

GUILLERMO ASDRÚBAL VARGAS ELÍAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUALIDADE DO CAFÉ
EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TORREFAÇÃO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFRV**

T

V297a
2011

Vargas Elías, Guillermo Asdrúbal, 1970-
Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em
diferentes condições de torrefação / Guillermo Asdrúbal
Vargas Elías. – Viçosa, MG, 2011.
ix, 98f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Paulo César Corrêa.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Café - Propriedades físicas. 2. Torrefação. 3. Café -
Qualidade. 4. Café - Efeito da temperatura. I. Universidade
Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 633.735

GUILLERMO ASDRÚBAL VARGAS ELÍAS

**AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUALIDADE DO CAFÉ
EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TORREFAÇÃO**

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

APROVADA: 21 de fevereiro de 2011.



Dra. Adélia Aziz Alexandre Pozza



Dr. Evandro de Castro Melo



Dr. Paulo Cesar Corrêa
(Orientador)

Ebenézer: até aqui nos ajudou o Senhor.
A meus pais, Esperanza e Nicolás.
A meus irmãos, Alex, Ingrid, Mike e Johanna.
À minha esposa, Eugenia.
Ao meu filho, David.
A meu anjo, Daniel.
À minha sempre presente, Dona Juanita.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

À Universidad de Costa Rica, pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Paulo Cesar Corrêa, pela orientação e colaboração nas assinaturas de muitas cartas.

Aos professores Tetuo Hara, Evandro de Castro Melo e Roberto Cecon, pelo apoio na coorientação e leitura das primeiras versões em português.

Aos funcionários do Centreinar, Magela e Cláudia, pela permissão e pelo apoio durante as provas de torrefação e, principalmente, pela amizade.

Aos meus colegas, Gabriel, Fernando, Sílvia, Fernanda, Aline, Maira, Emílio, Rafael, Davi, Maicon e Bruna, pela ajuda nos significados das palavras em português e, principalmente, pela grande amizade.

Aos colegas da turma, Ivanildo, Diana, Daniel, Conceição e Oscar.

Aos funcionários da Pós-Graduação do DEA, Edna e Délio, e da Meteorologia, Graça, pela especial ajuda na orientação e no apoio logístico nos assuntos estudantis.

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.

Em fevereiro de 2009, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa da dissertação em fevereiro de 2011.

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO GERAL	1
CAPÍTULO 1	5
TEMPERATURA DA MASSA DOS GRÃOS DE CAFÉ AO ATINGIR DIFERENTES ÍNDICES DE TORREFAÇÃO	5
1. INTRODUÇÃO	7
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. Matéria-prima	9
2.2. Processo de torrefação	10
2.3. Determinação da temperatura	11
2.4. Perda de massa	12
2.5. Determinação do teor de água	12
2.6. Avaliação da cor	12
2.7. Análise estatística	13
3. RESULTADOS	13
3.1. Temperatura de torrefação	13
3.2. Aquecimento da massa dos grãos	15
3.3. Resfriamento dos grãos	17
3.4. Tempo de torrefação	18
3.5. Perda de massa total	21

3.6. Temperatura final da massa dos grãos.....	25
3.7. Relação dos parâmetros da torrefação.....	29
4. CONCLUSÕES.....	32
5. REFERÊNCIAS.....	33
CAPÍTULO 2.....	36
AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CAFÉ.....	36
EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TORREFAÇÃO.....	36
1. INTRODUÇÃO.....	38
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
2.1. Matéria-prima.....	40
2.2. Processo de torrefação.....	40
2.3. Perda de massa.....	40
2.4. Teor de água.....	41
2.5. Determinação do volume dos grãos.....	41
2.6. Expansão volumétrica.....	41
2.7. Massa específica unitária e aparente.....	42
2.8. Determinação da porosidade.....	44
2.9. Análise estatística.....	44
3. RESULTADOS.....	45
3.1. Teor de água.....	45
3.2. Análise da matéria seca.....	46
3.3. Aumento do volume aparente dos grãos.....	49
3.4. Aumento no volume unitário dos grãos.....	54
3.5. Massa específica aparente.....	58
3.6. Massa específica unitária.....	64
3.7. Porosidade.....	69
4. CONCLUSÕES.....	71
5. REFERÊNCIAS.....	72
CAPÍTULO 3.....	74
AVALIAÇÃO SENSORIAL DA QUALIDADE DO CAFÉ.....	EM
DIFERENTES CONDIÇÕES DE TORREFAÇÃO.....	74
1. INTRODUÇÃO.....	76
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	77
2.1. Matéria-prima.....	77

