

GUILLERMO ASDRÚBAL VARGAS ELÍAS

**CINÉTICA DO AQUECIMENTO, EXPANSÃO VOLUMÉTRICA E PERDA DE  
MASSA EM GRÃOS DE CAFÉ DURANTE A TORREFAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2014

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V297c  
2014

Vargas-Elias, Guillermo Asdrubal, 1970-  
Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação / Guillermo Asdrubal Vargas-Elias. - Viçosa, MG, 2014.  
vii, 68f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Paulo César Corrêa.  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Inclui bibliografia.

1. Café - Propriedades físicas. 2. Café - Efeito da temperatura. 3. Torrefação. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 633.73

GUILLERMO ASDRÚBAL VARGAS ELÍAS

**CINÉTICA DO AQUECIMENTO, EXPANSÃO VOLUMÉTRICA E PERDA DE MASSA EM GRÃOS DE CAFÉ DURANTE A TORREFAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 26 de agosto de 2014.



Sérgio Maurício Lopes Donzeles



Valéria Paula Rodrigues Minim



Lêda Rita D'Antonino Faroni



Fábio Lúcio Santos  
(Coorientador)



Paulo César Corrêa  
(Orientador)

Ebenézer: até aqui nos ajudou O Senhor.  
Em memória da minha mãe Dona Esperanza (1950-2014).

## **BIOGRAFIA**

GUILLERMO ASDRÚBAL VARGAS ELÍAS, nasceu em San Salvador, El Salvador, no dia 22 de março de 1970.

Em junho de 1990, iniciou o curso da Engenharia Agrícola na Universidade de Costa Rica (UCR), San Pedro, San José, graduando-se em junho de 1999.

Foi professor substituto e pesquisador do Centro de Investigações em Grãos e Sementes (CIGRAS) e do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade de Costa Rica, de agosto de 1999 até fevereiro de 2009.

Mestrado, em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas.

Em fevereiro de 2011, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa da tese em agosto de 2014.

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vi
ABSTRACT .....	vii
INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS.....	4
CAPÍTULO 1 – CINÉTICA DO AQUECIMENTO DOS GRÃOS DE CAFÉ DURANTE A TORREFAÇÃO.....	6
1. INTRODUÇÃO .....	7
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	8
2.1. Matéria-prima.....	8
2.2. Processo de torrefação.....	9
2.3. Determinação da temperatura nos grãos.....	9
2.4. Determinação da taxa de aquecimento .....	10
2.5. Modelo de aquecimento dos grãos .....	13
2.6. Análise estatística .....	14
2.7. Avaliação do modelo.....	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	15
3.1. Evolução da temperatura da parede do torrador .....	15
3.2. Cinética do aquecimento da massa dos grãos .....	18
3.3. Modelagem do aquecimento dos grãos .....	22
3.4. Validação do modelo .....	23
4. CONCLUSÕES .....	24
5. REFERÊNCIAS.....	25
CAPÍTULO 2 – CINÉTICA DA EXPANSÃO APARENTE DO CAFÉ DURANTE A TORREFAÇÃO .....	27
1. INTRODUÇÃO .....	28
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	29
2.1. Matéria-prima.....	29
2.2. Processo de torrefação.....	29
2.3. Perda de massa.....	31
2.4. Determinação do volume aparente dos grãos .....	31
2.5. Expansão volumétrica aparente.....	31
2.6. Cinética da expansão aparente dos grãos.....	32

2.7. Análise estatística .....	33
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	33
3.1. Expansão aparente em função do aquecimento dos grãos .....	33
3.2. Expansão aparente em função da perda de massa dos grãos .....	35
3.3. Cinética de expansão aparente .....	36
3.4. Modelo de Arrhenius .....	37
3.5. Cinética de expansão com a temperatura do processo .....	40
4. CONCLUSÕES .....	41
5. REFERÊNCIAS .....	42
CAPÍTULO 3 – CINÉTICA DA PERDA DE MASSA SECA DOS GRÃOS DE CAFÉ DURANTE O PROCESSO DE TORREFAÇÃO .....	45
1. INTRODUÇÃO .....	46
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	48
2.1. Matéria-prima .....	48
2.2. Processo de torrefação .....	48
2.3. Perda de massa .....	49
2.4. Teor de água .....	50
2.5. Matéria seca .....	50
2.6. Lei da cinética das reações químicas .....	50
2.7. Efeito da temperatura do torrador .....	51
2.8. Modelo proposto para variação da massa seca .....	52
2.9. Análise estatística .....	52
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	53
3.1. Perda de massa total .....	53
3.2. Teor de água .....	55
3.3. Variação da massa seca .....	59
3.4. Cinética da variação de massa seca .....	60
3.5. Predição do tempo para iniciar a perda da massa seca .....	63
3.6. Modelo de variação da massa seca .....	64
4. CONCLUSÕES .....	65
5. REFERÊNCIAS .....	65
CONCLUSÃO GERAL .....	68

## RESUMO

VARGAS-ELÍAS, Guillermo Asdrúbal, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2014. **Cinética do aquecimento, expansão volumétrica e perda de massa em grãos de café durante a torrefação.** Orientador: Paulo César Corrêa. Coorientadores: Fábio Lúcio Santos e Márcio Arêdes Martins.

Objetivou-se com este trabalho estudar a transferência de calor e massa nas etapas do processo de torrefação do café pela cinética do aquecimento, da expansão volumétrica e a perda de massa dos grãos. Para diferenciar as cinéticas do aquecimento dos grãos foram empregadas quatro temperaturas iniciais do processo (290, 310, 345 e 380°C), que diminuíram devido às condições não isotérmicas da parede, em contato com os grãos. As cinéticas foram adaptadas a um modelo físico de aquecimento dos grãos, considerando que o calor transferido aos grãos é usado tanto para o aquecimento da massa quanto para a evaporação da água na superfície dos grãos. A cinética do aquecimento dos grãos foi ajustada adequadamente a torra dos grãos de café em função da temperatura do torrador. Observou-se nos primeiros minutos de torra que a temperatura dos grãos aumentou bruscamente, após um ponto de inflexão, atingiu uma tendência linear até o final do processo. A transferência de massa foi analisada pelas mudanças físicas causadas pelos gases liberados durante o processo tanto de vapor quanto de dióxido de carbono, o que permitiu separar o processo em duas etapas; de secagem e de torrefação. Foi desenvolvido um modelo matemático baseado na lei das reações químicas para representar o efeito dos gases na expansão volumétrica dos grãos e na transformação da massa seca. A cinética da expansão aparente e a de perda de massa seca do café dependeram diretamente da temperatura do torrador, pelo que foi adequadamente representado pelo modelo de Arrhenius, onde foram determinadas as respectivas energias de ativação para cada etapa.

## ABSTRACT

VARGAS-ELÍAS, Guillermo Asdrúbal, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2014. **Grain heating, swelling and loss mass in grains during roasting.** Adviser: Paulo César Corrêa. Co-Advisers: Fábio Lúcio Santos and Márcio Arêdes Martins.

The objective was to study heat and mass transfer during steps of roasting coffee process by kinetics of grain temperature, swelling and loss mass. The kinetics of grains temperature was associated to initial process temperature (290, 310, 345 and 380°C), which decreased due to non-isothermal conditions of wall in contact with coffee grains. The kinetics of grain temperature were adapted to physical model of heating, whereas the heat transferred to grain is used both for evaporation of water and for heating on the grain surface. The kinetic model of grain temperature was appropriately adjusted for temperature of coffee roaster. The grain temperature was increased sharply to an inflection point, after that, it was observed a linear trend by the end of process. The mass transfer was analyzed for physical changes in grains caused by gases released, as steam and as carbon dioxide, which separated the process in two steps, drying and roasting. A model based on the law of chemical reactions to represent the effect of gases in the volumetric expansion of grains and the transformation of organic mass was developed. The swelling kinetics and lost organic mass were directly depended of temperature roaster, so it was appropriately represented by the Arrhenius model which determined the activation energy for each step.

## INTRODUÇÃO GERAL

Brasil é o segundo país consumidor de café do mundo com 21 milhões de sacas de 60 kg, o que representa 46,3% de toda a produção da safra 2014-2015 (ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ - OIC, 2015; COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2015).

A participação por qualidade nas exportações brasileiras entre outubro 2014 y setembro 2015, foram 77,2% para café arábica, 12,8% para café conilon, 9,8 % para café solúvel e 0,1% café torrado e moído (CECAFE, 2015).

A exportação dos cafés naturais representou 52,8% e os diferenciados com 24,5%. A evolução das exportações de cafés diferenciados foi em aumento em 10,4% entre janeiro e setembro em 2015 (CECAFE, 2015).

No Brasil 70% da população consome café diariamente (POZZA et al., 2010) e, em 2014 o consumo *per capita* foi de 4,89 kg habitante<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de café torrado e moído, dos quais 86,4% do total consumido em forma de pó e 13,6% em grão torrado (ABIC, 2015).

Para consumir o café é necessário transformar quimicamente os grãos crus através da torrefação, que dependendo do nível de torra comercial, são aquecidos entre 180 e 240°C, e entre 8 e 15 min. (OIC, 2014). Na transformação química, as propriedades físicas do café são altamente influenciadas pela relação entre a temperatura dos grãos e o tempo de torrefação (VARGAS-ELÍAS, 2011), o que está associado à transferência de calor (BAGGENSTOSS, 2008).

Para aquecer os grãos beneficiados é necessário um torrador a temperatura entre 180 e 300°C (SCHENKER, 2000; BAGGENSTOSS, 2008). Os torradores com sistemas de ar quente em leito fluidizado são considerados mais eficientes e usam temperaturas baixas (200°C) em torras mais rápidas (2-10 min.) em contraste com os torradores convencionais que possuem cilindros horizontais rotativos (FRANÇA et al., 2002).

Illy e Viani (1995) indicaram que o calor pode ser transferido por condução, pelo contato com uma superfície de metal quente; por radiação, a partir de superfícies aquecidas e por convecção num leito fluidizado de ar quente. No torrador convencional a transferência de calor acontece em todas as formas, e a convecção é natural, devido ao movimento rotativo do cilindro (FABBRI et al., 2011).

O aquecimento dos grãos é a resposta da efetividade da transferência de calor do torrador ao produto. Pode-se estabelecer a relação entre a temperatura final dos grãos em função do tempo e da temperatura do torrador para padronizar o mesmo nível de torrefação, mesmo que os grãos de café sejam de diferentes regiões do mundo (MOON et al., 2009).

SCHWARTZBERG, (2011) determinou a relação entre o perfil da temperatura dos grãos com os níveis de torrefação desde claro até escuro, em torrador tipo leito fluidizado. Também se observou que o nível máximo de temperatura dos grãos foi de 260°C, e alertou que a proximidade desse valor pode induzir a queima dos grãos.

Há uma relação direta entre o nível de torra dos grãos e a qualidade sensorial da bebida. Por exemplo, no café tradicional as torras são mais escuras e em cafés especiais ou gourmet as torras são mais claras. A análise sensorial recomenda as torras entre média e clara, as que foram estudadas com as respectivas perdas de massa dos grãos, onde teve alta correlação tanto no tipo arábica (VARGAS-ELÍAS, 2011) quanto no tipo conilon (BOTELHO, 2012).

A perda de massa dos grãos durante a torra ocorre devido à evaporação da água na etapa de secagem e à perda de matéria seca durante a transformação química, dos processos endotérmicos e exotérmicos do café respectivamente (SIVETZ; DESROSIER, 1979).

Na etapa da secagem do processo de torra, foi observada a perda de massa total de 10% e aumento do volume aparente em 30% (FITO et al., 2007). O limite entre a fase de secagem e de torrefação foi estabelecido a partir da temperatura interna do grão, que correspondeu a 160°C (HEYD et al., 2007; BAGGENSTOSS, 2008), o que coincide com mudanças significativas na evolução da cor na sua superfície (HERNÁNDEZ et al., 2008). Além de mudar a coloração dos grãos de verde para amarelo, também se percebe que o odor muda levemente de cheiro de ervilha verde a cheiro de pão torrado (ILLY; VIANI, 1995).

A modelação da perda de massa pode ser uma ferramenta útil para predizer adequadamente os parâmetros de processo em função do nível de torra dos grãos, associada à degradação da matéria seca, como por exemplo, a transformação dos ácidos clorogênicos durante a torra (PERRONE et al., 2010). A rapidez com que os grãos perdem massa aumenta com a

elevação da temperatura do torrador, podendo se estabelecer a forma linear da cinética da perda de massa para cada temperatura do processo (VARGAS-ELÍAS, 2011).

Neste trabalho foi usado o modelo de transferência de calor e massa por dois motivos importantes: (1) Com este modelo pode-se explicar as relações do binômio temperatura-tempo, do qual dependem as características do equipamento e as mudanças tanto físicas quanto químicas dos grãos de café beneficiados. (2) A partir do modelo foi possível prever tanto o tempo de torra quanto a temperatura dos grãos, que finalmente foram associadas às principais características físicas. Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi estudar a transferência de calor e massa nas etapas do processo de torrefação do café pela cinética do aquecimento, da expansão volumétrica e da perda de massa dos grãos.

Especificamente, objetivou-se:

- Adaptar um modelo matemático de aquecimento dos grãos, considerando que o calor transferido aos grãos é usado tanto para o aquecimento da massa quanto para a evaporação da água na superfície dos grãos;
- Validar a cinética do aquecimento dos grãos adaptado às temperaturas do torrador;
- Determinar a relação entre a variação do volume aparente dos grãos de café e a temperatura de operação do torrador;
- Determinar a relação entre a cinética da variação da matéria seca dos grãos de café em função da temperatura do torrefador, baseado no modelo da cinética das reações químicas.

## REFERÊNCIAS

ABIC. Indicadores da indústria de café no Brasil-2014. 2015. <http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=61#4178>. Acesso em: 27 fevereiro 2015.

BAGGENSTOSS, J. **Coffee roasting and quenching technology**: formation and stability of aroma compounds. 2008. Tese (Doutorado) – Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Zurique, Suíça.

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.

CLARKE, R. J.; MACRAE, R. **Coffee Chemistry**. London: Elsevier Applied Science, 1985. v. 1, 306 p.

DUARTE, S.M.S.; ABREU, C.M.P.; MENEZES, H.C.; SANTOS, M.H.; GOUVÊ, C.M.C.P. Effect of processing and roasting on the antioxidant activity of coffee brews. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 2, p. 387-393, 2005.

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.

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. **Express coffee**: the chemistry of quality. London: Academic Press, 1995. 253 p.

MOON, J.K.; YOO, H.S.; SHIBAMOTO, T. Role of roasting conditions in the level of chlorogenic acid content in coffee beans: correlation with coffee acidity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 57, p. 5365-5369, 2009.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ - OIC. **Sobre o café: Torrefação e preparação**. Disponível em: <[http://www.ico.org/es/making\\_coffeec.asp?section=Acerca\\_del\\_caf%E9](http://www.ico.org/es/making_coffeec.asp?section=Acerca_del_caf%E9)>. Acesso em: 30 set. 2014.

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.

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

POZZA, A. A. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; ROMANIELLO, M. M.; ALVARENGA, M. I. N. **A qualidade do café e opções para o consumo**. 2ª Ed. revisada, Belo Horizonte: Epamig, 2010. 158 p.

SCHWARTZBERG, H. Batch coffee roasting; roasting energy use; reducing that use. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD, 2011, Athens, Greece. **Proceedings**. 2011. Disponível em: <[www.icef11.org/content/papers/fpd/FPD260.pdf](http://www.icef11.org/content/papers/fpd/FPD260.pdf)>.

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**. 2011. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

## CAPÍTULO 1 – CINÉTICA DO AQUECIMENTO DOS GRÃOS DE CAFÉ DURANTE A TORREFAÇÃO

**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  $0,1032 \text{ kg}_{\text{água}} \cdot \text{kg}_{\text{produto}}^{-1}$  ( $\text{kg}_a \cdot \text{kg}^{-1}$ ). 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.

### TEMPERATURE MODEL OF COFFEE GRAINS IN THE ROASTING PROCESS

**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  $0.1032 \text{ kg}_{\text{water}} \cdot \text{kg}_{\text{product}}^{-1}$  ( $\text{kg}_w \cdot \text{kg}^{-1}$ ) 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.

## 1. 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 (PUTRANTO; CHEN, 2012; 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, tanto na indústria brasileira, quanto por pequenos produtores, 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; considerando que o calor do torrador é usado tanto para aquecimento da massa quanto para evaporação da água na superfície dos grãos. Além disso, avaliar o modelo de aquecimento dos grãos adaptados nas condições térmicas estudadas do torrador.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

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.

