

CINÉTICA DA MATÉRIA SECA DO CAFÉ EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE TORREFAÇÃO

Guillermo Asdrúbal Vargas Elías¹; Paulo Cesar Corrêa²; Natália Rodrigues de Souza³; Fernanda Machado Baptestini⁴; Lara Santana Fernandes⁵

¹ Eng. Agrícola, Doutorando DEA-UFV, Viçosa - MG, guillermo.elias@ufv.br

² Eng. Agrônomo, DS., Professor Adjunto do DEA - UFV, Viçosa - MG, copace@ufv.br

³ Graduanda em Eng. de Alimentos, UFV, Viçosa-MG, natalia.r.souza@ufv.br

⁴ Eng.^a. Agrícola, Doutoranda DEA-UFV, Viçosa - MG, fernanda.baptestini@ufv.br

⁵ Eng.^a. de Alimentos, Doutoranda DEA-UFV, Viçosa - MG, lara.santana@ufv.br

RESUMO: Objetivou-se com este trabalho determinar a relação entre a taxa de variação da matéria seca dos grãos de café em função da temperatura do torrefador para produzir grãos torrados ao nível comercial. Foram usadas amostras de 350 g de grãos de café arábica com teor de água inicial de $0,1217 \text{ kg}_{\text{água}} \text{ kg}_{\text{produto}}^{-1}$ ($\text{kg}_a \text{ kg}^{-1}$). Usou-se um torrador a gás nas temperaturas iniciais de 380, 345, 325 e 285 °C. O teor de água foi obtido após colocar os grãos por 24 h em estufa a 105 °C. A matéria seca foi calculada a partir da massa total e o teor de água da amostra. Observou-se que mantendo a queima de gás constante a temperatura de operação inicial do torrefador diminuiu até se equilibrar em 255, 285, 305 e 335 °C. Observou-se que a massa seca diminuiu a taxa constante e em função da temperatura do torrefador. Quando se aumentou a temperatura do torrador aumentou também a taxa mássica em termos absolutos, diminuindo significativamente tanto o tempo total quanto o tempo entre cada nível de torração dos grãos. As taxas de variação da matéria seca foram relacionadas à temperatura do torrefador segundo o modelo de Arrhenius, que ajustou adequadamente com r^2 acima de 0,997 e que permitiu o cálculo da energia de ativação $40,14 \text{ kJ mol}^{-1}$, necessária para transformar a matéria seca e produzir grãos de café com sabor, aroma e cor característicos dos índices de torração comercial.

PALAVRAS-CHAVE: *Café arábica*, diminuição da massa seca, grau de torrefação, temperatura de torrefação.

DRY MATTER KINETICS OF COFFEE RELATED OF ROASTING TEMPERATURE PROCESS

ABSTRACT: In this work it was determined the relationship between variation rate of dry matter of coffee beans and the function temperature of roaster to produce roasted coffee beans in commercial level. It was used samples of 350 g of arabic coffee beans with initial water content of $0.1217 \text{ kg}_{\text{water}} \text{ kg}_{\text{product}}^{-1}$ ($\text{kg}_w \text{ kg}^{-1}$). It was used a burning gas roaster with initial temperatures of de 380, 345, 325 e 285 °C. Water content of coffee beans was calculated after 24 h of have them in air convection forced oven a 105°C. The dry matter was calculated from the total mass and the water content of samples. It was observed that maintaining gas temperature in constant rate, the roaster initial operation decreased to equilibrate it at 255, 285, 305 e 335 °C. It was observed that dry matter decreased the constant content associated to the roaster temperature function. When increased the roaster temperature also increased of dry matter the rate in absolute terms, reducing significantly both the total time and the time between each level of roasted coffee. The dry matter variation content was related to the roaster temperature according to Arrhenius Model, which set up properly with r^2 of 0.997 and allowed to calculation of activation energy $40.14 \text{ kJ mol}^{-1}$, required to transform the dry matter and produce flavor, odor and color characteristics of roasted coffee beans in commercial indexes.

KEYWORDS: *Arabica coffee*, dry matter release, roasting degree, roasting temperature conditions.

