

ADAPTACÃO DE UM MODELO DE TEMPERATURA DOS GRÃOS DE CAFÉ NA TORREFAÇÃO

TEMPERATURE MODEL ADAPTATION OF COFFEE IN THE ROASTING PROCESS

Guillermo A. Vargas-Elías¹

¹Ingeniero Agrícola. D. Sc. Profesor, CIGRAS-UCR, San José, Costa Rica. (506+) 2511-8820. gvargase@gmail.com

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho ajustar um modelo de aquecimento para representar a cinética da temperatura dos grãos durante a torração do café. Foram usadas amostras de 350 g de grãos beneficiados retidos em peneira 17 e 18, de café arábica com teor de água de $0,1032 \text{ kg}_{\text{água}} \square \text{kg}_{\text{produto}}^{-1}$ ($\text{kg}_a \square \text{kg}^{-1}$). 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 em 246, 269, 295 e 340 °C, respectivamente. O aquecimento dos grãos foi contínuo durante todo o processo. 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 dos grãos, considerando que calor do torrador é usado tanto para aquecimento da massa quanto para evaporação da água na superfície dos grãos. Observou-se que o processo de torrefação foi realizado em condições não isotérmicas da parede. O modelo múltiplo exponencial que foi utilizado para aquecimento dos grãos durante a secagem foi adaptado adequadamente às condições de operação do torrador para representar a cinética do aquecimento do café durante a torrefação com r^2 acima de 0,98.

PALAVRAS CHAVE

Grano de Café, temperatura del grano, tostador convencional, modelo de calentamiento.

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 $0.1032 \text{ kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{product}}^{-1}$ ($\text{kg}_w/\text{kg}_p^{-1}$) were used. A burning gas roaster drum 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 at 246, 269, 295 and 340°C, respectively. It was observed that coffee roasting process is non-isothermal process. The grains temperature was increased in roasting time. The rate increasing grain temperature depended of roaster temperature conditions. As the roaster temperature increased, the temperature grains rate increased as well, reducing significantly the total time. The temperature kinetics model developed for grain drying was adapted for roasting process, which set up properly with r^2 of 0.98.

KEYWORDS: Coffee bean, Grain temperature, Drum roaster, Heating model.

INTRODUÇÃO

A torração é um processo de tratamento térmico onde os grãos beneficiados são aquecidos até produzir mudanças físicas e químicas desejáveis, como a cor e o aroma característico do café (RUOSI et al., 2012). A torrefação ou torração é um processo complexo onde há transferência simultânea de calor e massa no café, envolvendo tanto a remoção de água quanto às mudanças na cor e no sabor (PUTRANTO; CHEN, 2012). Com a torração é agregado valor ao produto não entanto, tal processo é considerado uma das etapas mais críticas da industrialização. A torração por si só, não pode fazer um café especial ou tornar um café comum em especial, mas pode contribuir na perda da qualidade (REZENDE et al., 2007).

Os torradores podem ser classificados segundo seu projeto mecânico, pela transmissão de calor e pelo tipo de operação, seja contínua ou batelada (BONNLÄNDER et al., 2005). 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; WANG; LIM, 2013). 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 (WANG; LIM, 2013), 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 (FRANÇA et al., 2009). O mecanismo exotérmico pode ser estudado a partir do modelo de aquecimento dos grãos (HERNÁNDEZ et al., 2008). O mecanismo de aquecimento depende da transferência de calor efetiva, já que os grãos atingem a temperatura em diferentes taxas para iniciar a pirólise em tempos diferentes.

Sendo o torrador de cilindro horizontal utilizado amplamente, na indústria brasileira, se objetivou com esse trabalho determinar a relação entre a temperatura dos grãos e a temperatura do torrador durante a torração do café e adaptar o modelo físico de aquecimento dos grãos.

METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Qualidade Sensorial e Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas, do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), do Departamento de Engenharia Agrícola, localizado na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

Foram utilizados grãos de café *Coffea arabica* L., var. Catuaí amarelo, com teor de água inicial de 10,32% b.u., provenientes de uma beneficiadora de café localizada em Coimbra,

MG. Os grãos foram avaliados sensorialmente com qualidade da bebida mole e foram classificados por forma e tamanho. Foram selecionados aqueles grãos sem defeitos e retidos nas peneiras n° 17 e 18, homogeneizados e divididos em amostras iguais.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e armazenadas em câmara fria à temperatura em torno de 20 °C, a fim de se manterem as características do produto até sua torrefação. Antes das operações de torrefação, as amostras foram retiradas da câmara fria e expostas à temperatura ambiente por aproximadamente 6 horas, visando atingir o equilíbrio térmico para minimizarem as alterações relacionadas à temperatura.