### **2.1. Matéria-prima**

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.

## 2.2. Processo de torrefação

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 Multi-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 interna do torrador.

## 2.3. Determinação da temperatura nos grãos

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 2.



Figura 2 - Medição da temperatura da massa dos grãos de café.

#### 2.4. Determinação da taxa de aquecimento

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

$$\dot{q}_d = \dot{q}_t + \dot{q}_v \quad (1)$$

em que,

$\dot{q}_d$  : taxa de transferência de calor ao grão (w);

$\dot{q}_t$  : taxa de transferência de calor sensível para aquecimento do grão (w); e

$\dot{q}_v$  : taxa de transferência de calor latente para evaporar a água do grão (w).

A taxa de transferência de calor no sólido é descrita na Equação 2.

$$\dot{q}_d = -h \cdot A(T - T_a) \quad (2)$$

em que:

$h$  : coeficiente global de transferência de calor ( $\text{J m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );

$A$  : área da superfície do sólido ( $\text{m}^2$ );

$T$  : temperatura do grão em qualquer momento ( $^\circ\text{C}$ ); e

$T_a$  : temperatura do ar quente usado na secagem ( $^\circ\text{C}$ ).

A taxa de transferência de calor sensível para aquecimento do grão é descrita na Equação 3.

$$\dot{q}_t = c \cdot \rho_{sw} \cdot V \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

em que:

$c$  : capacidade calorífica do grão úmido ( $\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ );

$\rho_{sw}$  : massa específica unitária do grão úmido ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$V$  : volume unitário de grão úmido ( $\text{m}^3$ ); e

$t$  : tempo do processo (s).

A taxa de transferência de calor latente para evaporar a água do grão é descrita na Equação 4.

$$\dot{q}_v = h_v \cdot \rho_{sd} \cdot V \frac{dX}{dt} \quad (4)$$

em que:

$h_v$  : calor latente de vaporização ( $\text{J kg}^{-1}$ ); e

$\rho_{sd}$  : massa específica unitária do grão seco ( $\text{kg m}^{-3}$ ).

A fim de incluírem os parâmetros das Equações 2, 3 e 4 na Equação 1 e de isolar a taxa de variação da temperatura em relação ao tempo, obtém-se a Equação 5.

$$\frac{dT}{dt} = -\left(\frac{h \cdot A}{c \cdot \rho_{sw} \cdot V}\right)(T - T_a) + \left(\frac{h_v \cdot \rho_{sd}}{c \cdot \rho_{sw}}\right) \frac{dX}{dt} \quad (5)$$

O modelo de Pabis e Henderson (PABIS et al., 1998) inclui o fator de forma na cinética de secagem em grãos, que é descrito na Equação 6.

$$\frac{dX}{dt} = -\Phi \cdot K (X_0 - X_e) \exp(-K \cdot t) \quad (6)$$

em que:

$\Phi$ : fator que depende da forma do sólido; e

$K$ : constante da secagem do modelo.

Incluindo a Equação 5 na 6, obtém-se a Equação 7.

$$\frac{dT}{dt} = -\left(\frac{h \cdot A}{c \cdot \rho_{sw} \cdot V}\right)(T - T_a) - \left[\frac{h_v \cdot \rho_{sd}}{c \cdot \rho_{sw}} \cdot \Phi \cdot K (X_0 - X_e)\right] \exp(-K \cdot t) \quad (7)$$

Para poder definir a constante S, segundo a Equação 8, agrupam-se os parâmetros.

$$S = -\frac{h_v \cdot \rho_{sd}}{c \cdot \rho_{sw}} \cdot \Phi \cdot K (X_0 - X_e) \quad (8)$$

A constante B pode agrupar parâmetros, segundo a Equação 9.

$$B = \frac{h \cdot A}{c \cdot \rho_{sw} \cdot V} \quad (9)$$

Substituindo S e P na Equação 7, obtém-se a Equação 10.

$$\frac{dT}{dt} = -B(T - T_a) + S \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (10)$$

Em razão do tempo, define-se a variável  $Q_{(t)}$  pela equação 11.

$$Q_{(t)} = S \cdot \exp(-K \cdot t) \quad (11)$$

Fazendo a substituição de variáveis, segundo Equação 12.

$$T^* = T - T_a \quad (12)$$

Substituindo-se a Equação 11 pela Equação 10 e trocando a variável  $T^*$ , obtém-se seguinte equação diferencial de primeira ordem.

$$\frac{dT^*}{dt} + BT^* = Q_{(t)} \quad (13)$$

## 2.5. Modelo de aquecimento dos grãos

A Equação 13 com condição inicial  $T^*_{(0)} = T_0 - T_a$  tem a solução da seguinte forma.

$$T = T_a + \frac{S}{B - K} [\exp(-K \cdot t) - \exp(-B \cdot t)] + (T_0 - T_a) \exp(-B \cdot t) \quad (14)$$

em que:

$T$ : temperatura do grão em qualquer momento (°C);

$T_a$ : temperatura da parede do torrador no início (°C);

$T_0$ : temperatura do grão no início (°C);

$t$ : tempo do processo (min); e

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

## 2.6. Análise estatística

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 considerada a magnitude do coeficiente de determinação ( $r^2$ ), do erro médio relativo (P) e do desvio-padrão da estimativa (SE), segundo as Equações 15 e 16:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (15)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (16)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  : valor estimado pelo modelo;

n : número de dados observados; e

GLR : graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

## 2.7. Avaliação do modelo

O modelo de aquecimento dos grãos foi testado para três temperaturas do torrador (290, 310 e 345 °C). Em cada temperatura foram colocadas amostras de café para obter nove pontos de torração na faixa de temperatura dos grãos entre 145 e 235 °C, mantendo 10 °C de diferença entre si.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Evolução da temperatura da parede do torrador

O torrador de batelada deve-se preaquecer por 15 min até atingir a temperatura de operação com variação de  $\pm 5$  °C, visto que as condições iniciais devem se manter constantes antes de colocar a primeira amostra de grãos. Uma vez que foi retirada a primeira amostra do torrador, este atingiu novamente a temperatura inicial em aproximadamente 5 min. O tempo de aquecimento inicial para torradores horizontais está de acordo com Basile e Kikic (2009), que determinaram entre 8 e 20 min.

O processo de torrefação ocorreu em condições não isotérmicas, visto que a temperatura variou bruscamente da condição inicial entre 40 e 50 °C (DT). Na Tabela 1, encontram-se as médias da temperatura da parede do torrador, tanto na condição inicial quanto durante a operação.

Tabela 1 – Condição da temperatura do torrador antes e depois de colocar os grãos de café

Temperatura do torrador (°C)			Tempo de torra* (min)
Início (T <sub>i</sub> )	Operação (T <sub>e</sub> )	DT (T <sub>i</sub> -T <sub>e</sub> )	
380 ± 5	340 ± 5	40 ± 10	6,5
345 ± 2	295 ± 3	50 ± 5	9,4
310 ± 3	269 ± 3	42 ± 5	14,2
290 ± 2	246 ± 5	44 ± 7	19,0

\* Tempo em que os grãos atingiram 225°C.

Na Figura 3, observa-se que a temperatura da parede do cilindro diminuiu exponencialmente devido ao ingresso dos grãos ao interior do torrador. A razão térmica entre a parede quente e os grãos foi de pelo menos 10 vezes; considerando que a temperatura inicial dos grãos foi  $25 \pm 1$  °C, o torrador transferiu continuamente calor aos grãos até atingir o nível de torração comercial, que neste caso foi 225 °C. Após 2,0 min a temperatura de operação do torrador

variou ao máximo  $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  até o final do processo, o que foi usado como critério de estabilização no torrador.

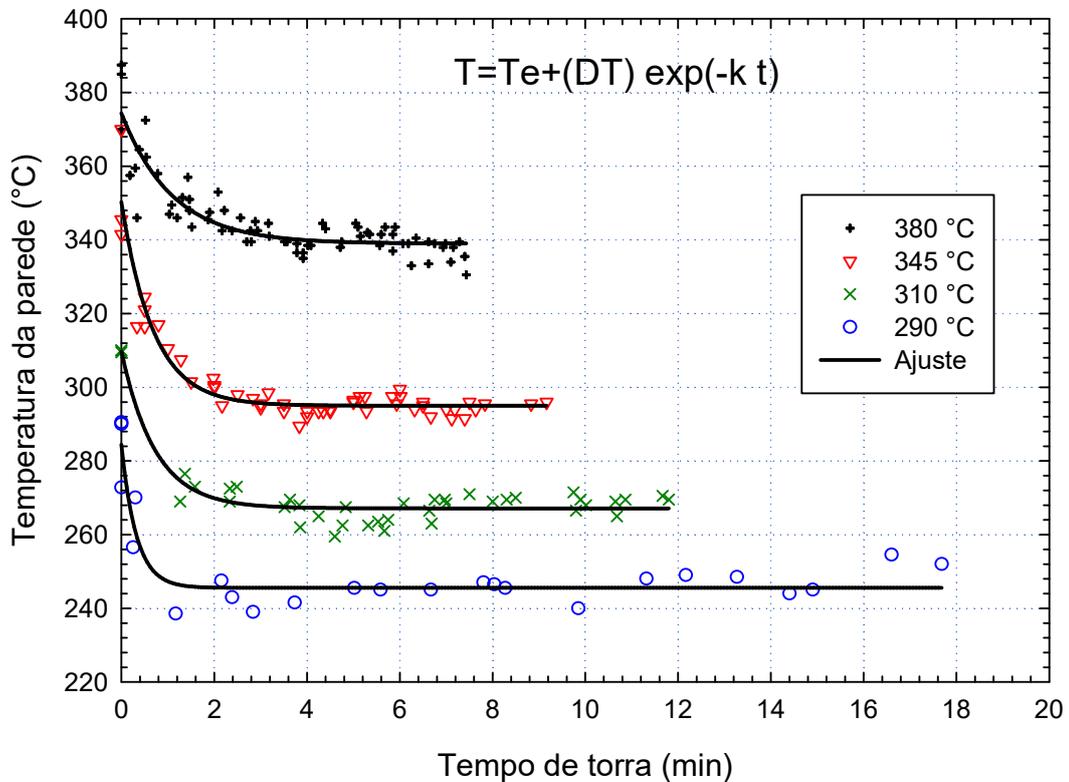


Figura 3 - Temperatura média do torrador em quatro condições de operação quando os grãos do café atingir  $225 \text{ }^\circ\text{C}$ .

A diminuição da temperatura nos primeiros 2 min foi observada nesse torrador com massas de 350 g tanto para café arábica (VARGAS-ELÍAS, 2011) quanto para café conilon (BOTELHO, 2012), portanto, o torrador mantém a mesma tendência de operação se a massa, o tamanho e a umidade dos grãos é semelhante.

A cinética da temperatura produzida pelo ingresso dos grãos no torrador pode se aproximar ao modelo exponencial de dois termos. As constantes desse modelo foram calculadas por regressão não linear e estão associadas à temperatura inicial ( $T_i$ ), à variação máxima das temperaturas ( $DT$ ) e à taxa de resfriamento ( $k$ ) do torrador. Observam-se na Tabela 2 os resultados da análise de regressão.

Tabela 2 - Resultados da análise de regressão não linear para determinar os parâmetros de  $T_e$ , DT e k em cada temperatura do processo.

Parâmetro	290 °C	310 °C	345 °C	380 °C
		<b>Constantes determinadas</b>		
$T_e$ (°C)	245,5658	267,1412	295,0052	339,0021
DT (°C)	38,8854	42,6220	55,2734	35,3694
k (min <sup>-1</sup> )	3,0874	1,3673	1,4533	0,9120
		<b>p-valor</b>		
$T_e$ (°C)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
DT (°C)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
k (min <sup>-1</sup> )	0,0031	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		<b>Ajuste estatístico</b>		
R	0,9291	0,9624	0,9597	0,8907
R <sup>2</sup>	0,8633	0,9262	0,9210	0,7934
Adj. Rsqr	0,8503	0,9222	0,9177	0,7871
SE	5,5905	3,2792	4,3884	5,0523
		<b>Erro padrão de estimação</b>		
$T_e$ (°C)	1,2968	0,5959	0,7416	0,9236
DT (°C)	3,4592	1,9780	2,4908	2,3473
k (min <sup>-1</sup> )	0,9237	0,2144	0,1470	0,1322

A importância de estabelecer a cinética do resfriamento da parede do torrador é que permite associar-se a outras características tanto do torrador na transferência de calor quanto à quantidade dos grãos utilizados. Por exemplo, nesta pesquisa com café arábica o parâmetro DT que foi calculado por regressão para o modelo exponencial entre 39 e 55 °C, em café conilon foi determinado entre 34 e 57 °C, onde as diferenças inicial e final do torrador aumentaram à medida que aumentou a temperatura de operação (BOTELHO, 2012).

### 3.2. Cinética do aquecimento da massa dos grãos

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 °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).

A temperatura dos grãos foi obtida na superfície do café em movimento foi acompanhada durante todo o processo. A classificação por forma e tamanho permitiu que a temperatura dos grãos fosse homogênea em toda a massa, visto que foi indicado que o tamanho dos grãos e o teor de água inicial podem gerar diferenças na cinética do aquecimento dos grãos (SCHWARTZBERG, 2002).

Nas Figuras 4 e 5, 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; VARGAS-ELÍAS, 2011; SCHWARTZBERG, 2011; BOTELHO, 2012).

Ainda na Figura 4 e 5, observa-se o ajuste dos modelos para as temperaturas de torra de 380, 345, 310 e 290 °C, onde a menor amplitude das bandas de confiança foi para os grãos torrados a 345 °C. A essa temperatura, 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).

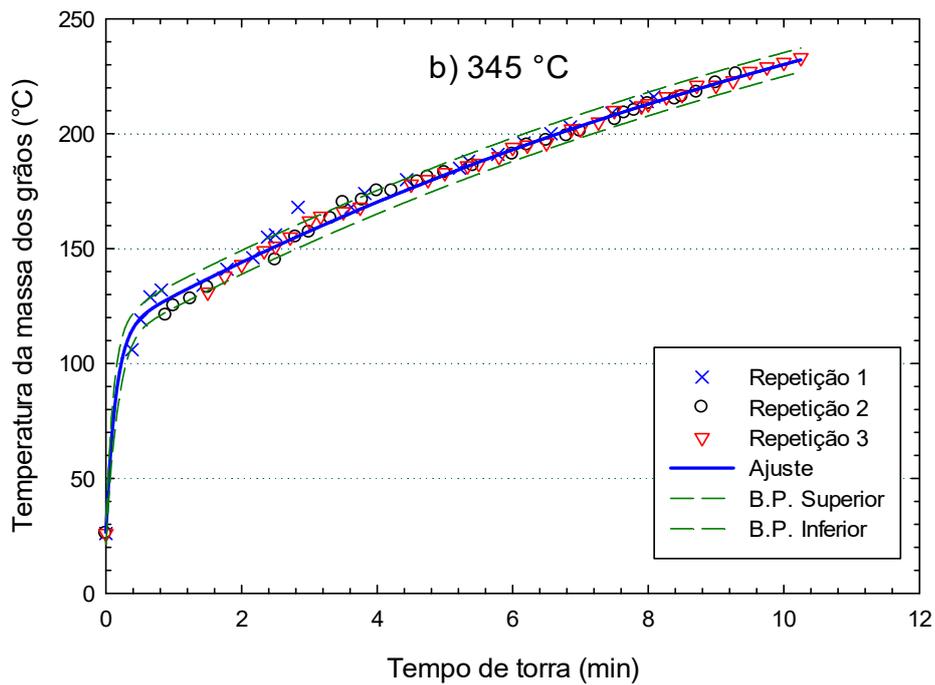
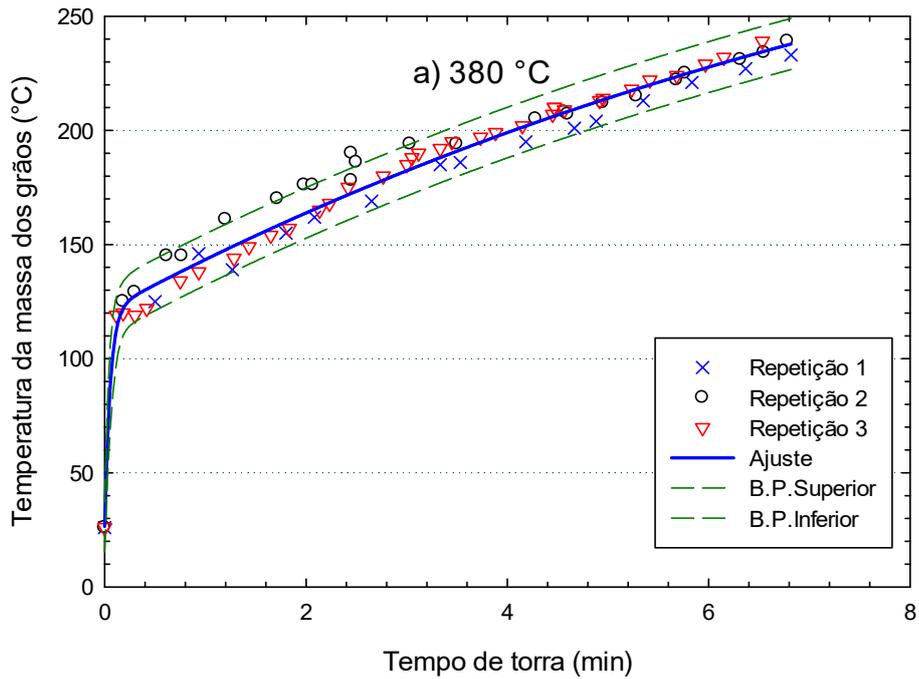


Figura 4 – Cinética do aquecimento dos grãos de café a temperaturas do torrador de 380 °C (a) e 345 °C (b), com as bandas de previsão para 95 %.