2.2. Processo de torrefação.....	78
2.3. Determinação da temperatura	78
2.4. Nível de torrefação.....	79
2.5. Avaliação sensorial	80
2.6. Análise estatística	81
3. RESULTADOS.....	81
3.1. Características sensoriais da bebida	81
3.2. Pontuação geral.....	83
3.3. Efeito do tempo e da temperatura de torrefação.....	84
3.4. Efeito do índice de torrefação	90
4. CONCLUSÕES	91
5. REFERÊNCIAS.....	91
CONCLUSÃO GERAL	93
REFERÊNCIAS.....	95

RESUMO

VARGAS-ELÍAS, Guillermo Asdrúbal, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação.** Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Coorientadores: Evandro de Castro Melo e Paulo Roberto Cecon.

Objetivou-se com este trabalho avaliar as características físicas associadas a câmbios na qualidade sensorial dos grãos de café numa combinação de quatro temperaturas (255, 284, 305 e 355°C) e quatro categorias de torrefação (média clara, média, moderadamente escura e escura). Durante o processo, foram medidas as temperaturas da massa dos grãos e do torrefador; avaliou-se a perda de massa no final de cada tratamento; mediu-se o aumento do volume das amostras e da massa específica; e, finalmente, foi calculada a porosidade. Os testes da bebida demonstraram que, nos tratamentos, as temperaturas, a partir de 284°C no torrefador, com tempos entre 9 e 16 min, desenvolveram as características sensoriais de acidez, doçura e corpo em níveis ótimos, mantendo a percepção da adstringência em níveis mínimos. Na pontuação geral, a torrefação média clara foi valorizada com 80,6 pontos; as características físicas associadas foram: a temperatura da massa de grãos atingiu valores entre 228 e 245°C, a razão de matéria seca foi de $0,946 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{ kg}_{\text{ms}0}^{-1}$, a expansão da massa de grãos ficou entre 50 e 68%, a expansão unitária foi de 45 a 55%, a massa específica aparente apresentou-se

em 365 kg m^{-3} , a massa específica unitária foi de 650 kg m^{-3} e a porosidade estabeleceu-se em aproximadamente 45% na massa de grãos torrados.

ABSTRACT

VARGAS-ELIAS, Guillermo Asdrúbal, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Evaluation of physical properties and quality of bean coffee in different conditions of roasting.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa. Co-advisers: Evandro de Castro Melo and Paulo Roberto Cecon.

The objective was to evaluate the physical characteristics associated to sensorial quality changes of coffee beans in a combination of four temperatures (255, 284, 305 and 355°C) and four levels of roasting (medium- light, medium, dark, and moderately dark). Throughout the process, were measured the temperature of mass of grains and of the roaster; it was evaluated the mass loss at the end of each treatment; it was measured using the increase in volume and density of the samples and, finally it was calculated porosity. The coffee cup quality showed that temperatures from 284°C in the roaster with times between 9 e 16 min, developed the sensorial characteristics of acidity, sweetness and body in optimal levels of the beverage, maintaining the perception of astringency at minimum levels. In the overall score, the light-medium degree of roasting was evaluated with 80.6 points and the physical characteristics associated were: the temperature of the mass reached values between 228 and 245° C, the ratio of dry matter $0.946 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{ kg}_{\text{ms0}}^{-1}$, the expansion of the mass between 50 and 68%, the unit was expanded from 45 to

55%, the apparent density was 365 kg m^{-3} , the true density of 650 kg m^{-3} and porosity of approximately 45% in the mass of roasted beans.