Foi utilizado um torrador a gás de combustão direta marca Rod-Bel, com cilindro perfurado em movimento rotativo a 45rpm, 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.

A temperatura do café foi determinada com os grãos em movimento durante o processo a cada 30 s. A distância entre o medidor e os grãos foi de 25 cm, conforme a Figura 1.



Figura 1 - Medição da temperatura na parede interna do torrador e da massa dos grãos de café.

Considerando os princípios básicos da teoria da secagem de camada fina com ar quente (Pabis et al., 1998), o calor transferido ao sólido é usado para aumentar a temperatura do grão e para evaporar a água, a solução deste modelo é segundo a Equação 1.

$$T = T_a + \frac{S}{B - K} [\exp(-K \cdot t) - \exp(-B \cdot t)] + (T_0 - T_a) \exp(-B \cdot t) \quad (1)$$

em que

T: temperatura do grão em qualquer momento (°C); T_a: temperatura da parede do torrador no início (°C); T₀: temperatura do grão no início (°C);

t: tempo do processo (min); e

S, B, K: constantes a determinar por regressão não linear.

O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado, tendo as quatro temperaturas do torrador (290, 310, 345 e 380°C) e o tempo; como variáveis independentes e sendo a temperatura dos grãos a variável resposta, para todos os tratamentos foram feitas três repetições.

Para os ajustes dos modelos matemáticos, foi utilizado o programa computacional SIGMA PLOT 12.0. Para verificar o grau de ajuste dos modelos, foi considerado o coeficiente de determinação (R^2), do erro médio relativo (P) e do desvio-padrão da estimativa (SE).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No início da torra, a temperatura da superfície dos grãos aumentou bruscamente devido ao elevado gradiente térmico entre o torrador e os grãos ($T_i - T_0$), que foi superior a $265\text{ }^\circ\text{C}$. O aumento significativo da temperatura na superfície dos grãos foi efeito do tipo do torrador, onde o calor foi transferido por condução, convecção e radiação (FABBRI et al., 2011).

Na Figura 2, observa-se que nas três repetições a evolução térmica dos grãos foi semelhante, contínua e crescente durante todo o processo. A cinética da temperatura na superfície dos grãos concorda com outras pesquisas, onde no início da torrefação é crescente e em forma exponencial (HERNÁNDEZ et al., 2007; BOTTAZZI et al., 2012), chegando ao final com tendência linear (FRANÇA et al., 2009; BOTELHO, 2012).

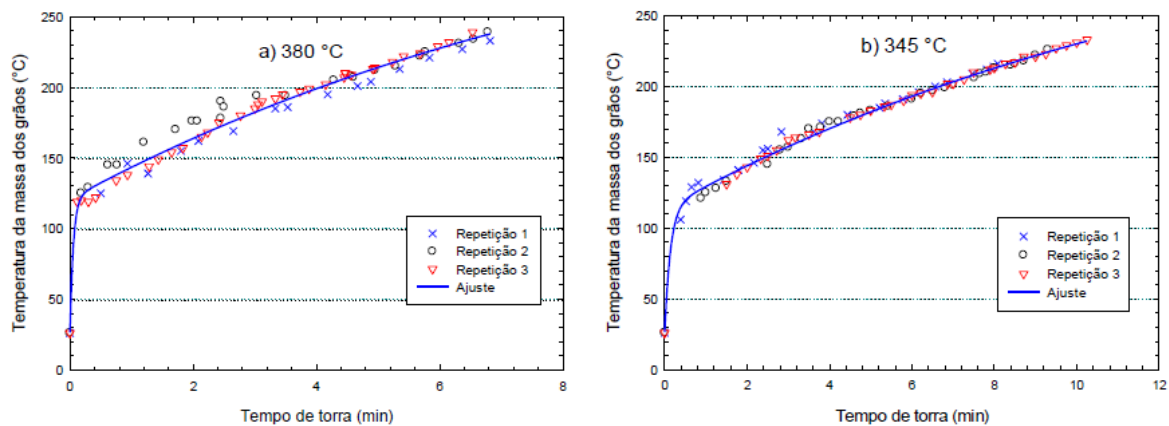


Figura 3. Cinética do aquecimento dos grãos de café a temperaturas do torrador de $380\text{ }^\circ\text{C}$ (a) e $345\text{ }^\circ\text{C}$.