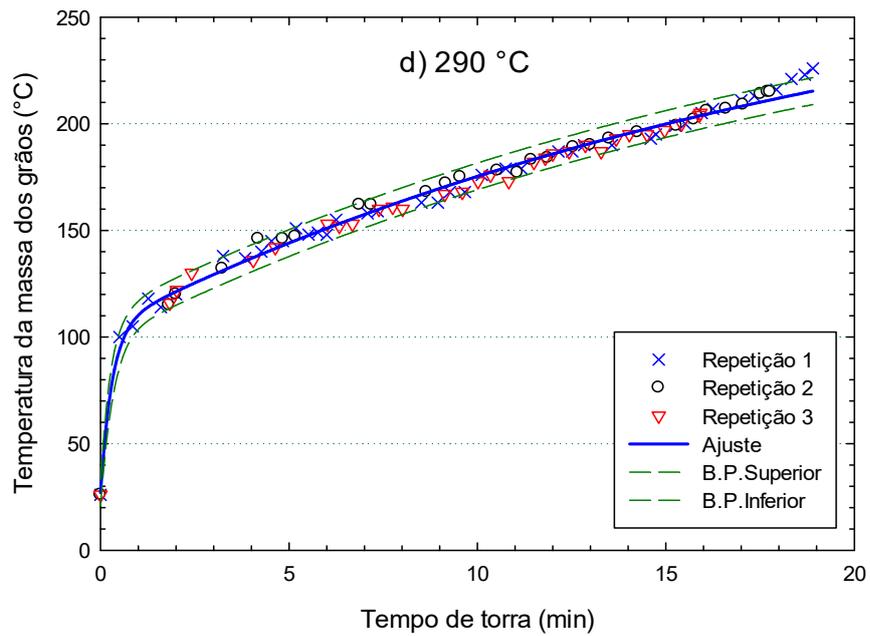
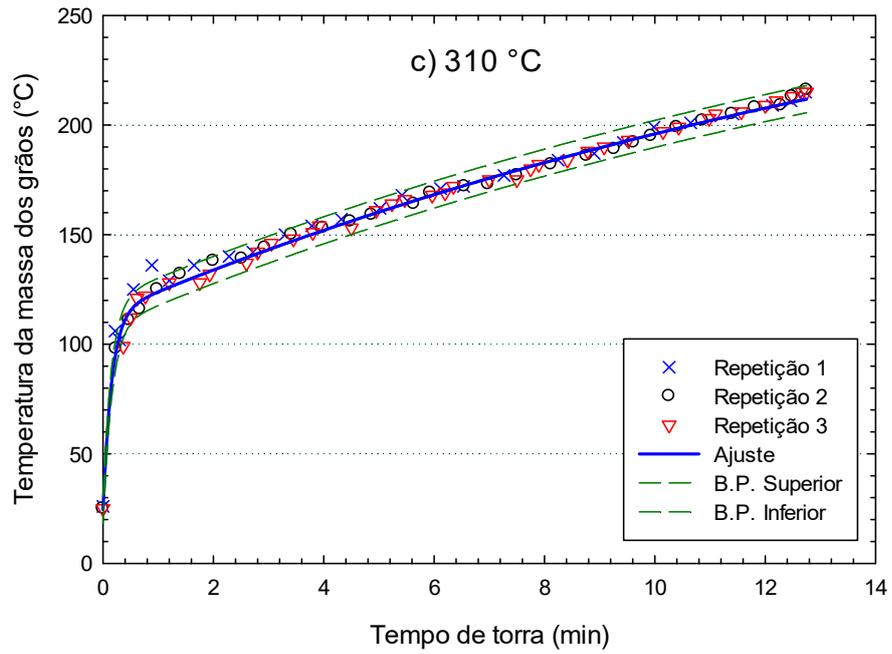


Figura 5 - Cinética do aquecimento dos grãos de café a temperaturas do torrador de 310 °C (c) e 290 °C (d), com as bandas de predição para 95 %.

O modelo ajustou-se adequadamente os dados segundo se observa nas bandas de predição para 95 % de probabilidade. Na Tabela 3 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 3 – 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
	<b>Constantes determinadas</b>			
B (min <sup>-1</sup> )	0,0482	0,0539	0,0699	0,1016
S (°C min <sup>-2</sup> )	252,0365	575,3081	623,7103	1750,1201
K (min <sup>-1</sup> )	3,3079	6,5047	7,2128	18,6636
	<b>p-valor</b>			
B (min <sup>-1</sup> )	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
S (°C min <sup>-2</sup> )	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
K (min <sup>-1</sup> )	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
	<b>Ajuste estatístico</b>			
R	0,9957	0,9964	0,9974	0,9903
R <sup>2</sup>	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
	<b>Erro padrão de estimação</b>			
B (min <sup>-1</sup> )	0,0006	0,0006	0,0007	0,0022
S (°C min <sup>-2</sup> )	29,6947	33,7477	98,0729	372,8785
K (min <sup>-1</sup> )	0,3990	0,4054	1,1488	4,0838

O grau de ajuste do modelo pelo desvio padrão da estimativa (SE) deve ser menor que 10%, e nesta pesquisa foi ao máximo 5,5% o que demonstra que o ajuste foi adequado nas quatro temperaturas avaliadas.

### 3.3. Modelagem do aquecimento dos grãos

Na Figura 6 são observadas as bandas de confiança respectivas ao ajuste do modelo nas quatro temperaturas do torrador. Verificou-se que o aquecimento dos grãos apresentou duas taxas, a primeira taxa foi observada em menos de 1,5 min onde a temperatura na superfície dos grãos aumentou exponencialmente, e, após esse tempo, linearmente até o final do processo.

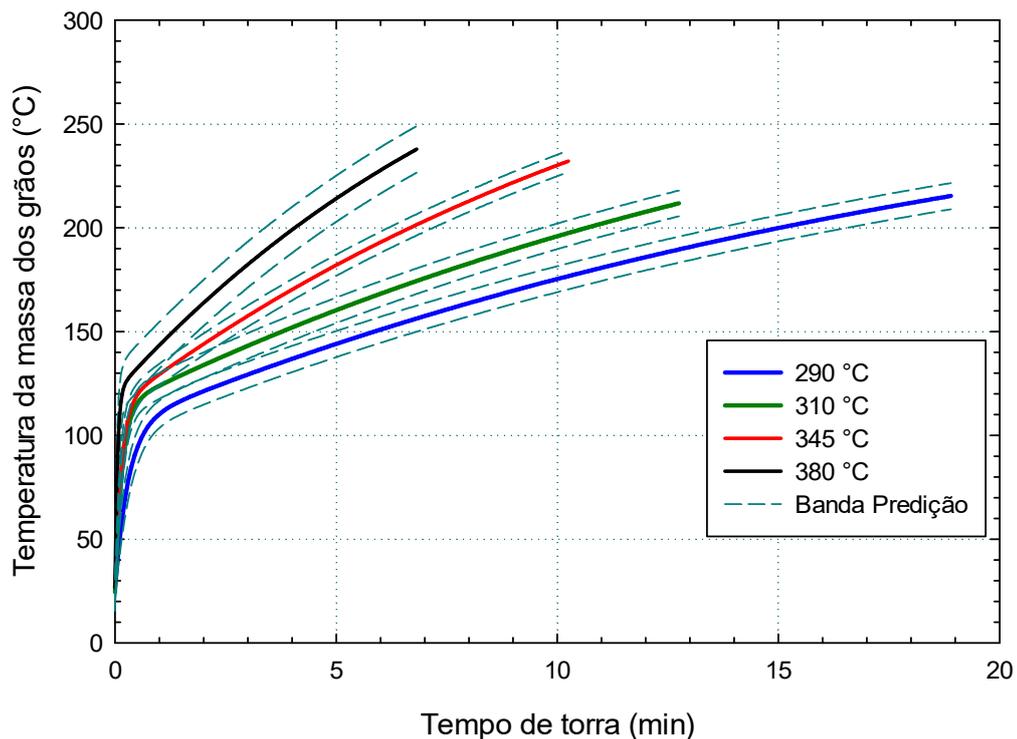


Figura 6 - Modelo de aquecimento dos grãos de café durante o processo de torrefação e as bandas de previsão para 95 %, em quatro temperaturas do torrador.

Observa-se que a máxima amplitude entre as bandas de confiança foi para os grãos que aqueceram à maior temperatura de torra 380 °C. Este fato está associado ao rápido aquecimento e à variabilidade da temperatura entre os grãos nesse tratamento visto que aumentou a altura da chama do queimador e sendo o cilindro furado, teve mais efeito a transferência de calor por radiação.

Na Figura 6, 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.

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.

### 3.4. Validação do modelo

Na Figura 7, observa-se que os símbolos correspondem às amostras que foram extraídas a cada 10 °C entre 145 e 235 °C, e as linhas contínuas representam os ajustes matemáticos nas condições do torrador estudadas a 290, 310 e 345°C. Observa-se que o aquecimento dos grãos seguiu o modelo para essas temperaturas do processo.

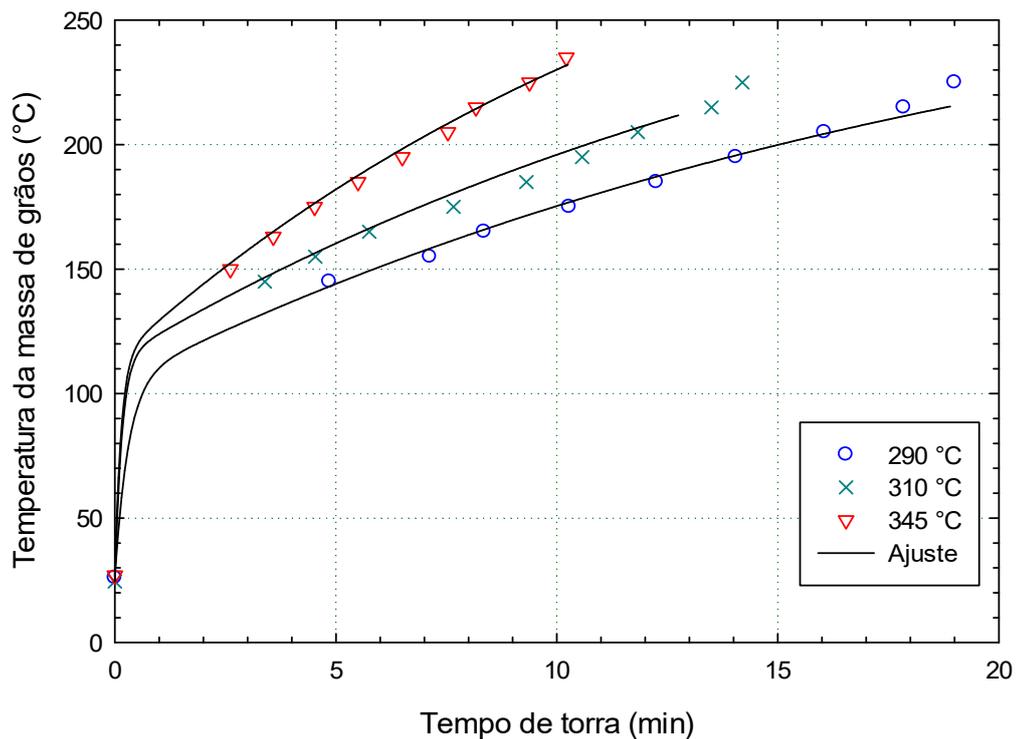


Figura 7 - Comprovação do modelo de aquecimento da massa dos grãos de café durante a torrefação a três temperaturas do processo.

A temperatura dos grãos não ultrapassou 235°C, portanto os grãos não chegaram até as torras muito escuras. Foi observado que os grãos a 225°C, na mínima taxa aquecimento chegaram à coloração escura, enquanto na máxima taxa de aquecimento estudada os grãos ainda apresentavam a coloração muito clara. Alguns estudos associaram as mudanças macroscópicas dos grãos com sua temperatura durante a torra (ILLY; VIANNI, 2005), neste experimento foi comprovado que, ademais disso, a taxa na qual os grãos aquecem também deve ser considerada.

O mesmo torrador foi utilizado para obter grãos torrados da variedade arábica (VARGAS-ELÍAS, 2011) e da variedade conilon (BOTELHO, 2012), onde a evolução do aquecimento dos grãos foi semelhante ao descrito nesta pesquisa.

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).

#### **4. CONCLUSÕES**

- O aquecimento dos grãos foi contínuo durante o processo, observando-se uma tendência linear no final da torra.
- A cinética do aquecimento dos grãos está em relação direta com a temperatura inicial 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 que ajustou bem aos dados experimentais, com coeficientes de determinação acima de 98 %, considerando que calor do torrador é usado tanto para aquecimento da massa quanto para evaporação da água na superfície dos grãos.
- O modelo de aquecimento dos grãos foi avaliado em três temperaturas do torrador e se observou consistência na evolução da temperatura das amostras.

## 5. 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.). **Espresso coffee: the science of quality**. 2.ed. London: Elsevier Academic Press, 2005.

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\\_coffeec.asp?section=Acerca\\_del\\_caf%E9](http://www.ico.org/es/making_coffeec.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. Batch coffee roasting; roasting energy use; reducing that use. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD, 2011, Athens, Greece. **Proceedings...** 2011. Disponível em: <[www.icef11.org/content/papers/fpd/FPD260.pdf](http://www.icef11.org/content/papers/fpd/FPD260.pdf)>.

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

VARGAS-ELÍAS, G.A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 2011. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

## CAPÍTULO 2 – CINÉTICA DA EXPANSÃO APARENTE DO CAFÉ DURANTE A TORREFAÇÃO

**RESUMO:** Objetivou-se com este trabalho determinar a cinética do volume aparente dos grãos de café à temperatura de operação do torrador. Foram usadas amostras de 350 g de grãos beneficiados de café arábica, sem defeitos, com forma chata e com teor de água de 10,32 % b.u. Usou-se um torrador a gás, a queima do gás foi mantida constante e em condições não isotérmicas de torração, com temperaturas de operação de 290, 310, 345 e 355 °C. O volume aparente dos grãos foi determinado em proveta graduada de capacidade 1000±10 mL. Identificaram-se duas etapas de expansão aparente, que foram associadas aos processos da secagem e da torra dos grãos, onde o aporte à expansão por etapa foi de 20 e 60 %, respectivamente. Na etapa da torra a expansão aparente dos grãos foi linearmente crescente com o tempo de torra e aumentou conforme a temperatura do torrador. A equação de Arrhenius ajustou adequadamente a taxa de expansão em função da temperatura do torrador com  $r^2$  de 0,9513, no ajuste foi determinada a energia de ativação para iniciar a expansão dos grãos, sendo 51,22 e 25,94 kJ mol<sup>-1</sup> para a secagem e a torra, respectivamente.