INTRODUÇÃO GERAL

O café é considerado um dos mais importantes produtos agrícolas do Brasil e do mundo em razão do alto retorno econômico, proveniente da exportação, industrialização e do elevado número de empregos, diretos e indiretos, relacionados à agroindústria. O Brasil é o principal produtor mundial de café, com produção de 2,2 milhões de toneladas de grãos em 2007 (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO, 2010). A espécie *Coffea arabica* L. representa 75% do total de café produzido no Brasil; e o Estado de Minas Gerais tem a maior contribuição, com 67,1% desse total (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2010).

Segundo Cortez (2001), a qualidade do café depende das condições climáticas, dos cultivares e do processamento pós-colheita. Esse autor concluiu que o processamento industrial deve ser estabelecido de acordo com a finalidade a que se destina o produto como o preparo de café expresso ou a forma tradicional de preparo da infusão. Em um estudo de caso sobre o mercado, em nível regional de consumo de café torrado, concluiu-se que o fator que determina a compra de café em pó é o sabor, assim como é um critério para se predominar o critério do preço (DEBOÇÃ et al., 2004). Segundo Schmidt et al. (2008), para o gosto da população do oeste do Paraná, a torra deve ir até o ponto em que ocorre a pirólise, com a consequente liberação de CO₂, que é interrompida quando a temperatura passa de 210°C. Caso a

temperatura chegue a 230°C, grande quantidade de óleo recobre os grãos, o que reduz a aceitação do produto.

De acordo com Sivetz e Desrosier (1979), o processo de torrefação pode ser dividido em três etapas consecutivas: secagem, torrefação e resfriamento. Na primeira, a perda de massa é por causa da eliminação de água e liberação de compostos voláteis presentes nos grãos. Nesse estágio, os grãos mudam da cor verde para a amarela. Na segunda, é caracterizada por reações exotérmicas de pirólise, que resultam na modificação da composição química dos grãos, em razão da liberação de grandes quantidades de gás carbônico. As cores dos grãos mudam de marrom-claros a escuros por causa, principalmente, da caramelização dos açúcares. Já a terceira etapa é necessária para promover o resfriamento imediato por injeção de ar frio ou aspersão de água, para evitar a carbonização do produto.

A última etapa da torrefação é caracterizada pela expansão dos grãos, cujo volume duplica (SIVETZ; DESROSIER, 1979). O aumento de volume do café durante a torra pode ser quantificado pelas medidas dos seus três principais eixos (PITTIA et al., 2001), mas não há relatos na literatura especializada das medições volumétricas diretas. Durante esses três processos que englobam a torrefação, o estudo das consequências (alterações no teor de água, na cor e na expansão dos grãos) torna-se necessário e a modelagem matemática é importante análise para predição desses dados. Essa avaliação pela modelagem fornece parâmetros para o estudo de transferência de calor e massa, durante o processo de secagem, para dimensionar as torrefadoras e possibilitar maior praticidade, em relação à predição da qualidade do produto final.

Os modelos semiempíricos de secagem foram adaptados para ilustrar o comportamento do teor de água e voláteis, durante a torrefação do café arábica. França et al. (2002b) analisaram que o modelo de Page apresenta adequada explicação dos dados experimentais. Esses autores concluíram que os parâmetros empíricos desse modelo não só estão relacionados com a difusividade efetiva dos grãos, mas também com a taxa de produção de água e voláteis, durante a fase de pirólise dos grãos. Corrêa et al. (2004) estudaram três tipos de frutos café durante a secagem e concluíram que para cada tipo foi necessário ajuste matemático particular para a representação da contração

volumétrica dos grãos. Mayor e Sereno (2004) concluíram que os modelos teóricos aplicados em quatro produtos agrícolas podem dar grandes erros na determinação da contração volumétrica e recomendaram o uso de modelos empíricos, o que resultou em bons ajustes aos dados obtidos para as condições particulares.