INTRODUÇÃO

No processamento pós-colheita (secagem e armazenamento) de produtos agrícolas, deve-se conservar a matéria seca, portanto a massa seca inicial e a final devem ser as mesmas. Entretanto, qualquer diminuição durante o manuseio dos produtos é considerada como perda de qualidade. Ao contrário, no processo da torrefação do café, a massa seca inicial dos grãos diminui durante a torrefação e parte dessa massa é usada para modificar drasticamente a composição química e física dos grãos, que a usa para liberar gás carbônico e compostos voláteis (PEREZ et al., 2008).

O teor de água do café beneficiado varia de 11 a 12%, para os grãos crus, e de 2,5 a 4%, para os grãos torrados (SIVETZ; DESROSIER, 1979). Illy e Viani (1995) indicaram que a perda de massa tem correlação linear com o grau de torrefação, o que serve para verificar o índice de torração que os grãos atingiram. França et al. (2002), avaliando o teor de água de duas variedades de grãos de café arábica no processo de torrefação, observaram que, aos 12 min de torra, em ambos este ficou semelhante, em aproximadamente $0,02 \text{ kg}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$.

A massa seca está diretamente associada ao nível de torrefação, pois quanto mais escura a cor dos grãos, menor é a matéria seca (VARGAS-ELÍAS, 2011). Em relação às perdas da matéria seca, Clarke e Macrae (1989) classificaram o café em diferentes torras: clara (1 a 5%), média (5 a 8%), escura (8 a 12%) e muito escura (maior de 12%). A

diminuição da massa seca no final da torrefação evidência que parte dela foi utilizada para reagir na formação de compostos voláteis e na liberação de CO₂, durante a pirólise (ILLY e VIANI, 1995).

A taxa de reação é uma equação obtida experimentalmente que fornece a rapidez em que ocorre uma reação. A rapidez na qual uma reação química ocorre pode ser expressa de diversas formas, como taxa de desaparecimento de reagentes ou de formação de produtos (FOGLER, 1999; CASTELLAN, 1998). Experiências mostram que a taxa de reação é influenciada pela composição e a energia do material que pode ser representada pela temperatura (cinética aleatória energia das moléculas), a intensidade da luz no interior do sistema (pode afetar energia de ligação entre átomos), a intensidade do campo magnético, entre outras (LEVENSPIEL, 1999).

A influência da temperatura na velocidade das reações é refletida na taxa de reação específica, que não é verdadeiramente uma constante pois é normalmente dependente da temperatura, da pressão, do pH, entre outros fatores, mas é independente das concentrações das espécies envolvidas na reação. O modelo de Arrhenius relacionou a dependência da temperatura da taxa de reação específica dentro da precisão experimental sobre as faixas de temperatura bastante altas (FOGLER, 1999).

Segundo Atkins e Paula (2012) a energia de ativação (E_a) é o valor mínimo da energia cinética para que uma reação química possa ocorrer durante uma colisão molecular e o fator pré-exponencial (k_0) corresponde a uma medida da velocidade em que as colisões ocorrem independentes de suas energias.

O objetivo do trabalho foi determinar relação entre a taxa de variação da matéria seca dos grãos de café em função da temperatura do torrefador na obtenção de grãos torrados ao nível comercial.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Qualidade Sensorial e no de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas, pertencentes ao 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 Vermelho, beneficiados com tamanho acima da peneira 17, com teor de água inicial de 0,1217 kg_a kg⁻¹, provenientes de uma beneficiadora de café localizada em Viçosa. Os grãos foram avaliados previamente pelo teste da xícara, apresentando qualidade da bebida mole com a pontuação geral entre 80 e 85 pontos.

Foi utilizado um torrefador a gás de combustão direta, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com aquecimento e capacidade de 350 g de café cru. A taxa de consumo do combustível foi constante.

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 0,1 °C, em distância de 20 cm entre o medidor e o alvo segundo a Figura 1(a). As temperaturas de torrefação foram verificadas na superfície interna do cilindro do torrefador em 380, 345, 325 e 285 °C.