### EVALUATION OF COFFEE PHYSICAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF ROASTING

**ABSTRACT:** The aim of this study was to determine the relationship between the swelling rate of the coffee beans and the roaster temperature. Samples of 350 g of green coffee Arabic bean without defects and flat shape, with moisture content of 10.32 % w.b. of were used. The continuous burning gas drum roaster gas in non-isothermal conditions, with initial temperatures of 290, 310, 345 and 355°C. The apparent volume in bulk grains was determined in glass cylinder 1000±10 ml. Two stages of apparent swelling that have been associated with high temperature drying and roasting of the beans were identified. The contribution to the apparent swelling of each step was 20 and 60 %, respectively. In roasting stage the bean apparent swelling increase linearly with roasting time, which increased in accordance with the roaster temperature. The Arrhenius model adequately represents the rate of expansion depending on the roaster with  $r^2$  of 0.9513. The activation energy was determined of 25.94 kJmol<sup>-1</sup> to start the expansion phase of the beans roasting.

## 1. INTRODUÇÃO

Na torrefação do café a ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ (OIC, 2014) recomenda que a temperatura dos grãos seja entre 180 e 240 °C com duração do processo entre 8 e 15 min; as variações dependem do nível de torra dos cafés, do tipo de torrador e das taxas de aquecimento dos grãos para atingir essas condições.

Foi observado que na torrefação dos grãos houve duas taxas de transferência de massa (FRANÇA et al., 2009), essa diferença foi explicada por dois mecanismos, pela secagem e pela torrefação, que predominaram no início e no final processo; respectivamente (WANG; LIM, 2013). Nas duas etapas foram geradas variações bruscas nos índices de expansão volumétrica do café, quando associada às variáveis de tempo (ILLY; VIANI, 2005), perda de massa e temperatura dos grãos (BOTELHO, 2012).

A expansão dos grãos de café é inerente ao processo de torrefação, visto que a alta temperatura do torrador produz perda tanto de água quanto de matéria seca, e resultando na liberação de grandes quantidades de gases que geram alta pressão interna. Na primeira etapa predomina a remoção de água e a eliminação de compostos voláteis, e na segunda iniciam-se as reações exotérmicas liberando principalmente compostos orgânicos e dióxido de carbono (FRANÇA et al., 2009).

A expansão nos grãos de café torrados pode ser utilizada como parâmetro de qualidade. Os grãos de melhor qualidade, tanto física (MENDONÇA et al., 2009) quanto sensorial expandiram-se mais do que os de qualidade inferior, e foram determinadas diferenças de 11 % entre cafés com qualidade tipo mole e tipo rio (FRANÇA et al., 2005).

A expansão dos grãos depende do nível de torra do café, pois quanto mais escuros os grãos mais se expandem (ILLY; VIANI, 1995). Botelho (2012) determinou a diferença máxima de 30 % na expansão dos grãos quando foram torrados a partir do nível claro até o nível escuro, em café conilon.

Segundo o exposto, a expansão dos grãos de café durante a torrefação depende de muitas variáveis dos grãos crus, da qualidade tanto física quanto sensorial, como do tamanho, da forma, da massa específica, quantidade de defeitos e nível de mistura. A principal variável na expansão é o nível de torra

dos grãos, portanto objetivou-se analisar as cinéticas da expansão aparente do café com diferentes níveis de torra dos grãos em relação à temperatura do processo.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

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.

### **2.1. Matéria-prima**

Foram utilizados grãos de café *Coffea arabica* L., variedade Catuaí amarelo, beneficiados e com teor de água inicial de  $0,1032 \text{ kg}_a\text{-kg}^{-1}$ , 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, e foram misturados em proporções iguais na preparação das amostras de 350 g.

### **2.2. Processo de torrefação**

Foi utilizado um torrador a gás de combustão direta marca Rod-Bel, com cilindro perfurado em movimento rotativo a 45 rpm e com preaquecimento. A queima de gás foi mantida 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 (Figura 1).



Figura 1 - Medição da temperatura dos grãos em movimento.

Na Figura 2, observam-se as amostras de grãos de café obtidas em diferentes tempos. As amostras atingiram entre 145 a 225 °C, com diferenças de 10 °C entre cada tratamento.



Figura 2 – Níveis de torra dos grãos de café quando atingiram as temperaturas de (A) 145 °C, (B) 155 °C, (C) 165 °C, (D) 175 °C, (E) 185 °C, (F) 195 °C, (G) 205 °C, (H) 215 °C e (I) 225 °C.

Os grãos depois de torrados e ainda quentes foram resfriados com ar insuflado a temperatura ambiente de  $26 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### 2.3. Perda de massa

Foi contabilizada a massa dos grãos antes e após o tratamento térmico. A perda de massa foi determinada para cada amostra, por meio de uma balança digital, com precisão de 0,01 g e com a utilização da Equação 1.

$$\Delta M_t = 100 \left( 1 - \frac{m_t}{m_c} \right) \quad (1)$$

em que:

$\Delta M_t$  : perda relativa de massa total dos grãos durante a torra (%);

$m_c$  : massa total dos grãos crus (g); e

$m_t$  : massa dos grãos após tratamento térmico (g).

### 2.4. Determinação do volume aparente dos grãos

O volume aparente dos grãos foi medido em cilindro de acrílico graduado com capacidade de  $1000 \pm 10$  mL (GONELI, 2008), com aproximação da leitura de 5 mL, tanto os grãos crus quanto os torrados.

### 2.5. Expansão volumétrica aparente

A expansão aparente dos grãos foi medida pela relação entre o volume aparente dos grãos antes e depois do processo, a partir da Equação 2:

$$V = 100 \cdot \left( 1 - \frac{v_t}{v_c} \right) \quad (2)$$

em que:

$V$  : expansão aparente dos grãos (%);

$v_c$  : volume aparente dos grãos crus (mL); e

$v_t$  : volume aparente dos grãos semitorrados (mL).

## 2.6. Cinética da expansão aparente dos grãos

As mudanças da textura e cor do sésamo no processo de torrefação foram estudadas pelo modelo da cinética das reações químicas de ordem zero (KAHYAOGLU; KAYA, 2006), sendo utilizado o mesmo tipo do torrador, considerou-se que a expansão aparente dos grãos varia no tempo do processo com o mesmo modelo, conforme a Equação 3.

$$\frac{dV}{dt} = k \quad (3)$$

em que:

$dV$  : variação da expansão aparente dos grãos (%);

$dt$  : variação do tempo em que ocorre o processo (min); e

$k$  : taxa de expansão aparente dos grãos de café durante a torra (% min<sup>-1</sup>).

As taxas de variação da expansão aparente estão relacionadas com a temperatura do torrador, segundo o modelo de Arrhenius (Equação 4).

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R_g \cdot T_a}\right) \quad (4)$$

em que :

$k_0$  : fator pré-exponencial (min<sup>-1</sup>);

$E_a$  : energia de ativação da expansão aparente dos grãos de café durante a torra (J mol<sup>-1</sup>);

$R_g$  : constante dos gases (8,3145 J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); e

$T_a$  : temperatura absoluta do torrefador (K).

## 2.7. Análise estatística

Foram realizados tratamentos 36 em delineamento inteiramente casualizado com duas repetições, tendo como variáveis independentes a temperatura do torrador (290, 310, 345 e 355 °C) e a temperatura dos grãos (145, 155, 165, 175, 185, 195, 205, 215 e 225°C), as variáveis respostas foram o tempo de torra, a perda de massa e o volume aparente.

Os dados foram submetidos à análise de regressão linear. 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), pelas Equações 5 e 6:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (5)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (6)$$

em que:

$Y$  : valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  : valor estimado pelo modelo;

$n$  : número de dados observados; e

$GLR$  : graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Expansão aparente em função do aquecimento dos grãos

Na Figura 3, observa-se que na etapa da secagem, quando os grãos são aquecidos de 145 a 185 °C expandem linearmente até 20 % à razão de 2,6 % em 10 °C, com coeficiente de determinação de 90 %. A expansão aparente foi associada à rápida evaporação da água dentro do grão e segundo França et al. (2002), também é influenciada pela eliminação de compostos voláteis.

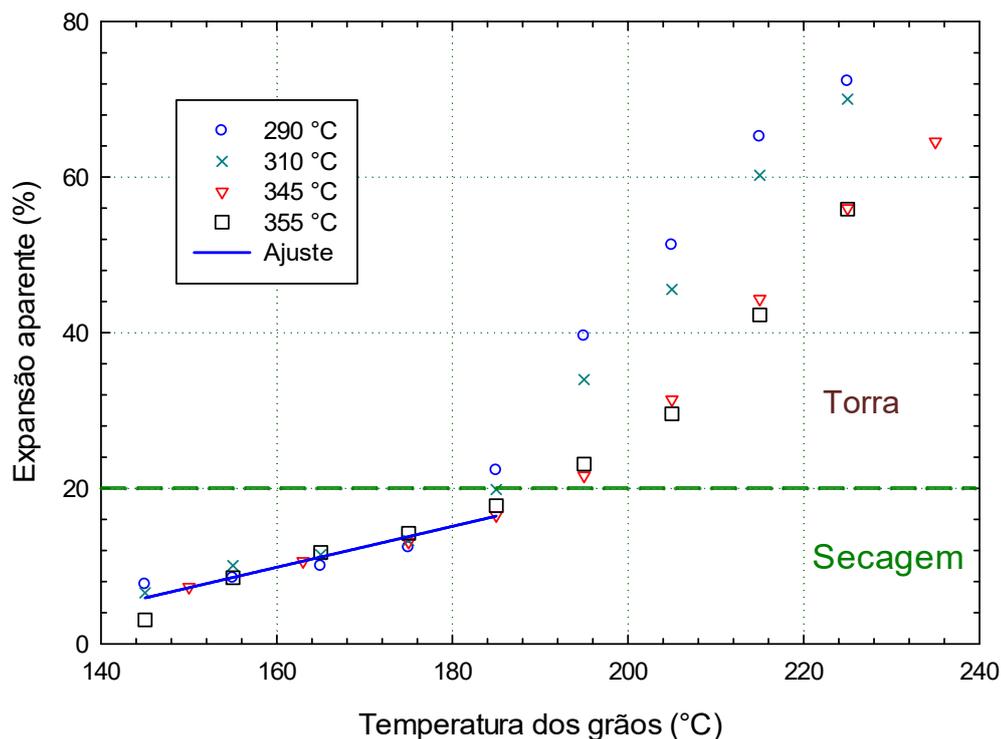


Figura 3 - Expansão aparente em função da temperatura dos grãos.

A expansão aparente durante a secagem não depende da temperatura do processo, finaliza quando a temperatura dos grãos é superior a 185 °C. Os resultados corroboram com os de Botelho (2012) em café conilon, que para separar a etapa endotérmica da exotérmica a temperatura dos grãos deve ser maior a 180°C.

Os grãos torrados na condição de máxima e mínima temperatura do processo geraram diferenças de aproximadamente 20% na expansão, o que foi observado a partir de 195°C.

A expansão aparente durante a torra depende da temperatura do processo, quanto mais baixa é a temperatura maior a variação da expansão aparente. Os grãos submetidos a baixas temperaturas precisam de mais tempo para aquecer o que gera a máxima perda de massa, foi observado que os grãos nessas condições atingiram níveis de torras mais escuros que os expostos à máxima temperatura do processo.

### 3.2. Expansão aparente em função da perda de massa dos grãos

Na Figura 4, observa-se que durante a etapa da torra há relação direta entre a expansão aparente dos grãos e sua perda de massa, independente da temperatura do processo.

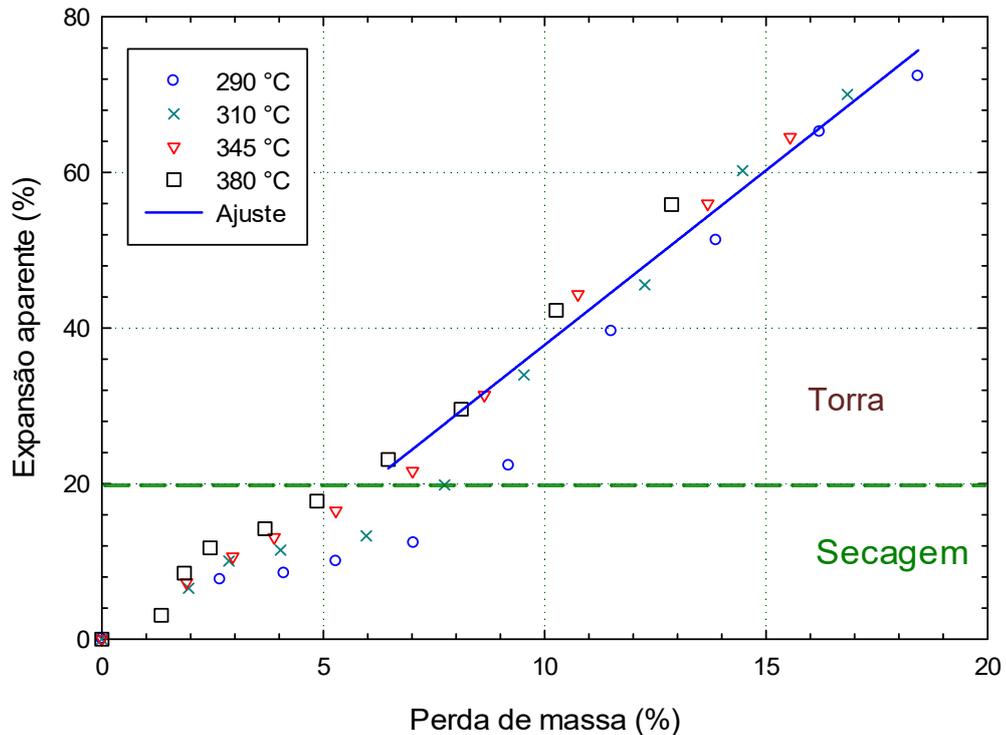


Figura 4 - Expansão aparente dos grãos em função da sua perda de massa.

Na etapa de secagem, a expansão é inferior a 20%, observa-se que a perda de massa depende da temperatura do torrador. Na temperatura mais baixa, foi obtida a máxima perda de massa por evaporação. Quanto maior é a temperatura do torrador, maior é a expansão dos grãos com menor perda de massa, indicando que a expansão é promovida pela alta pressão do vapor nas torras rápidas (ILLY; VIANI, 1995).

Na etapa da torra, observa-se que a expansão aparente acima de 20%, aumenta linearmente com a perda de massa, expandindo na proporção de 4,5% para cada 1% de perda de massa, com coeficiente de determinação de 96,82%.

A relação linear permite prever a expansão dos grãos em função da perda de massa; exemplo disso, para expansão aparente de 80%, a perda de

massa calculada é 19,4%, o que está de acordo com Schenker (2000), que referir-se à perda de massa de 19%. Para expansão de 90%, a perda de massa calculada foi de 21,6%, o que concorda com Illy e Viani (1995) que informaram perdas de massa entre 20 e 22%.

Na etapa de torra, a relação entre a expansão aparente e a perda de massa foi independente da temperatura do torrador (Figura 4).

### 3.3. Cinética de expansão aparente

Na Figura 5, observa-se que os grãos expandem em diferentes taxas, dividindo o processo de torrefação em duas etapas, o que concordou com o estudo da perda de massa dos grãos de café em torrador tipo leito fluidizado. (WANG; LIM, 2013).

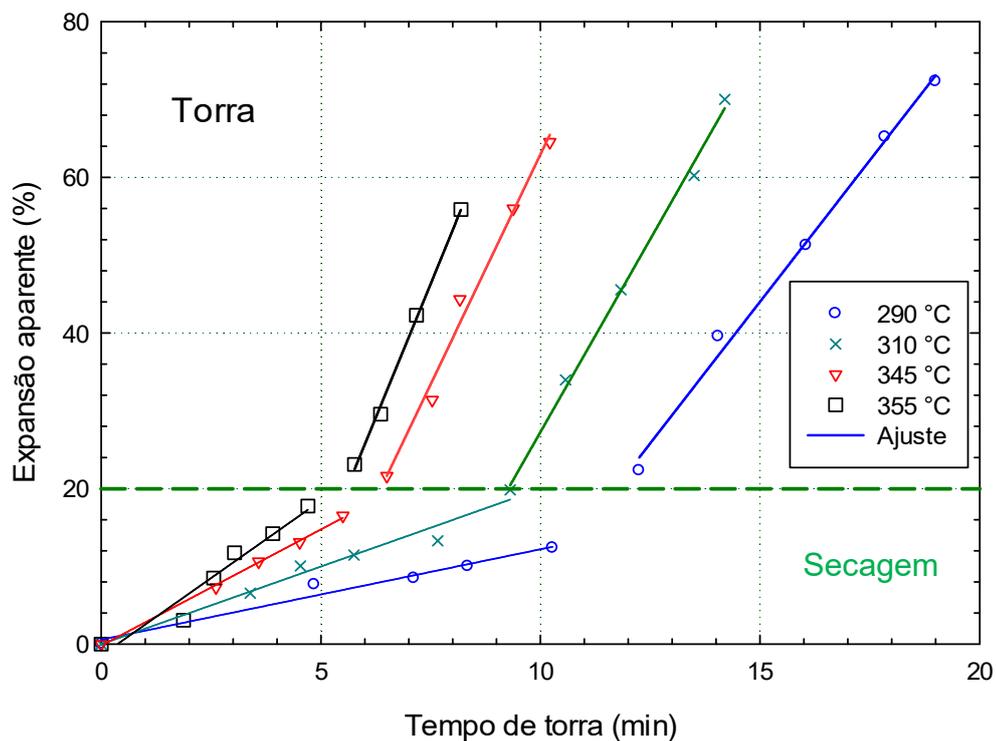


Figura 5 - Cinética da expansão aparente dos grãos de café na torrefação.