Ainda na Figura 2, observa-se o ajuste dos modelos para as temperaturas de torra de 380 e $345\text{ }^\circ\text{C}$, também foram realizadas as 310 e $290\text{ }^\circ\text{C}$. Na temperatura de $345\text{ }^\circ\text{C}$, os grãos apresentaram semelhanças na cinética do aquecimento em torras com 10 min; portanto

nessa condição, podem-se obter grãos torrados mais uniformes e cumprindo a norma do tempo de torra recomendada (OIC, 2014).

O modelo ajustou-se adequadamente os dados segundo se observa nas bandas de predição para 95 % de probabilidade. Na Tabela 1 pelos valores obtidos na análise estatística pode-se inferir que o modelo foi ajustado adequadamente para cada temperatura do torrador com magnitude do coeficiente de determinação (r^2) maior que 0,98, as constantes B, S e K do modelo foram determinados com valor-p menor a 0,0001. Tabela 1 – Resultados da análise de regressão não linear dos valores de B, S e K para representar a cinética da temperatura dos grãos de café durante o processo de torrefação.

Parâmetro	290 °C	310 °C	345 °C	380 °C
Constantes determinadas				
B (min^{-1})	0,0482	0,0539	0,0699	0,1016
S ($^{\circ}\text{C min}^{-2}$)	252,036	575,308	623,710	1750,120
	5	1	3	1
K (min^{-1})	3,3079	6,5047	7,2128	18,6636
Ajuste estatístico				
R	0,9957	0,9964	0,9974	0,9903
R ²	0,9914	0,9927	0,9949	0,9807
Adj. Rsqr	0,9912	0,9926	0,9947	0,9801
SE	3,1360	3,0741	2,5564	5,5053
Erro padrão de estimação				
B (min^{-1})	0,0006	0,0006	0,0007	0,0022
S ($^{\circ}\text{C min}^{-2}$)	29,6947	33,7477	98,0729	372,8785
K (min^{-1})	0,3990	0,4054	1,1488	4,0838

O grau de ajuste do modelo pelo desvio padrão da estimativa (SE) foi ao máximo 5,5% o que demonstra que o ajuste foi adequado nas quatro temperaturas avaliadas. Na Figura 4, cada linha representa uma posição do regulador do queimador de gás, cuja queima se manteve constante. Nessa condição os grãos mantiveram a mesma taxa de aquecimento durante o processo, portanto não se observou mudança térmica na superfície dos grãos devido ao início das reações exotérmicas no interior dos cafés.

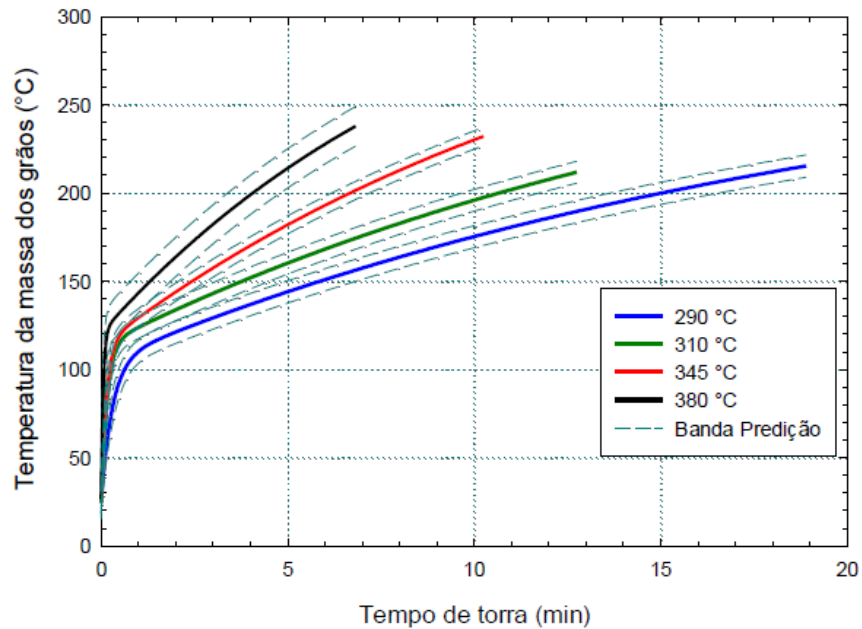


Figura 4 - Modelo de aquecimento dos grãos de café durante o processo de torrefação e as bandas de predição para 95 %, em quatro temperaturas do torrador.