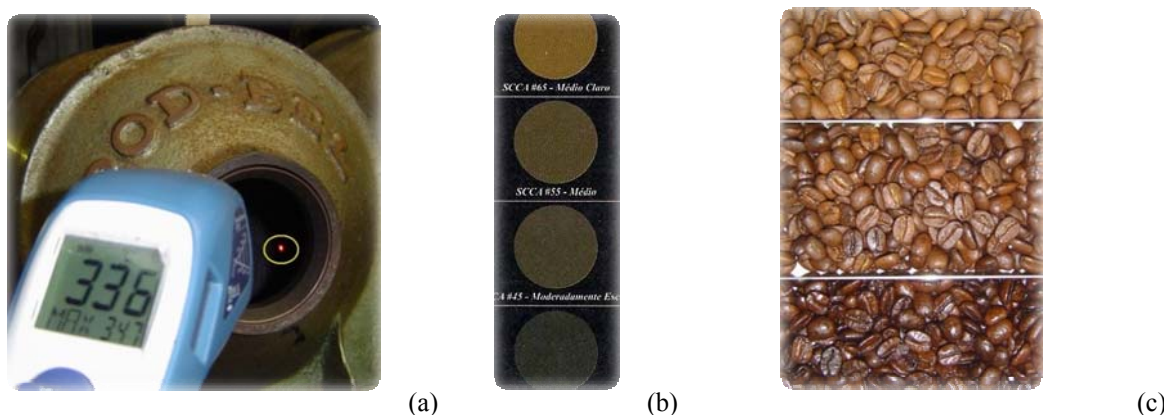


Figura 1. Medição da temperatura (a) na parede interna do cilindro do torrefador e (b) discos coloridos da tabela Agtron para os quatro níveis de torração (c) contraste em três níveis de torração dos grãos de café.

Foram estabelecidos quatro níveis de torrefação aproximados pela cor dos grãos desde médio claro até escuro, associados às cores dos discos da Tabela Agtron da Figura 1(b): SCAA#65 e SCAA#35, respectivamente. Após a torrefação, os grãos foram esfriados com ar a temperatura ambiente.

O produto obtido foi pesado numa balança digital, com precisão de 0,01 g, para estabelecer a massa final do produto e o teor de água foi determinado por meio da secagem das amostras na estufa com circulação de ar a 105 ± 3 °C até massa constante, segundo o método físico-químico para análise de alimentos (INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL, 2008), em três repetições.

A matéria seca foi calculada a partir da massa e do teor de água segundo a equação 1.

$$M = M_r (1 - X) \quad (1)$$

em que, M – matéria seca dos grãos torrados (kg); M_t – massa total dos grãos torrados (kg); X – teor de água dos grãos torrados ($\text{kg}_a \text{kg}^{-1}$).

A lei geral das reações é descrita pela Equação 2

$$\frac{dM}{dt} = \pm k \cdot M^n \quad (2)$$

em que, k – taxa mássica de reação da matéria seca dos grãos (kg min^{-1}); M – matéria seca dos grãos de café torrados (kg); n – ordem da reação (adimensional); t – tempo em que ocorre a reação (min).

A taxa de matéria seca será negativa devido a sua transformação em compostos voláteis e não voláteis do café, diminui durante a torrefação. Considerando que o torrefador é um reator do tipo batelada, onde não há nem alimentação nem descarga de reagentes e produtos enquanto a reação ocorre (FLOGER, 1999) e visto que a perda de massa foi linear em taxa constante (VARGAS-ELÍAS, 2011), a única solução é considerar a ordem zero da reação ($n=0$). A Equação 3 foi considerada adequada para descrever o processo de torrefação da matéria seca e cuja integral descreve-se na Equação 4.

$$\frac{dM}{dt} = -k \quad (3) \quad \int_{M_0}^M dM = -k \int_{t_0}^t dt \quad (4)$$

A solução dessa integral é descrita pela Equação 5.

$$M = M_0 - k \cdot (t - t_0) \quad (5)$$

em que, M – massa seca dos grãos no final da torrefação (kg); M_0 – massa seca dos grãos no início da torrefação (kg); t_0 – tempo em que iniciam as reações da matéria seca (min).