Na primeira etapa da secagem, predominam as baixas taxas de expansão desde 1,2 até 4,0% min<sup>-1</sup> e a segunda etapa da torra predominam as

altas taxas desde 7,3 até 13,8% min<sup>-1</sup>. Todas as taxas de expansão dos grãos dependeram diretamente da temperatura do torrador.

Em relação ao tempo do processo (Figura 5), observa-se que na etapa da secagem utilizou de 54 a 72% do tempo total, quando a temperatura do torrador foi de 290 a 355°C, respectivamente. Tais resultados concordam com Hernández et al. (2007) e determinaram que o tempo de secagem é aproximadamente 67% do tempo total do processo em torradores tipo leito fluidizado.

Na Tabela 1 são apresentados os parâmetros estatísticos da regressão linear para a determinação das taxas de expansão aparente dos grãos durante as etapas de secagem e de torra.

Determinou-se que a cinética da expansão dos grãos durante as etapas da torra em quatro temperaturas é representada satisfatoriamente por polinômios de primeiro grau, com coeficientes de determinação maiores que 94% e com desvio padrão da estimativa menor que 2,4%. Botelho (2012) indicou que o valor máximo do desvio padrão da estimativa permitido em ajustes é de 10%.

### **3.4. Modelo de Arrhenius**

Na Tabela 2, apresentam-se as taxas das cinéticas de expansão (k) e as respectivas temperaturas do torrador (T) nas duas etapas.

Para obter um ajuste linear do modelo de Arrhenius que é uma equação exponencial (Equação 4), é utilizada a inversa da temperatura absoluta do torrador e o logaritmo natural da taxa de expansão aparente dos grãos, para as etapas da secagem e da torra. Na Tabela 2 é observada a respectiva transformação dos dados.

Na Figura 6 observa-se o ajuste linear com coeficientes de determinação de 97,15 e 95,13%; para a etapa da secagem e da torra, respectivamente.

Tabela 1 - Parâmetros estatísticos determinados na análise de regressão linear da interseção ( $Y_0$ ) e o coeficiente angular ( $k$ )

Parâmetro	290 °C	310 °C	345 °C	355 °C
<b>Constantes de ajuste na etapa da secagem</b>				
$Y_{0s}$	0,5815	0,0062	-0,1754	-1,4538
$k_{secagem}$	1,1620	1,9957	2,9854	3,9826
<b>p-valor</b>				
$Y_{0s}$	0,5391	0,9955	0,5501	0,3750
$k_{secagem}$	0,0023	0,0003	<0,0001	0,0011
<b>Parâmetros estatísticos</b>				
$r$	0,9846	0,9849	0,9992	0,9728
$r^2$	0,9695	0,9700	0,9984	0,9463
Adj. $r^2$	0,9593	0,9626	0,9978	0,9329
SE	0,9400	1,2880	0,2936	1,7480
<b>Constante de ajuste na etapa da torra</b>				
$Y_{0t}$	-65,1591	-71,9505	-55,0879	-56,8623
$k_{torra}$	7,2779	9,9200	11,8023	13,7608
<b>p-valor</b>				
$Y_{0t}$	0,0011	0,0004	0,0037	0,0038
$k_{torra}$	0,0002	<0,0001	0,0006	0,0014
<b>Parâmetros estatísticos</b>				
$r$	0,9970	0,9982	0,9934	0,9986
$r^2$	0,9939	0,9965	0,9869	0,9973
Adj. $r^2$	0,9919	0,9953	0,9825	0,9959
SE	1,8059	1,3786	2,3153	0,9297

Tabela 2 - Parâmetros térmicos do torrador e taxas de expansão aparente do café para a etapa de secagem e torra.

Temperatura do torrador		$T^{-1}$ ( $10^{-3} K^{-1}$ )	$k_{secagem}$ ( $min^{-1}$ )	$\ln(k_{secagem})$ (dec)	$k_{torra}$ ( $min^{-1}$ )	$\ln(k_{torra})$ (dec)
T (°C)	T (K)					
355	628,15	1,5920	3,9826	1,3819	13,7608	2,6218
345	618,15	1,6177	2,9854	1,0937	11,8023	2,4683
310	583,15	1,7148	1,9957	0,6910	9,9200	2,2946
290	563,15	1,7757	1,1620	0,1501	7,2779	1,9848

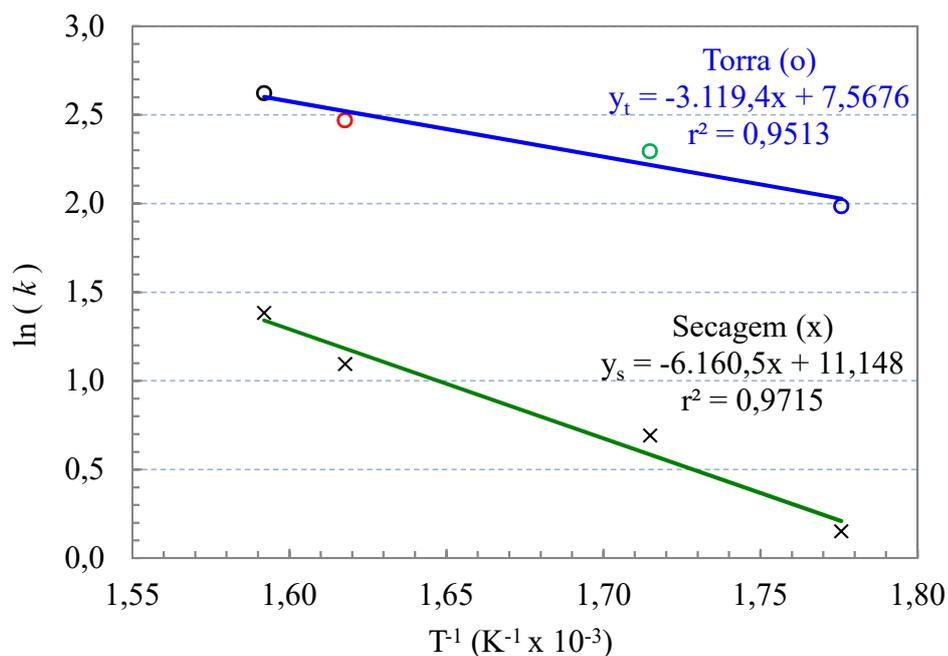


Figura 6 – Taxa da expansão aparente dos grãos de café em função da temperatura do processo.

O coeficiente angular do processo da secagem foi maior que o da torra, indicando que a energia de ativação ( $E_a$ ) para iniciar a expansão dos grãos na etapa da secagem foi maior que o da etapa da torra, o que está associado com o predomínio da fase endotérmica e exotérmica, respectivamente (FRANÇA et al.; 2009).

Na Tabela 3, se observam os valores do coeficiente angular e a intersecção da linha com o eixo  $\ln(k)$  da Figura 6, para as duas etapas. O fator pré-exponencial ( $k_0$ ) que foi 69.456,48 para etapa da secagem e 1.934,57 para etapa da torra.

Tabela 3 – Constantes determinadas na equação de Arrhenius em forma linear.

Etapa	m (K)	b (dec)	$E_a = m \cdot R_g$ ( $J mol^{-1}$ )	$k_0 = \exp^{(b)}$ ( $min^{-1}$ )
Secagem	-6.160,5	11,148	-51.221,48	69.456,48
Torra	-3.119,4	7,5676	-25.936,25	1.934,57

$R_g =$  constante dos gases  $8,3145 J mol^{-1} K^{-1}$

Os valores do coeficiente angular devem ser transformados para obter a energia de ativação, os valores foram 51.221,48 e 25.936,25 J mol<sup>-1</sup> para a etapa da secagem e da torra, respectivamente.

Dois fatores devem ser considerados para explicar que a energia de ativação da expansão na etapa da secagem requer aproximadamente o dobro da torra. Primeiro, que a energia é utilizada tanto para aquecer os grãos quanto para evaporar a água (PABIS et al., 1998), portanto o grão primeiro deve ser aquecido para depois evaporar a água, consumindo mais energia na secagem que na torra. Outro fator é que na etapa da torra iniciam-se as reações exotérmicas que liberam energia (FRANÇA et al., 2009).

A energia de ativação da expansão na etapa da secagem foi maior que a da torra, o que indica que o grão relativamente seco iniciará o mecanismo da expansão com mais facilidade devido a pouca água para evaporar e pela pressão dos gases produzidos pelas reações exotérmicas (FRANÇA et al., 2009).

Na etapa de secagem em torrador convencional, a energia de ativação para iniciar o processo de expansão dos grãos (51,22 kJ mol<sup>-1</sup>) foi semelhante à energia de ativação para iniciar a perda massa que foi 53,49 kJ mol<sup>-1</sup>, determinada em torrador com ar quente entre 220 e 250°C (WANG; LIM, 2013).

A transferência de massa dos grãos para o ambiente ocorre, basicamente pela evaporação da água, eliminação de compostos voláteis e liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Considerando que o mecanismo de expansão é devido ao vapor nas etapas de secagem e à liberação de CO<sub>2</sub> e compostos voláteis na torra (WANG; LIM, 2013), pode-se inferir que a expansão dos grãos é um parâmetro físico relacionado à transferência de massa dos grãos de café, tanto para estudar a rapidez do processo quanto na avaliação das propriedades físicas do grão torrado.

### **3.5. Cinética de expansão com a temperatura do processo**

A cinética da expansão aparente dos grãos de café, na etapa da secagem e da torra em função da temperatura do torrador, pode ser descrita pela equação 7 e 8, respectivamente.

$$\frac{dV_s}{dt} = 69.456,48 \cdot \exp\left(\frac{-51.221,48}{R_g \cdot T_a}\right) \quad (7)$$

$$\frac{dV_t}{dt} = 1.934,57 \cdot \exp\left(\frac{-25.936,25}{R_g \cdot T_a}\right) \quad (8)$$

Nas condições estudadas, se observou que a expansão aparente é sempre crescente em níveis de torras claras, em contrapartida com Bonnländer et al. (2005), a expansão dos grãos atinge um volume estável e máximo em função do tempo e temperatura de torra, que ocorre em níveis de torra escuros e com perdas de massa maiores a 21 % (ILLY; VIANI, 1995).

#### 4. CONCLUSÕES

- A expansão aparente dos grãos de café durante o processo de torrefação tem sido pouco estudada e depende de variáveis físicas como o tamanho e a forma.
- O estudo das cinéticas de expansão aparente dos grãos permite separar o processo em duas etapas, da secagem e da torra. As taxas de expansão foram identificadas e caracterizadas no processo de torrefação.
- A temperatura do processo influencia a cinética da expansão aparente dos grãos durante as etapas da secagem e torra. O aumento da temperatura do torrador aumenta a taxa de expansão aparente dos grãos.
- O modelo de Arrhenius representa adequadamente a taxa de expansão dos grãos em função da temperatura do torrador e das etapas da secagem e da torra.

## 5. 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.). **Espresso coffee: the science of quality**. 2.ed. London: Elsevier Academic Press, 2005.

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.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GARIN, S.A.; JAREN, C.; OLIVEIRA, G.H.H. Mathematical models to describe the volumetric shrinkage rate of red beans during drying. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 716-726, 2011.

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.

FERRAZ, M.B.M.; FARAH, A.; IAMANAKA, B.T.; PERRONE, D.; COPETTI, M.V.; MARQUES, V.X.; VITALI, A.A.; TANIWAKI, M.H. Kinetics of ochratoxin A destruction during coffee roasting. **Food Control**, v. 21, p. 872-877, 2010.

FITO, P.J.; CASTELLÓ, M.L.; ARGUELLES, A.; FITO, P. Application of SAFE (systematic approach to food engineering systems) methodology to roasted coffee process. **Journal of Food Engineering**, v. 83, p. 211-218, 2007.

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.

FRANÇA, A.S.; MENDONÇA, J.C.F.; OLIVEIRA, S.D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. **LWT**, v. 38, p. 709-715, 2005.

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.

GONELI, A.L.D.G. **Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade da mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento**. 2008. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ILLY, A.; VIANI, R. **Express coffee**: the chemistry of quality. London: Academic Press, 1995. 253 p.

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

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.

KAHYAOGLU, T.; KAYA, S. Modeling of moisture, color and texture changes in sesame seeds during the conventional roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 167-177, 2006.

MENDONÇA, J.C.F.; FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S. Physical characterization of non-defective and defective Arabica and Robusta coffees before and after roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 92, p. 474-479, 2009.

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

OLIVEIRA, G.H.H.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; VARGAS-ELÍAS, G.A.; DINIZ, M.D.M.S. Analysis of thermodynamic properties of coffee berries during drying. In: WORLD CONGRESS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION OF AGRICULTURAL AND BIOSYSTEMS ENGINEERING, 17, 2010, Québec, Canada. **Proceedings...** Québec, Canada, 2010.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO CAFÉ - OIC. **Reexportações de café da Alemanha**. Disponível em: <[http://ico.heritage4.com/?section=What\\_We\\_Do?section=Documents](http://ico.heritage4.com/?section=What_We_Do?section=Documents)>. Acesso em: 5 jan. 2014.

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.

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.

SCHWARTZBERG, H. Batch coffee roasting; roasting energy use; reducing that use. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ENGINEERING AND FOOD, 2011, Athens, Greece. **Proceedings**. 2011. Disponível em: <[www.icef11.org/content/papers/fpd/FPD260.pdf](http://www.icef11.org/content/papers/fpd/FPD260.pdf)>.

SILVA, W.P.; MATA, M.E.R.M.; SILVA, C.D.S.P.; GUEDES, M.A.; LIMA, A.G.B. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata*), variedade sempre-verde, com base no comportamento na secagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, p. 325-333, 2008.

VARGAS-ELÍAS, G.A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 2011. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

### **CAPÍTULO 3 – CINÉTICA DA PERDA DE MASSA SECA DOS GRÃOS DE CAFÉ DURANTE O PROCESSO DE TORREFAÇÃO**

**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 processo, baseado no modelo da cinética das reações químicas. Foram usadas amostras de 350 g de grãos de café arábica com teor de água inicial de 10,32% b.u. Usou-se um torrador a gás nas temperaturas iniciais de 290, 310, 345 e 355°C. O teor de água foi obtido após colocar os grãos por 24 h em estufa a 105°C. A massa seca foi calculada a partir da massa total e do teor de água. Observou-se que a variação da massa seca aumenta exponencialmente com o tempo do processo. Quando se aumentou a temperatura do torrador aumentou também a taxa de perda mássica, diminuindo significativamente os tempos de secagem e torra. As taxas de variação da matéria seca foram relacionadas à temperatura do torrefador segundo o modelo de Arrhenius, que ajustou adequadamente com coeficiente de determinação acima de 98%. A energia de ativação necessária para gerar transformação da matéria seca dos grãos de café foi 36,79 kJ mol<sup>-1</sup>. Foi desenvolvido o modelo exponencial baseado no modelo físico-químico da cinética das reações de primeira ordem, para representar a variação da massa seca dos grãos de café em função do tempo e temperatura do processo.

#### **EVALUATION OF COFFEE PHYSICAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF ROASTING**

**ABSTRACT:** The main objective of this work was to determine the relationship between the variation rate of dry mass of coffee beans and roaster temperature, based in chemical reaction kinetics. Samples of 350 g of arabic coffee green beans were used with initial moisture content of 10.32% w.b. A burning gas in drum roaster was used with initial wall temperatures of 290, 310, 345 e 355°C. The moisture content of coffee beans was calculated after 24 h in air convection forced oven at 105°C. It was observed that variation of dry mass increase with roasting time. At increase the roaster temperature also increased the mass dry release and decreasing significantly the roasting time. Variation rate of dry mass was related to roaster temperature according Arrhenius model, setting up properly with r<sup>2</sup> of 0.997. It was determined an activation energy 36.79 kJ mol<sup>-1</sup> to transform the dry mass off coffee beans. The exponential model was development form the physic-chemistry kinetics reaction model of first order, to represent the variation dry mass off coffee beans related to the time a temperature roasting.