Em torradores industriais fechados é difícil medir a temperatura da parede durante a torrefação, portanto o modelo facilita a análise do processo porque precisa somente da condição inicial tanto do torrador (T_i) quanto dos grãos (T_0), ditos valores são de previamente conhecidos.

A cinética do aquecimento dos grãos no torrador rotativo horizontal é diferente do torrador tipo leito fluidizado onde a torra é realizada em condições isotérmicas do ar em transferência de calor por convecção (SCHENKER, 2000; HERNÁNDEZ et al., 2007; FABBRI et al., 2011; BOTAZZI et al., 2012; ALONSO-TORRES et al., 2013; WANG; LIM, 2013).

CONCLUSÕES

O aquecimento dos grãos foi contínuo durante o processo, observando-se uma tendência linear no final da torra. Foi adaptado o modelo matemático de aquecimento dos grãos que

ajustou adequadamente aos dados experimentais, considerando que calor do torrador é usado tanto para aquecimento da massa quanto para evaporação da água na superfície dos grãos.

REFERÊNCIAS

ALONSO-TORRES, B.; HERNÁNDEZ-PÉREZ, J.A.; SIERRA-ESPINOZA, F.; SCHENKER, S.; YERETZIAN, C. Modeling and validation of heat and mass transfer in individual coffee beans during coffee roasting process using Computational Fluids Dynamics (CFD). *CHIMIA*, v. 67, n. 4, p. 291-294, 2013.

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.

BONNLÄNDER, B.; EGGERS, R.; ENGELHARDT, U.H.; MAIER, H.G. Roasting. In: ILLY, A.; VIANI, R. (Eds.). 2005. Espresso coffee: the science of quality. 2.ed. London: Elsevier A.P.

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.

BOTTAZZI, D.; FARINA, S.; MILANI, M.; MONTORSI, L. A numerical approach for the analysis of coffee roasting process. *Journal of Food Engineering*, v. 112, p. 243-252, 2012.

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.; AGRETI, 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 - OIC. Sobre o café: Torrefação e preparação. Disponível em: <http://www.ico.org/es/making_coffee.asp?section=Acerca_del_caf%E9>. Acesso em: 30 set. 2014.

PABIS, S.; JAYAS, D.; CENKOWSKI, S. Grain drying: theory and practice. Toronto, Canada: John Wiley & Sons, 1998. 303 p.

PERRONE, D.; DONANGELO, R.; DONANGELO, C.M.; FARAH, A. Modeling weight loss and chlorogenic acids content in coffee during roasting. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 58, p. 12238-12243, 2010.

PUTRANTO, A.; CHEN, X.D. Roasting of barley and coffee modeled using the lumped-reaction engineering approach (L-REA). Drying Technology, v. 30, p. 475-483, 2012.

REZENDE, A.M.; ROSADO, P.L.; GOMES, M.F.M. Café para todos: a informação na construção de um comércio de mais justo. Belo Horizonte: SEGRAC, 2007. 148 p.

RUOSI, M.R.; CORDERO, C.; CAGLIERO, C.; RUBIOLO, P.; BICCHI, C.; SGORBINI, B.;

LIBERTO, E. A further tool to monitor the coffee roasting process: Aroma composition and chemical indices. Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 60, p. 11283-11291, 2012.

SCHENKER, S. Investigations on the hot air roasting of coffee beans. 2000. Tese (Doutorado) - Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Zurique, Suíça.

SCHWARTZBERG, H. 2002. Modelling bean heating during batch roasting of coffee beans. In: Welti-Chanes, Barbosa-Canovas & Aguilera (Eds.). Engineering and food for the 21st century. London, New York, Boca Raton: CRC Press LLC.

Vargas-Elías, G. 2014. Cinética do aquecimento, da expansão volumétrica e da perda de massa em grãos de café durante a torrefação. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, Brasil. p.68

Wang, X.; Lim, L.T. 2013. 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>>. Acesso em: 25 no