As taxas de variação da matéria seca foram relacionadas com a temperatura do torrefador, segundo o modelo de Arrhenius da Equação 4.

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T_a}\right) \quad (6)$$

em que: k_0 : fator pré-exponencial (g min^{-1}). E_a : energia de ativação (J mol^{-1}). R_g : constante dos gases ($8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$). T_a : temperatura absoluta do torrefador (K).

A taxa da variação da matéria seca foi relacionada com a temperatura do torrefador descrita na seguinte equação,

$$M = M_0 - k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R_g T_a}\right) \cdot (t - t_0) \quad (7)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A perda de massa total foi distribuída principalmente entre água e matéria seca. Quando os cafês recém-torrados foram resfriados com ar, observou-se que não houve relação entre os níveis de torrefação e o teor de água, o valor médio foi $0,011 \text{ kg}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$.

Observou-se que para obter os diferentes níveis de torração comercial dos grãos foi necessário deixar mais tempo a amostra no torrefador, onde a matéria seca diminui desde 307,4 g até atingir 291, 288, 282 e 274, que foram valores associados aos níveis de torração médio claro, médio, moderadamente escuro e escuro, respectivamente.

As linhas observadas na Figura 2 relacionam a diminuição da matéria seca e sua duração segundo a temperatura do torrefador, cujas taxas foram determinadas em 2,0; 3,4; 4,3; e 6,7 g min^{-1} em relação a 255, 285, 305 e 335 °C, respectivamente.

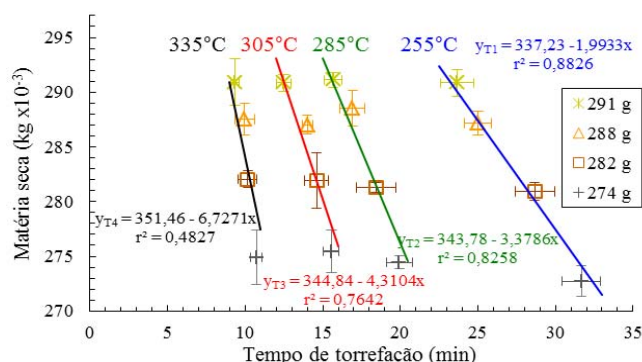


Figura 2 - Diminuição da massa seca dos grãos de café, na obtenção de quatro índices de torração comercial em médio claro (x), médio (Δ), moderadamente escuro (□) e escuro (+).

O aumento em 80 °C na temperatura do torrefador acrescentou em mais de três vezes a taxa de variação da matéria seca, reduzindo o tempo do processo de 24 para 9 min na torra clara e de 33 para 10 min na torra escura.

A partir dos dados da Tabela 1, observa-se que houve diminuição da temperatura devido ao ingresso dos grãos crus a 25 °C no interior do torrefador, para o qual foram identificadas tanto as temperaturas no início quanto no final da torração.

Tabela 1. Parâmetros térmicos do torrefador antes (T_i) e depois (T_f) de colocar as os grãos de café.

Temperatura do torrefador				T_i^{-1}	T_f^{-1}	k	ln(k)
Inicial (°C)	Inicial (K)	Final (°C)	Final (K)	($10^{-3} K^{-1}$)	($10^{-3} K^{-1}$)	$g\ min^{-1}$	
380	653,15	335	608,15	1,5310	1,6443	6,7270	1,9061
345	618,15	305	578,15	1,6177	1,7296	4,3104	1,4610
325	598,15	285	558,15	1,6718	1,7916	3,3786	1,2175
285	558,15	255	528,15	1,7916	1,8934	1,9933	0,6898

Nas duas temperaturas de operação do torrefador (Figura 3) observou-se que a regressão linear determinou adequadamente os parâmetros k_0 e E_a do modelo de Arrhenius com r^2 acima de 0,997.

Em relação as temperaturas de operação do torrefador no início e no final da torração, pela inclinação das linhas da Figura 3 foram obtidas as duas energias de ativação 38.614,2 e 40.145,4 $J\ mol^{-1}$, respectivamente. Nessa ordem e pela interseção das linhas com o eixo $ln(k)$, foram determinados os fatores pré-exponenciais 8.068,5 e 18.760,9 $g\ min^{-1}$, respectivamente.