## 1. INTRODUÇÃO

No processamento pós-colheita, tanto na secagem quanto no armazenamento de produtos agrícolas, deve-se preservar a matéria seca, isto é, a massa seca inicial e 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 e, parte dessa massa é usada para modificar a composição química e física dos grãos, que a usa para liberar gás carbônico e compostos voláteis (PEREZ et al., 2008).

O controle da torrefação é realizado empiricamente pela cor dos grãos, pela temperatura e tempo de torra (HERNÁNDEZ et al., 2007). A massa seca é parâmetro muito importante e pouco usado na torrefação, pois além de liberar compostos voláteis e desenvolver o sabor característico, está diretamente associada ao nível de torra, visto que quanto mais escura é a cor do café, menor é a quantidade de matéria seca nos grãos (VARGAS-ELÍAS, 2011). Clarke e Macrae (1987) classificaram o café torrado de acordo com a perda da matéria seca sendo de 1 a 5 % para torra clara, de 5 a 8 % para torra média, de 8 a 12 % para torra escura e muito escura superior a 12%.

A perda de massa no processo de torrefação foi modelada pelo estudo da cinética das reações de ordem zero (WANG; LIM, 2013), devido às diferenças nas taxas de perda de massa separou a etapa endotérmica da exotérmica, para uma mesma temperatura do processo (DUTRA et al., 2001).

A constante de uma reação é obtida experimentalmente, e fornece a rapidez em que ocorre a reação. Essa rapidez pode ser expressa de diversas formas, como taxa de desaparecimento de reagentes ou de formação de produtos (FOGLER, 2004). Os estudos indicam que a taxa de reação é influenciada pela composição e a energia do material, que pode ser representada pela intensidade da luz no interior do sistema (pode afetar a energia de ligação entre átomos), a intensidade do campo magnético, a temperatura (cinética aleatória energia das moléculas), entre outras (LEVENSPIEL, 2000).

A redução da massa seca no final da torrefação evidencia que parte dela foi utilizada para a formação de compostos voláteis e na liberação de CO<sub>2</sub>, durante a pirólise (ILLY; VIANI, 1995).

A influência da temperatura na velocidade das reações se reflete na taxa de reação específica, que é normalmente dependente, além da temperatura, da pressão, do pH, entre outros fatores, mas é independente das concentrações das espécies envolvidas na reação. A relação entre a taxa de reação específica e a temperatura do processo pode ser descrita pelo modelo de Arrhenius, que fornece adequada precisão experimental sobre as faixas de temperatura bastante altas (WANG; LIM, 2013).

No modelo de Arrhenius duas variáveis são utilizadas, a energia de ativação e o fator pré-exponencial. Segundo Atkins e Paula (2012), a energia de ativação é o valor mínimo da energia cinética para que uma reação química possa ocorrer durante uma colisão molecular e, o fator pré-exponencial corresponde a uma medida da velocidade em que as colisões ocorrem independentes de suas energias.

Em processos com mudanças físicas como a secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto. Zogzas et al. (1996) indicaram que a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol<sup>-1</sup>. A energia de ativação na secagem do café cereja foi 38,39 kJ mol<sup>-1</sup> para café tipo arábica (OLIVEIRA et al., 2010) e 38,02 kJ mol<sup>-1</sup> para o tipo conilon (BOTELHO, 2012).

Os valores da razão da matéria seca são independentes do teor de água inicial dos grãos, portanto podem ser usados como parâmetros de comparação entre pesquisas e entre os níveis de torrefação dos grãos de café (VARGAS-ELÍAS, 2011). O café, como todo alimento, constitui uma matriz complexa e, portanto as taxas das reações químicas que resultam da diminuição da matéria seca durante a torrefação são de difícil modelagem se comparadas à modelagem envolvendo apenas um componente. Considerando que ocorre apenas uma reação durante a torrefação da qual a matéria seca é o único reagente, objetivou-se com esse trabalho determinar a relação entre a cinética da matéria seca dos grãos de café em função da temperatura do torrador, baseado no modelo da cinética das reações químicas.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

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.

### **2.1. Matéria-prima**

Foram utilizados grãos de café *Coffea arabica* L., variedade Catuaí amarelo, beneficiados e sem defeitos, com tamanho da peneira 17 e 18, 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 em proporções iguais na preparação das amostras de 350 g.

### **2.2. Processo de torrefação**

Foi utilizado um torrador a gás de combustão direta marca Rod-Bel, com cilindro perfurado em movimento rotativo a 45 rpm e com preaquecimento. A queima de gás foi mantida 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 (Figura 1).

Os grãos torrados e quentes foram resfriados com ar a temperatura ambiente,  $26 \pm 1^\circ\text{C}$ .



Figura 1 - Medição da temperatura dos grãos durante o processo de torrefação.

### 2.3. Perda de massa

Foi contabilizada a massa antes e após tratamento térmico. A perda de massa total relativa foi acompanhada para cada amostra após o processo. O produto obtido foi pesado numa balança digital, com precisão de 0,01 g, e a perda calculada com a utilização da Equação 1.

$$\Delta M_t = 100 \left( 1 - \frac{m_t}{m_c} \right) \quad (1)$$

em que:

$\Delta M_t$  : a perda relativa de massa dos grãos durante a torra (%);

$m_c$  : massa total dos grãos crus (g); e

$m_t$  : massa dos grãos após tratamento térmico (g).

## 2.4. Teor de água

O teor de água foi determinado por meio da secagem das amostras em estufa com circulação de ar a  $105 \pm 3$  °C até massa constante, segundo o método físico-químico para análise de alimentos (INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL, 2008), em três repetições e calculada utilizando a equação 2.

$$X = 100 \left( \frac{m_u - m_s}{m_u} \right) \quad (2)$$

em que:

$X$  : teor de água da amostra de café em base úmida (% b.u.);

$m_u$  : massa da subamostra dos grãos de café úmidos (g); e

$m_s$  : massa da subamostra dos grãos de café secos (g).

## 2.5. Matéria seca

A matéria seca foi calculada a partir da massa total e do teor de água, conforme a equação 3.

$$M = m_t (1 - X) \quad (3)$$

em que:

$M$  : a matéria seca dos grãos (g).

## 2.6. Lei da cinética das reações químicas

A lei geral da cinética das reações químicas é descrita pela Equação 4.

$$\frac{dM}{dt} = \pm k \cdot M^n \quad (4)$$

em que:

$k$  : coeficiente de variação da massa seca dos grãos ( $\text{g min}^{-1}$ );

$dM$ : variação da massa seca dos grãos de café torrados (g);

$dt$  : variação do tempo em que ocorre a reação (min); e

$n$  : ordem da reação (adimensional).

Considerou-se que a massa seca não varia no início, e que a variação começa no momento em que ocorreram as reações químicas transformando parte dela e transportando-a em forma de compostos voláteis e gás  $\text{CO}_2$ . A transformação da matéria seca no processo de torrefação foi considerada como reação de primeira ordem ( $n = 1$ ). A Equação 5 descreve a cinética da matéria seca dos grãos de café no processo de torrefação.

$$\frac{dM}{dt} = k \cdot M \quad (5)$$

A solução da Equação 5 é descrita conforme a Equação 6.

$$\frac{M}{M_0} = \exp(k(t - t_0)) \quad (6)$$

em que:

$M_0$  : a perda de massa seca dos grãos no início da torrefação (g); e

$t_0$  : tempo em que iniciam as reações químicas da matéria seca (min).

## 2.7. Efeito da temperatura do torrador

As taxas de variação da perda de massa seca foram relacionadas com a temperatura do torrador, segundo o modelo de Arrhenius da Equação 7.

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R_g \cdot T_a}\right) \quad (7)$$

em que:

$k_0$  : fator pré-exponencial ( $\text{min}^{-1}$ );

$E_a$  : energia de ativação da perda de massa seca dos grãos de café durante a torra ( $\text{J mol}^{-1}$ );

$R_g$  : constante dos gases ( $8,3145 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ); e

$T_a$  : temperatura absoluta do torrefador (K).

## 2.8. Modelo proposto para variação da massa seca

A variação relativa da matéria seca foi descrita em função do tempo e da temperatura do torrador segundo o modelo proposto na Equação 8.

$$\frac{M}{M_0} = \exp \left( k_0 \cdot \exp \left( \frac{-E_a}{R_g T_a} \right) \cdot (t - t_0) \right) \quad (8)$$

## 2.9. Análise estatística

Foram realizados 36 tratamentos em delineamento inteiramente casualizado, tendo a temperatura do torrador (290, 310, 345 e 355°C) e a temperatura dos grãos (145, 155, 165, 175, 185, 195, 205, 215 e 225°C) como variáveis independentes. As variáveis respostas foram, o tempo de torra, perda de massa total, teor de água e perda de massa seca. Os dados foram submetidos à análise de regressão não linear. 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), segundo as Equações 9 e 10.

$$P = \frac{100}{\eta} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (9)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (10)$$

em que:

$Y$  : valor observado experimentalmente;

$\hat{Y}$  : valor estimado pelo modelo;

$n$  : número de dados observados; e

$GLR$  : graus de liberdade do resíduo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Perda de massa total

Na Figura 2 observa-se que os grãos perderam mais massa a medida que o tempo de torra aumentou, isto é; quanto mais tempo demore o processo mais aumentará a perda de massa dos grãos o que não é conveniente desde o ponto de vista técnico, de qualidade sensorial e até comercial. Visto que ocorrerá no maior tempo de processo, além do aumento da perda de massa, desenvolverá o amargor, quando é a massa o parâmetro de comercialização.

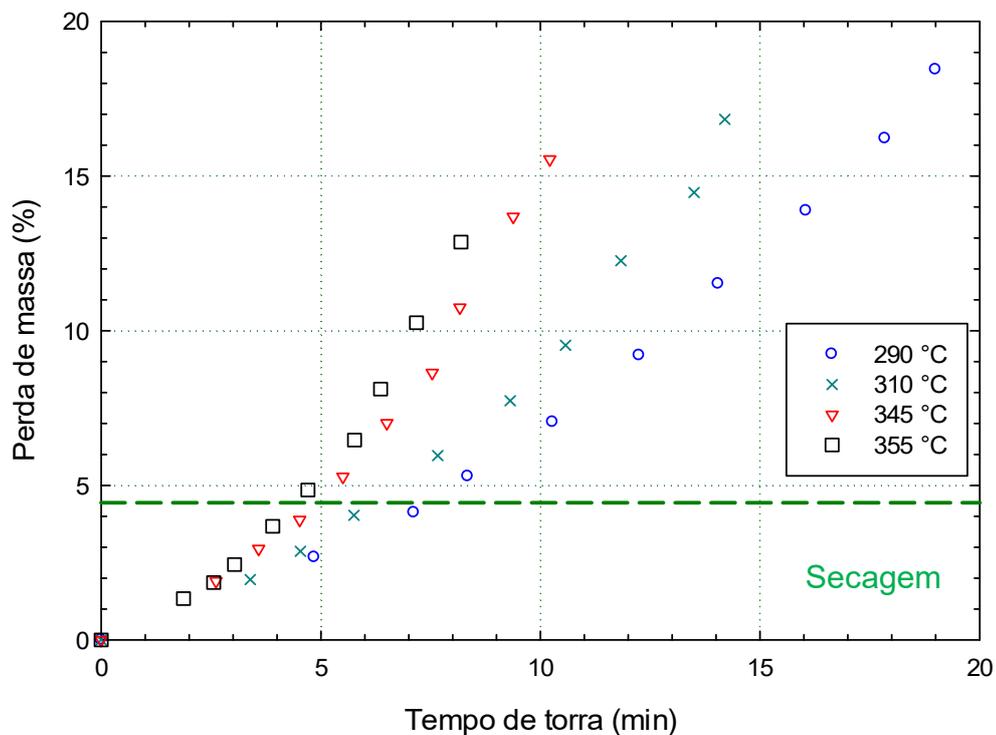


Figura 2 - Perda de massa dos grãos em função do tempo de torra.

O processo não pode dividir-se claramente em duas etapas, mas a perda de massa na etapa da secagem foi aproximadamente de 0 a 4,5%. Na etapa da torra a perda de massa foi linear em grãos torrados comercialmente no mesmo torrador (VARGAS-ELÍAS, 2011).

A máxima e mínima taxa de perda de massa foi registrada para a temperatura máxima e mínima do torrador, 355 e 290°C, respectivamente. A rapidez do processo depende diretamente da temperatura do torrador.

Na Figura 3 pode-se observar que os grãos perderam massa continuamente no tempo em que foram aquecidos; o que concorda com Bonnländer et al. (2005), no modelo de comparação para diferentes tipos de torradores.

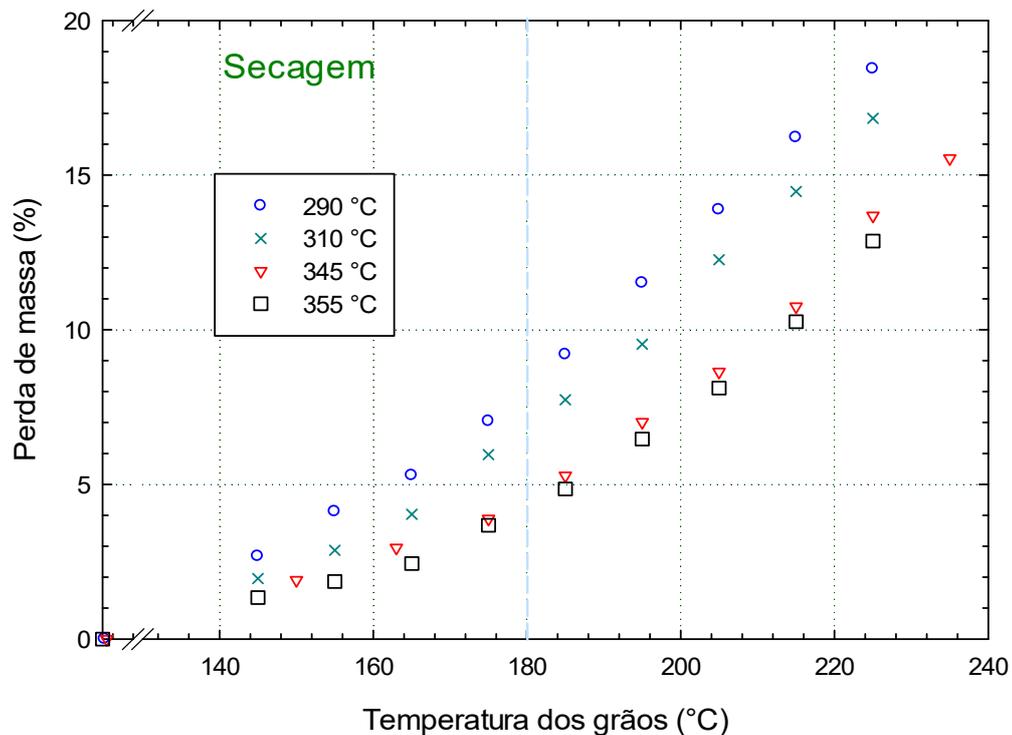


Figura 3 - Perda de massa em função da temperatura dos grãos de café.

Os grãos com a mesma temperatura (condição isotérmica) e nos extremos da temperatura do processo geraram diferenças superiores a 5 % na perda de massa, portanto os níveis de torra dos grãos foram diferentes. As variações acima de 1 % na perda de massa diferenciaram grãos torrados entre

a torra clara e a média, tanto em café arábica (VARGAS-ELÍAS, 2011) quanto em café conilon (BOTELHO, 2012).

A temperatura dos grãos pode ser um parâmetro importante do processo, devido a que pode predizer tanto o tempo de torra quanto o nível de torra dos grãos, desde que as características dos grãos sejam uniformes e se use a mesma temperatura de operação. Quando houve diferenças na temperatura do torrador, obteve-se que os grãos torrados em alta temperatura (355 e 345°C) perderam menos massa que os torrados a baixa temperatura 290°C, para as condições isotérmicas dos grãos. Esses resultados foram explicados pela diferença entre rapidez da produção de gases no interior dos grãos e a eliminação ao ambiente desde etapas da secagem até a torra (BOTELHO, 2012; GEIGER et al., 2005)

### **3.2. Teor de água**

Na Figura 4 se observa que independente da temperatura o teor de água determinado experimentalmente e o calculado diminuiriam linearmente desde 10,3 até 6,4% b.u., o que concorda com a teoria de secagem onde a matéria seca se mantém constante e a perda de massa ocorre exclusivamente pela perda de água por evaporação (PABIS et al., 1998).