Durante a torrefação, há perda de massa dos grãos, que varia entre 14%, para torra suave, e 20%, para a escura. O teor de água varia de 11 a 12%, para os grãos verdes, e de 2,5 a 4%, para os grãos torrados (SIVETZ; DESROSIER, 1979). Nesses teores de água, a massa específica unitária diminui de 1.200 até 600 kg m⁻³, para café arábica (DUTRA et al., 2001; PITTIA et al., 2001).

Cortez (2001) relacionou as variáveis de temperatura com a perda da água dos grãos de café arábica durante a torrefação, até que esses atingissem 105°C de temperatura, apesar de não terem apresentado alteração química. Entre 105 e 150°C, caracteriza-se a fase endotérmica, com a produção de CO₂ e o aumento do tamanho dos grãos, em razão da pressão do gás que se expande nas paredes celulares do endosperma. A partir de 150°C, inicia-se a fase de reações exotérmicas, principalmente pela reação entre aminoácidos e sacarose, caracterizada como “Reações de Maillard”, formadoras do gosto e do aroma do café. Essas reações perduram até cerca de 230°C, quando as reações químicas são esgotadas e inicia-se a degradação de outros componentes do café como celulose, pentosanas, lipídios insaponificáveis, dentre outros. Nesse momento, a atividade deve ser interrompida por meio da adição de água ou de ar.

Segundo França et al. (2002a), o estudo dos perfis de temperatura dos gases de torrefação para os ensaios com aquecimento constante com três tipos de torra permitiu a caracterização da torrefação em duas fases distintas: na primeira, houve decréscimo de temperatura em razão do aquecimento dos grãos e do processo endotérmico de eliminação de água e voláteis; e na segunda, ocorreu o aumento progressivo da temperatura, em decorrência da liberação de calor pelas reações exotérmicas de pirólise, por causa do aquecimento contínuo do sistema.

Em estudo realizado por Schmidt et al. (2008), quatro ensaios do processo de torrefação do café foram realizados com temperaturas de 180,

190, 210 e 230°C associadas aos tempos da torrefação de 16, 18, 20 e 22 min, respectivamente. Esses autores demonstraram que, nas duas primeiras condições, houve desenvolvimento de cor amarela, sendo denominadas torras claras; na terceira, foi desenvolvida uma coloração marrom-avermelhada, podendo ser considerada uma torra média escura; e, na quarta, o produto apresentou uma coloração marrom-escura, tendendo a preta, identificada como torra bem escura.

França et al. (2002a), avaliando o teor de água no processo de torrefação, observaram que, aos 12 min de torra, o teor de água de duas variedades de café arábica ficou semelhante, em aproximadamente 0,02 kg de água por quilogramas de matéria seca ($\text{kg}_a \text{kg}_{ms}^{-1}$).

Illy e Vianni (1995) indicaram que a perda de massa tem correlação linear com o grau de torrefação, o que serve para verificar o índice de torra que atingiu os grãos.

O processo final de torrefação do café é caracterizado por alterações químicas e físicas complexas. Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho foi estudar as propriedades físicas e a qualidade sensorial do café, torrado em diferentes temperaturas, bem como a relação dos índices de torrefação do produto.

Especificamente, pretendeu-se:

- Monitorar e registrar a temperatura do torrefador e da massa dos grãos, durante as três etapas do processo de torrefação.
- Correlacionar a temperatura da massa dos grãos de café ao atingir os diferentes níveis de torrefação com a perda de massa, em diferentes condições de temperatura e tempo de torrefação.
- Avaliar as características físicas dos grãos de café torrados, medindo o volume aparente da massa de grãos, o volume unitário dos grãos, a massa específica aparente e unitária e a porosidade.
- Computar as transformações sensoriais ocorridas no processo de torrefação do café, submetido a diferentes tratamentos pelo teste da xícara.

