESS (%)
290	563,15	1,7757	5,5791	1,7190	160,7490	0,9947	1,5274
310	583,15	1,7148	7,4640	2,0101	162,5462	0,9918	1,8981
345	618,15	1,6177	10,6082	2,3616	162,5462	0,9962	1,2955
380	628,15	1,5310	11,8393	2,4714	155,2130	0,9958	1,3634

ESS: erro padrão de estimação. (**) Os p-valor na determinação dos coeficientes foi menor que 0,0001

A cinética da temperatura na superfície dos grãos concorda com outras pesquisas, onde no final da torrefação foi com tendência linear (SCHWARTZBERG, 2013; BOTELHO, 2012). Ainda na figura 2, observa-se que o ajuste depende das temperaturas de torra de 380, 345, 310 e 290 °C. Na cinética do aquecimento menor que 15 min podem-se obter grãos torrados mais uniformes, cumprindo com a norma do tempo de torra recomendada (OIC, 2023).



a) b) FIGURA 2. Efeito da temperatura na cinética do aquecimento dos grãos durante a torrefação.

A energia da ativação para o aquecimento dos grãos durante a torrefação foi $25,78 \text{ kJ mol}^{-1}$; semelhante à determinada com a temperatura do interior do torrador $21,64 \text{ kJ mol}^{-1}$ com amostras com o duplo do tamanho (PORRAS et al., 2019).

$$dT/dt = 1.461,18 * \exp(-25.779,88 / T_a * R_g) \quad (4)$$

Alguns estudos associaram as mudanças macroscópicas dos grãos com sua temperatura durante a torra (ILLY; VIANI, 2005). Foi observado que os grãos a 225 °C , na mínima taxa de aquecimento chegaram à coloração escura, enquanto na máxima taxa de aquecimento estudada os grãos ainda apresentavam a coloração muito clara.

CONCLUSÕES: O aquecimento do café foi linear na etapa de torrefação dos grãos. A cinética do aquecimento dos grãos está em relação direta com a temperatura inicial do torrador. O modelo de Arrhenius representou adequadamente a taxa de aquecimento dos grãos em função da temperatura do torrador.

AGRADECIMENTOS: À Universidade Federal de Viçosa e ao Governo do Brasil pela aceitação nos estudos de doutorado.

REFERÊNCIAS:

BASILE, M.; KIKIC, I. A lumped specific heat capacity approach for predicting the non-stationary thermal profile of coffee during roasting. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 3, n. 2, p. 167-177, 2009.

BOTELHO, F.M. **Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de *Coffea canephora***. 2012. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

FABBRI, A.; CEVOLI, C.; ALESSANDRINI, L.; ROMANI, S. Numerical modeling of heat and mass transfer during roasting process. **Journal of Food Engineering**, v. 105, p. 264-269, 2011.

FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; OLIVEIRA, R.C.S.; AGRESTI, P.C.M.; AUGUSTI, R. A preliminary evaluation of the effect of processing temperature of coffee roasting degree assessment. **Journal of Food Engineering**, v. 92, p. 345-352, 2009.

HERNÁNDEZ, J.A.; HEYD, B.; IRLES, C.; VALDOVINOS, B.; TRYSTRAM, G. Analysis of the heat and mass transfer during coffee batch roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 1141-1148, 2007.

ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the science of quality**. 2.ed. London: Academic Press Limited, 2005. 398 p.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ. **Sobre o café: Torrefação e preparação**. Disponível em: http://www.ico.org/es/making_coffeec.asp?section=Acerca_del_caf%E9. Acesso em: 11 jun. 2023.

PERRONE D, DONANGELO R, DONANGELO CM, FARAH A. Modeling weight loss and chlorogenic acids content in coffee during roasting. **J Agric Food Chem**. 2010 Dec 8;58(23):12238-43. doi: 10.1021/jf102110u. Epub 2010 Nov 4. PMID: 21049932.

PORRAS ZÚÑIGA, M.C.; VARGAS-ELÍAS, G.A., ARAÚZ MADRID, L.; ABARCA ALPÍZAR, Y. N. Efecto de la temperatura en la rapidez del tostado de café. **Revista Tecnología en Marcha**, [S.l.], v. 32, n. 7, p. Pág. 20–27, 2019. DOI: 10.18845/tm.v32i7.4255. Disponível em: https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4255

SCHWARTZBERG H. (2013) Batch Coffee Roasting; Roasting Energy Use; Reducing That Use. In: Yanniotis S., Taoukis P., Stoforos N., Karathanos V. (eds) **Advances in Food Process Engineering Research and Applications**, C.10. Food Engineering Series. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7906-2_10

VARGAS-ELÍAS, G.A., CORRÊA, P.C., SOUZA, N. R. DE, BAPTESTINI, F.M., MELO, E. D.C. (2016). Kinetics of Mass Loss of Arabica Coffee During Roasting Process. **Engenharia Agrícola**, 36(2), 300–308. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v36n2p300-308/2016>

WANG, X.; LIM, L.T. A kinetics and modeling study of coffee roasting under isothermal conditions. **Food Bioprocess Technology**, DOI 10.1007/s11947-013-1159-8, 2013 Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11947-013-1159-8>>.