Nas temperaturas do torrador estudadas, observa-se que em perdas superiores a 40% do teor de água inicial, quando o teor de água foi inferior a 6,4% b.u., se inicia a perda da matéria seca, e a perda de massa ocorre por dois processos simultâneos de evaporação da água e perda de matéria seca.

Independentemente da temperatura do torrador, o teor de água no final do processo chega a estabilizar em 1,7% b.u., quando os grãos são considerados torrados. Foi relatado que os grãos no final da torra atingem o teor de água de equilíbrio de 1,0% b.u. (ILLY; VIANY, 1995), pela formação de vapor de água que é gerado continuamente nas reações de pirólise (ILLY; VIANY, 2005).

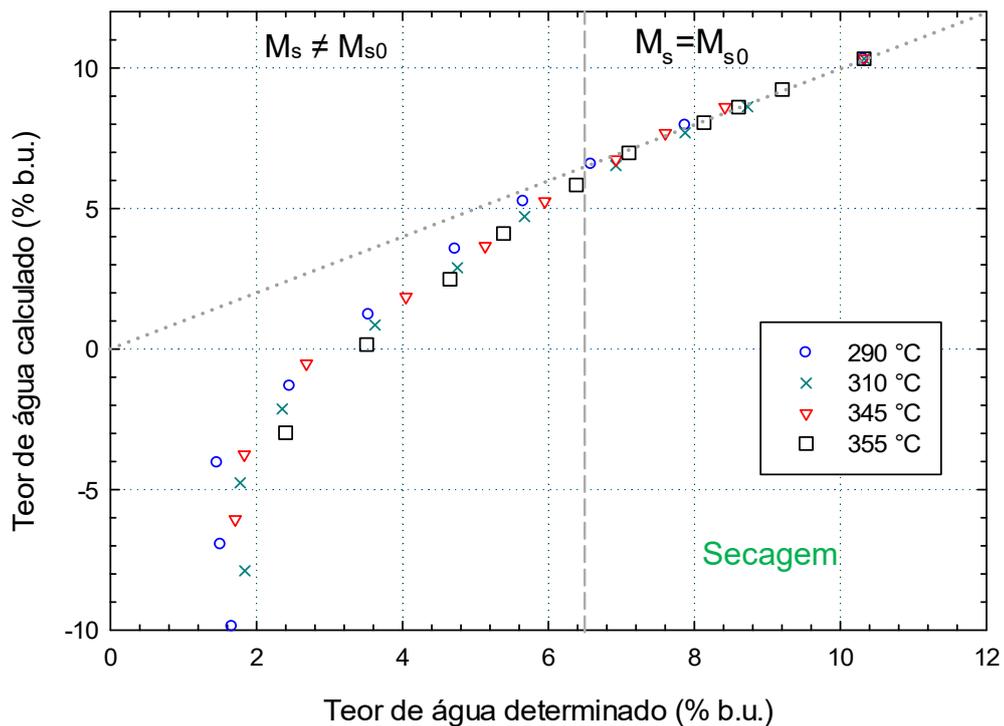


Figura 4 - Teor de água do café determinado experimentalmente e calculado.

Na Figura 5 observa-se que independente da temperatura do processo e desde o início da torrefação, o teor de água diminuiu proporcionalmente com a perda de massa até atingir o teor de água constante. Este resultado é semelhante em cafés de diferentes regiões do mundo, onde foram observadas perdas de massa de 15,6% com teores de água entre 1,9 e 1,3% b.u. (ALESSANDRINI et al., 2008)

Nas quatro temperaturas de processo, obteve-se que o teor de água praticamente não varia quando a perda de massa é superior a 13%, portanto o café perde massa até atingir o ponto de torra desejado; o que concorda com Illy e Viani (2005), quando a coloração dos grãos varia de clara até escura, a perda de massa aumenta de 14,5 a 18,9%, respectivamente.

Na Figura 6 observa-se que o teor de água diminui continuamente em forma decrescente e em taxas que dependem diretamente da temperatura do torrador. A máxima taxa de variação do teor de água foi para a máxima temperatura do processo (355°C).

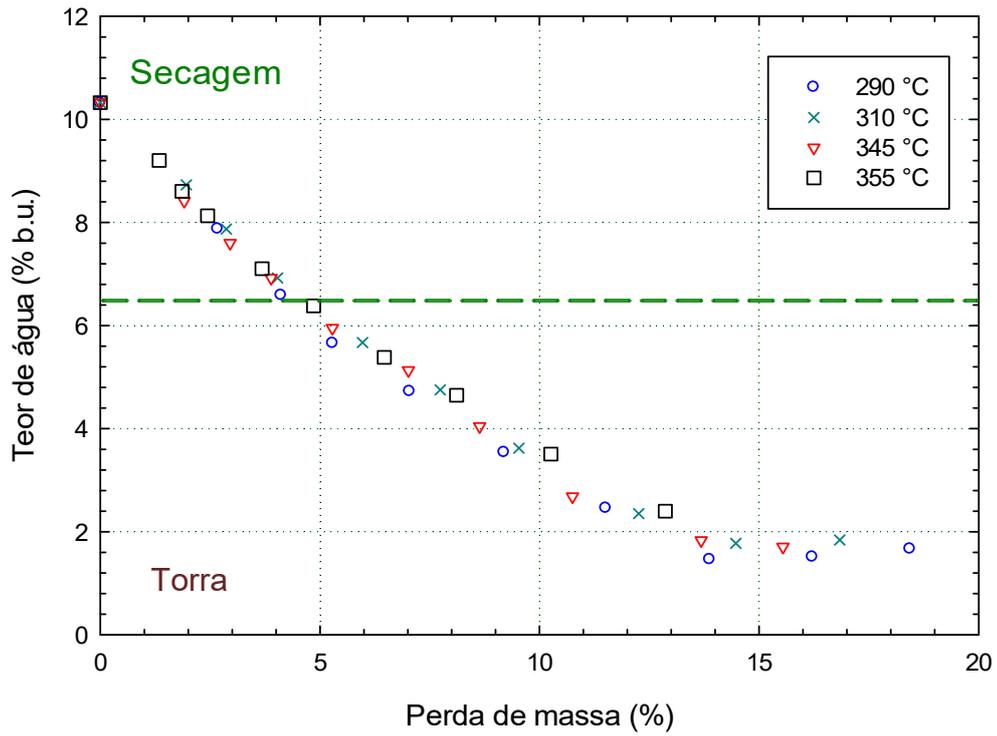


Figura 5 - Teor de água em função da perda de massa dos grãos torrados.

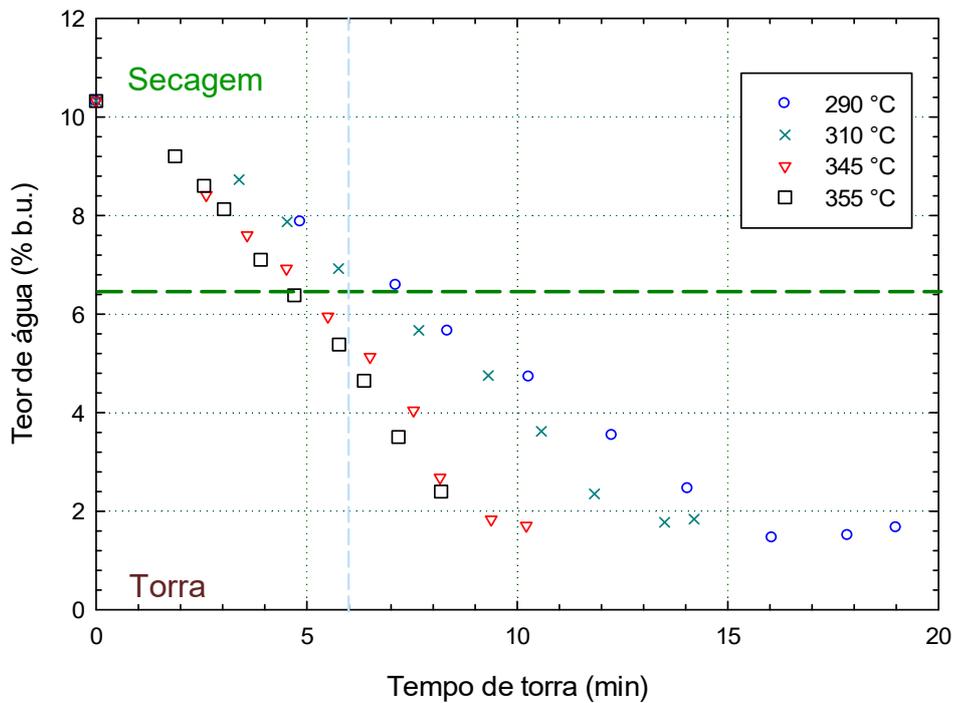


Figura 6 - Cinética do teor de água dos grãos de café durante a torrefação.

No final do processo o teor de água se estabiliza aproximadamente em 1,7% b.u., exceto para a máxima temperatura 355°C, que manteve o teor de água em 2,4% b.u.

Na Figura 7, o teor de água diminuiu no tempo em que os grãos aqueceram durante o processo de torrefação, esse aquecimento ocorre desde a superfície até o centro do café enquanto a secagem começa a partir da superfície até o centro do grão (BONNLÄNDER et al., 2005).

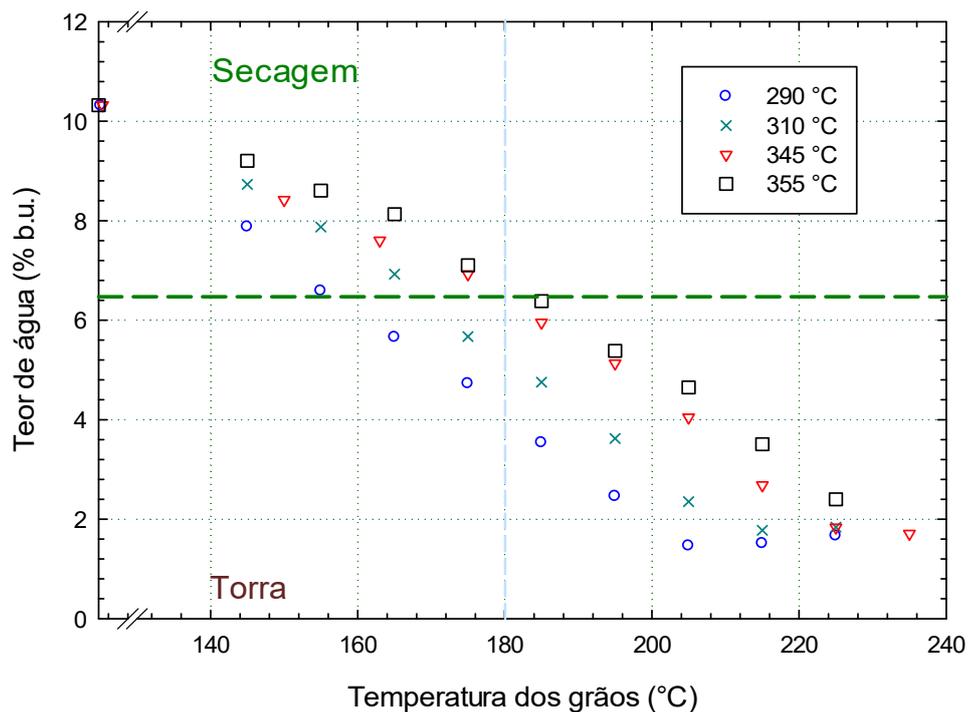


Figura 7 - Teor de água em função da temperatura dos grãos.

Em condições isotérmicas dos grãos, houve maior teor de água na torra a 355°C que na condição de 290°C, com diferenças de 2% b.u. Na etapa da secagem, a água se transporta do interior até a superfície do grão com taxa decrescente (BONNLÄNDER et al., 2005) e as altas temperaturas do processo aumentam as taxas de produção de gases e água (GEIGER et al., 2005). Em altas temperaturas, as taxas de produção de água por reação química superaram as taxas de eliminação da água do grão, por tanto em torras rápidas os cafés apresentaram maior teor de água que em torras lentas (BOTELHO, 2012).

As diferenças no teor de água diminuíram até atingir o equilíbrio no final da torra, quando a temperatura dos grãos foi superior a 225°C para todas as

temperaturas do processo. Os grãos nessas condições foram considerados torrados, com perda de massa superior a 12,5% e cuja estrutura física foi modificada pela expansão (superior a 55%); portanto houve aumento considerável na porosidade interna promovendo o equilíbrio entre a produção (formação química) e a evaporação da água.

### 3.3. Variação da massa seca

Na Figura 8 observa-se que no início do processo a diminuição do teor de água não tem efeito sobre a variação da massa seca, portanto se caracterizou claramente a secagem à alta temperatura, onde o teor de água inicial diminuiu em aproximadamente 40%.

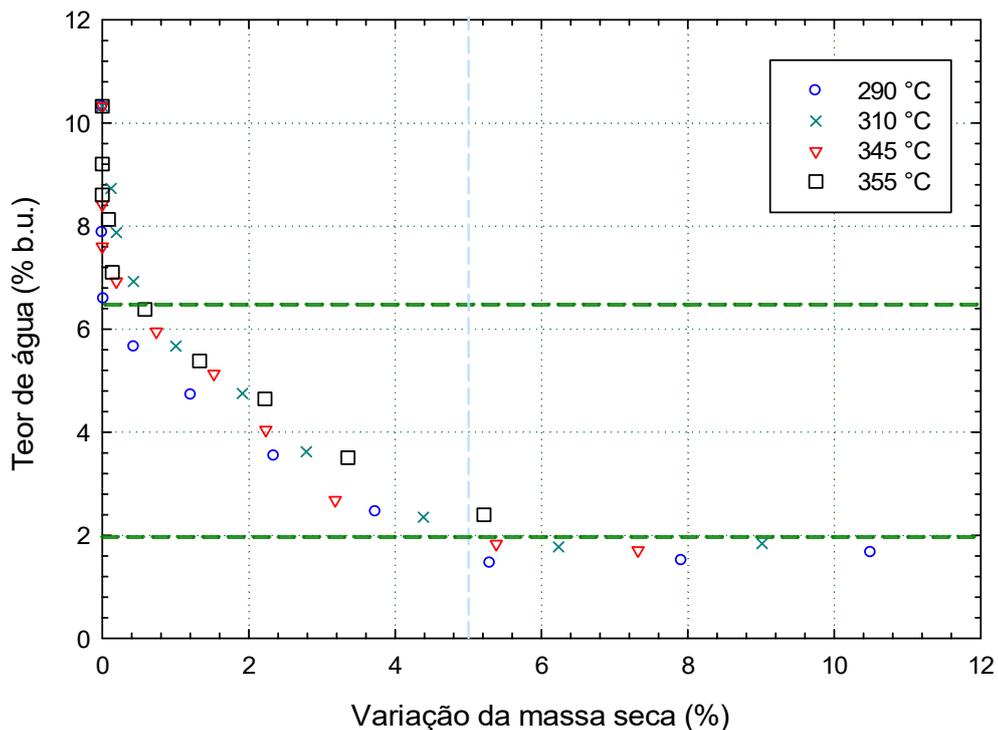


Figura 8 - Teor de água dos grãos em função da variação da matéria seca durante o processo de torrefação do café.

O teor de água em função da matéria seca dividiu todo o processo em três etapas. Na primeira etapa o teor de água diminuiu enquanto a matéria seca permaneceu constante (10,3 até 6,4% b.u.). Na segunda etapa teve tendência

decrecente e proporcional à variação da matéria seca (6,4 até 2% b.u.). Na terceira etapa permaneceu constante (1,7% b.u.) enquanto a matéria seca variou significativamente de 5 até 10,5%, o que indica uma mudança na cor dos grãos de torra média a torra escura (CLARKE; MACRAE, 1987).

### 3.4. Cinética da variação de massa seca

Observa-se na Figura 9 que para todas as temperaturas do processo, a matéria seca não varia durante a etapa de secagem nos primeiros 4,5 min, já na etapa de torra dos grãos, a cinética da variação da massa seca depende diretamente da temperatura do processo.