No processo de torrefação de café arábica, a energia de ativação para degradação dos ácidos clorogênicos foi determinada de 44,4 $kJ\ mol^{-1}$ quando os grãos foram torrados com ar a temperaturas entre 170 e 200 °C (PERRONE et al., 2010). A energia de ativação para a transformação da matéria seca foi inferior à degradação dos ácidos clorogênicos devido às maiores temperaturas de operação associadas ao tipo de torrefador que podem gerar temperaturas acima de 200°C no interior da câmara.

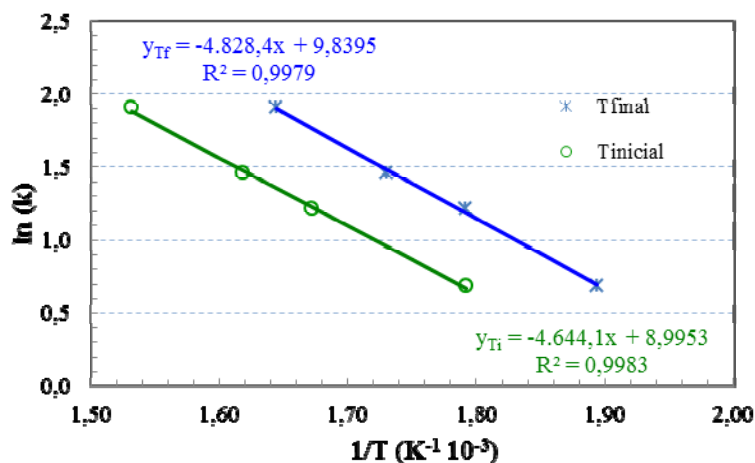


Figura 3 – Ajuste linear da inversa da temperatura do torrefador e a taxa de variação da matéria seca.

Segundo as temperaturas em equilíbrio do torrefador no final do processo, a variação da matéria seca dos grãos de café pode ser descrita pela seguinte equação:

$$M = 307,4 - 18.760,9 \cdot (t - t_0) \exp \left[\frac{-40.145,4}{8,3145(T + 273,15)} \right] \quad (8)$$

O valor de t_0 é o tempo em que iniciam as reações da matéria seca e deve ser determinado experimentalmente já que depende da temperatura do torrefador e corresponde a aproximadamente 67% do tempo total de torrefação.

CONCLUSÕES

Obteve-se que a temperatura do torrefador determinou a rapidez do processo, diminuindo tanto o tempo total quanto o tempo entre cada nível de torração dos grãos. O modelo matemático desenvolvido representou adequadamente a relação entre a taxa mássica de transformação da matéria seca em função da temperatura do torrefador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidad de Costa Rica, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro na pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ATKINS, P.; PAULA, J. de. **Físico-Química: Volume 2**, 9ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 459p.
- CASTELLAN, G. W. **Físicoquímica**, 2 Ed. México: Addison Wesley Longman de Mexico S.A. de C.V., 1998. 1057p.
- CLARKE, R.J.; MACRAE, R. **Coffee: Technology**. London: Elsevier Applied Science, 1989. v. 2, 321 p.
- FOGLER, H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**, 3 Ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1999. p 967.
- FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; VITORINO, M.D. Efeito da taxa de aquecimento na evolução da perda de massa e teor de umidade de grãos de café durante a torra. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. especial, n. 4, p. 3-8, 2002.
- ILLY, A.; VIANI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. London: Academic Press, 1995. 253 p.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. 4.ed. São Paulo: IMESP, 2008. p. 1004.
- PEREZ, R.; SOUSA, R.; RAMOS, A.; FARIA, R.; PASSAGLIA, L.; OLIVEIRA, E.; ROCHA, R. **Agroindústria de café torrado e moído: viabilidade técnica e econômica**. Viçosa: UFV, 2008. 119 p.
- SIVETZ, M.; DESROSIER, N.W. **Coffee technology**. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, 1979. 716 p.
- VARGAS-ELÍAS, G. A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. (Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola). Viçosa. Universidade Federal de Viçosa. 2011. 114 p.