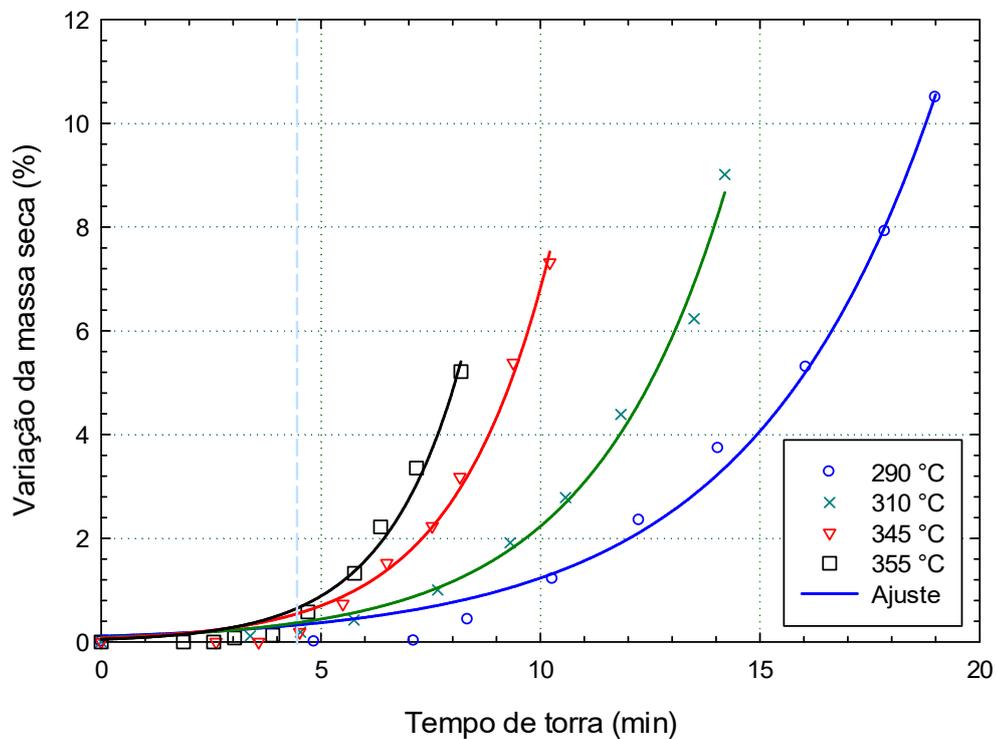


Figura 9 - Cinética da variação da massa seca dos grãos durante a torrefação do café.

As cinéticas da matéria seca comprovaram a tendência parabólica observado na faixa entre 5 e 11% para café torrado comercialmente (VARGAS-ELÍAS, 2011), já nesta pesquisa com os valores inferiores a 5% ajustou adequadamente com a equação exponencial crescente para todo o processo de torrefação.

Em todas as temperaturas do processo se obtiveram cafés com nível de torra média, com perdas de massa seca entre 5 e 8% e quando foi superior a 8% foram obtidas as torras escuras (CLARKE; MACRAE, 1987; BONNLÄNDER et al., 2005).

Na Equação 6, foi estabelecido um tempo ( $t_0$ ) necessário para observar variação na massa seca, que ocorreu com o início das reações químicas, e esse tempo dependeu da rapidez do aquecimento dos grãos para atingir de 180 a 190°C (HERNANDEZ et al., 2007). Esse tempo diminuiu no processo em altas temperaturas.

Na Tabela 1 se observa que tanto o coeficiente  $k$  das cinéticas da variação da matéria seca quanto o ajuste do tempo ( $t_0$ ) foi determinado adequadamente para cada temperatura de torra com  $p$ -valor  $< 0,0001$ .

Tabela 1 - Coeficientes determinados na análise de regressão não linear, ajuste do tempo ( $t_0$ ) e coeficiente de variação da massa seca ( $k$ )

Parâmetro	290 °C	310 °C	345 °C	355 °C
		<b>Coeficientes de ajuste</b>		
$t_0$	9,1176	7,5187	5,7832	5,2133
$K$	0,2385	0,3233	0,4552	0,5671
		<b><math>p</math>-valor</b>		
$t_0$	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
$k$	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
		<b>Parâmetros estatísticos</b>		
$r$	0,9960	0,9951	0,9955	0,9914
$r^2$	0,9919	0,9903	0,9911	0,9830
Adj. Rsqr	0,9909	0,9891	0,9900	0,9808
SE	0,3522	0,3195	0,2544	0,2477

Na máxima temperatura do torrador 355°C se obteve à taxa máxima de variação da matéria seca com 0,567%  $\text{min}^{-1}$  em contraste com na mínima temperatura do torrador 290°C se obteve a taxa mínima de variação da matéria seca com 0,238%  $\text{min}^{-1}$ , a duração do processo foi 8 e 16 min, respectivamente,

para atingir a mesma perda de massa seca de 5,5% e nível de torração média (CLARKE; MACRAE, 1987).

A análise da variação da matéria seca dos grãos, baseada na cinética das reações químicas de primeira ordem, foi adequada para representar o processo de torrefação do café em torrador convencional.

Na Tabela 2, observam-se os coeficientes (k) das cinéticas de variação da massa seca do café com as respectivas temperaturas do processo. Além desses valores são observados os parâmetros necessários para ajuste do modelo de Arrhenius, onde é calculada a inversa da temperatura absoluta do torrador e o logaritmo natural dos coeficientes de variação mássica.

Tabela 2 - Parâmetros térmicos do processo e coeficientes de variação da matéria seca dos grãos de café

Temperatura do torrador		$T^{-1}$ ( $10^{-3} \text{ K}^{-1}$ )	$k_t$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$\ln(k_t)$
( $^{\circ}\text{C}$ )	T (K)			
355	628,15	1,5920	0,5671	-0,5672
345	618,15	1,6177	0,4552	-0,7870
310	583,15	1,7148	0,3233	-1,1292
290	563,15	1,7757	0,2385	-1,4334

Na Figura 10, observa-se que a regressão linear da equação do Arrhenius ajustou com  $r^2$  de 0,9851.

Determinou-se o fator pré-exponencial de 622,2 e a energia de ativação, para iniciar a variação da massa seca nos grãos de café foi de  $36.793,3 \text{ J mol}^{-1}$ , que concordou com a faixa entre 10 e  $160 \text{ kJ mol}^{-1}$  para energia de ativação das reações de Maillard (SIKORSKI et al., 2007). A energia de ativação foi semelhante à determinada para iniciar a secagem do café cereja, nas variedades arábica e conilon que foram de  $38,39 \text{ kJ mol}^{-1}$  (OLIVEIRA et al., 2010) e  $38,02 \text{ kJ mol}^{-1}$  (BOTELHO, 2012), respectivamente.

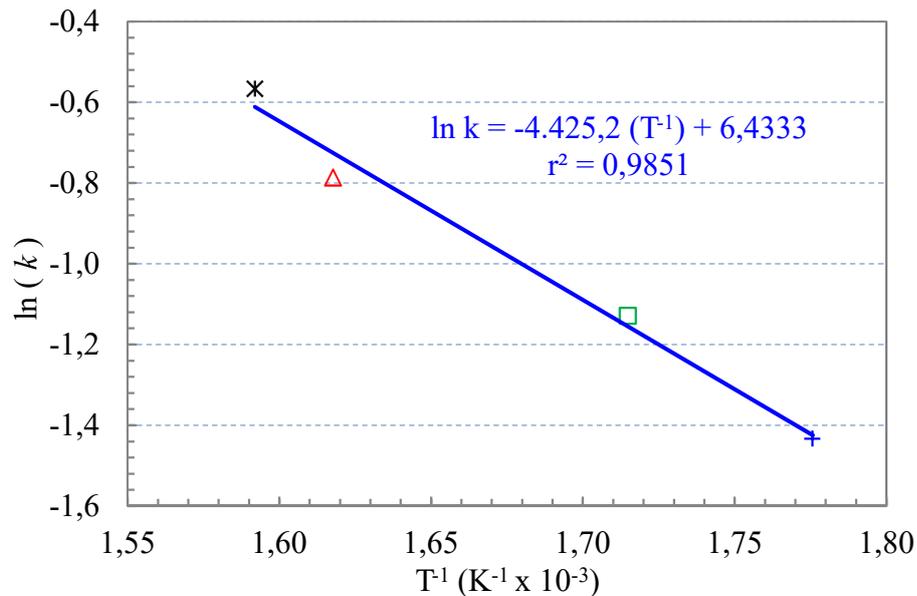


Figura 10 - Ajuste linear da inversa da temperatura do processo e o logaritmo natural do coeficiente de variação de massa seca dos grãos de café.

A energia de ativação para iniciar a variação da massa seca por torra do café foi menor que a energia de ativação para iniciar a perda de massa total na etapa secagem e a torra, que foram de 53,49 e 184,15  $\text{kJ mol}^{-1}$ , respectivamente (WANG; LIM, 2013). Deve-se indicar que nesse experimento o torrador foi de leito fluidizado com ar quente entre 220 e 250°C, portanto há diferenças no mecanismo de transferência de calor.

### 3.5. Predição do tempo para iniciar a perda da massa seca

Observa-se através da Figura 11 que o tempo de torra deve ser ajustado devido à etapa da secagem que retardou a variação da massa seca, foi necessário perder 40% do valor inicial do teor de água (10,32% b.u.), essa perda depende da velocidade da evaporação que está diretamente relacionada com a temperatura do processo.

O processo a alta temperatura foi tão rápido (8 min) que aumentou a rapidez das reações químicas, começando a variação da massa seca no menor tempo (5 min); portanto, a etapa da secagem demorou 62,5% do tempo total, o que está dentro da faixa entre 50 e 67% do tempo do processo (DUTRA et al., 2001).

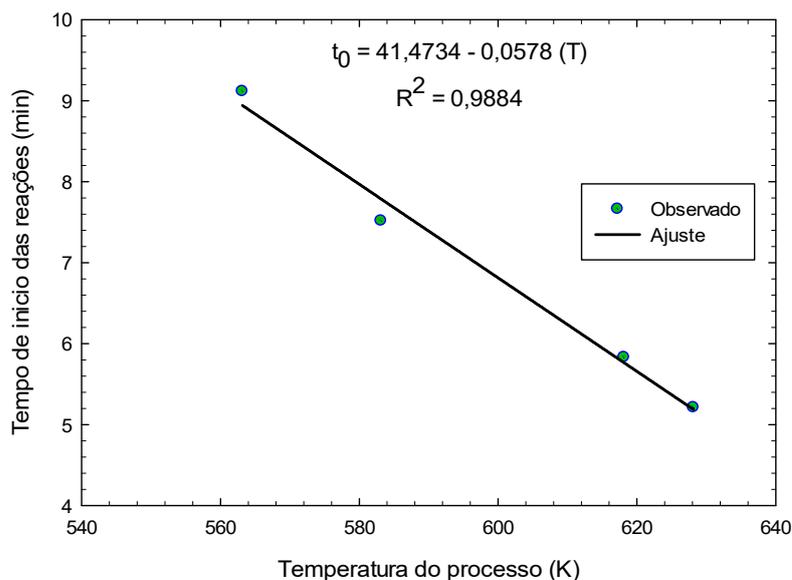


Figura 11 - Tempo de início da torra dos grãos de café em função da temperatura do processo.

A matéria seca se transforma enquanto o produto ainda tem 60 % da umidade inicial, e o processo de torra dos grãos ocorreu ao mesmo tempo da secagem. A matéria seca é a fonte dos constituintes que devem se transformar, para produzir todas as mudanças que caracterizam o café torrado, já o teor de água inicial impede que os grãos aqueçam rapidamente retrasando as reações pirolíticas (SCHWARTZBERG, 2002).

### 3.6. Modelo de variação da massa seca

A Equação 11 foi desenvolvida para representar a variação da massa seca dos grãos de café durante o processo de torrefação em função do tempo e da temperatura de torra.

$$\frac{M}{M_0} = \exp \left[ \left( t - (41,4734 - 0,0578 \cdot T_a) \right) \cdot 622,2 \cdot \exp \left( \frac{-36.793,3}{R_g T_a} \right) \right] \quad (11)$$

Tanto em leito fluidizado quanto torrador convencional, foi determinado que na cinética de perda de massa total durante a torra predominaram reações de ordem zero (WANG; LIM, 2013). Nesta pesquisa, determinou-se que a

cinética de perda da massa seca predominou reações de primeira ordem, para o torrador horizontal com cilindro perfurado e giratório.

#### 4. CONCLUSÕES

- As duas terceiras partes do tempo do processo os grãos perdem parcialmente água antes de iniciar a perda de massa seca.
- A temperatura do processo determina a cinética de perda de massa seca na torra dos grãos.
- O modelo de Arrhenius representa adequadamente relação entre a taxa da variação da massa seca com a temperatura do processo.
- O modelo exponencial de acordo com as cinéticas das reações de primeira ordem representa adequadamente a relação entre a rapidez da transformação da matéria seca em função do tempo e da temperatura do torrador.

#### 5. REFERÊNCIAS

ALESSANDRINI, L.; ROMANI, S.; PINNAVAIA, G.; DALLA ROSA, M. Near infrared spectroscopy: an analytical tool to predict coffee roasting degree. **Analytica Chimica Acta**, v. 625, p. 95-102, 2008.

ATKINS, P.; PAULA, J. **Físico-Química**. LTC: Livros Técnicos e Científicos V. 1. 9 ed., (2012) 404 p.

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

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.

CLARKE, R.J.; MACRAE, R. **Coffee Technology**. London: Elsevier Applied Science, 1987. v. 2, 321 p.

DUTRA, E.R.; OLIVEIRA, L.S.; FRANÇA, A.S.; FERREZ, V.P.; AFONSO, R.J. A preliminary study on the feasibility of using the composition of coffee roasting exhaust gas for the determination of the degree of roast. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p. 241-246, 2001.

FOGLER, H. S. **Elements of chemical reaction engineering**. New Delhi: Prentice-Hall India 3 ed., 2004. 967 p.

GEIGER, R.; PERREN, R.; KUENZI, R.; ESCHER, F. Carbon dioxide evolution and moisture evaporation during roasting of coffee beans. **Journal of Food Science**, v. 70, n. 2, p. 124-130, 2005.

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.

HEYD, B.; BROYART, B.; HERNANDEZ, J.A.; VALDOVINOS-TIJERINO, TRYSTRAM, G. Physical model of heat and mass transfer in a spouted bed. **Drying Technology**, v. 25, p. 1243-1248, 2007.

ILLY, A.; VIANI, R. **Express 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. 1020.

LEVENSPIEL, O. Engenharia das reações químicas. Tradução 3 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2000, 563 p.

OLIVEIRA, G.H.H.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; VARGAS-ELÍAS, G.A.; DINIZ, M.D.M.S. Analysis of thermodynamic properties of coffee berries during drying. In: WORLD CONGRESS OF THE INTERNATIONAL COMMISSION OF AGRICULTURAL AND BIOSYSTEMS ENGINEERING, 17, 2010, Québec, Canada. **Proceedings**. Québec, Canada, 2010.

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

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.

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

SIKORSKI, Z.E.; POKORNY, J.; DAMODARAN, S. Physical and chemical interactions of components in food systems. Chapter 14. In Damodaran, S.; Parkin, K. L.; Fennema, O. R. (Eds.). **Food Chemistry**. 4.ed. Boca Raton: CRC Press, 2007. p. 866.

VARGAS-ELÍAS, G.A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 2011. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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>>. Acesso em: 25 nov. 2013.

ZOGZAS, N. P.; MARULIS, Z. B.; MARIINOS-KOURISD. Moisture diffusivity data compilation in foodstuffs. **Drying Technology**, v.14 (10), p. 2225–2253, 1996.

## CONCLUSÃO GERAL

O aquecimento na superfície dos grãos é contínuo durante todo o processo, nos primeiros dois minutos de torra observou-se que a temperatura aumentou bruscamente e após um ponto de inflexão atingiu uma tendência linear até o final da torra.

A energia produzida nas reações exotérmicas não aumentou consideravelmente a temperatura da superfície dos grãos, mantendo a mesma taxa linear de aquecimento. A cinética do aquecimento foi adaptada adequadamente à torrefação do café, mostrando relação direta com a temperatura do processo.

A transferência de massa durante o processo de torrefação foi dividida em duas fases, de evaporação e de torrefação, na primeira fase predominou a perda de massa por evaporação e na segunda devido à transformação da matéria seca.

Foi desenvolvido o modelo matemático baseado na lei das reações químicas para representar a expansão aparente e a variação da massa seca dos grãos de café durante o processo de torrefação em função do tempo e da temperatura de torra.

O modelo de Arrhenius representou adequadamente a influência da temperatura de torrefação tanto com a cinética de expansão aparente quanto com a cinética de variação da matéria seca dos grãos de café.