CAPÍTULO 1

TEMPERATURA DA MASSA DOS GRÃOS DE CAFÉ AO ATINGIR DIFERENTES ÍNDICES DE TORREFAÇÃO

RESUMO: O processo final de torrefação do café é caracterizado por alterações químicas e físicas complexas. Nessa complexidade de alterações, o objetivo deste trabalho foi de relacionar as temperaturas e o tempo de torrefação com a temperatura da massa de grãos e a perda de massa total. Foram utilizados um torrefador rotativo perfurado à queima de gás direto e amostras de 350 g de café, classificado como estritamente mole, com tamanho acima da peneira n.º 17, submetidas às temperaturas de 255, 284, 305 e 355°C do torrefador e torrefação média clara, média, moderadamente escura e escura. Adaptaram-se relações lineares, quadráticas, logarítmicas e potenciais, para representar a interação das variáveis de tempo de torrefação, temperatura do torrefador, temperatura da massa de grãos e perda de massa dos grãos. Determinou-se que o índice de torrefação está diretamente relacionado com a perda de massa total. Ao aumentar a temperatura do torrefador, a rapidez de perda de massa no produto aumentou proporcionalmente. Estabeleceu-se que há um perfil de aquecimento dos grãos, correspondente para cada temperatura no torrefador, que pode ser utilizado como parâmetro, associado ao índice de torrefação dos grãos. As variáveis foram integradas numa figura para predizer o ponto final de torra, segundo as características desejadas no produto.

MEASURE OF TEMPERATURE AND MASS OF COFFEE GRAINS IN THE ROASTING PROCESS

ABSTRACT: The final step of roasting process of coffee, has chemistry and physics complex changes. For that reason, the main objective of this work was to associate and compare temperatures and roasting time, with the mass temperature of coffee grains and the total loss mass. It was used a perforated rotating roaster of gas flaring straight and coffee samples of 350 g, classified as strictly soft, oversized sieve n. 17, submitted to 255, 284, 305 and 355°C, and roasting degree of medium-light, medium, moderately dark, and dark. It was adapted linear relations, quadratic, logarithmic, and potentials to represent the interaction between variables of time of roasting, roaster temperature, temperature of the grain mass and weight loss in grains. It was determined that roasting degree is directly related to the total loss mass during roasting. By increasing of temperature in the roaster, the weight loss rate in grains increased proportionally. It was determined that there is a heating profile of the grains corresponding to each temperature in the roaster, and it can be used as a parameter associated to roasting degree of the grains. Variables were incorporated into a figure to predict the end point of roasting according to the characteristics desired in the product.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor da cadeia produtiva do café no Brasil vem concentrando esforços na busca da melhoria da qualidade de seus produtos. Uma das etapas de particular relevância na qualidade de bebida é o processo de torrefação do café, sendo considerada uma etapa crítica na industrialização do produto (CONSÓRCIO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO CAFÉ – CBPDC, 2004).

O processo de torrefação, segundo Sivetz e Desrosier (1979), pode ser dividido em três etapas consecutivas: secagem, torrefação e resfriamento. Na primeira, perde-se massa por causa da eliminação de água e liberação de compostos voláteis presentes nos grãos. Nesse estágio, os grãos mudam da cor verde para amarela. A segunda, caracteriza-se por reações exotérmicas de pirólise, que resultam na modificação da composição química dos grãos, pela liberação de grandes quantidades de gás carbônico. Já nesse estágio, as cores dos grãos mudam de marrom-claros a escuros, principalmente em razão da caramelização dos açúcares. A terceira etapa é necessária para promover resfriamento imediato, com injeção de ar frio ou aspensão de água, para evitar a carbonização do produto.

Durante a torrefação, há perda de massa dos grãos, que varia desde 14%, para torra suave, até 20%, para a escura; o teor da água varia de 11 a 12% b.u., para os grãos verdes, e de 2,5 a 4% b.u., para os torrados (SIVETZ; DESROSIER, 1979).

Segundo França et al. (2002a), a diminuição do nível de aquecimento do torrefador resulta numa redução das taxas de perda de massa e da eliminação de água e voláteis. Portanto, o estudo da perda de massa apresenta potencialidade de correlação com a qualidade de bebida, podendo ser utilizada como parâmetro diferenciador de qualidade.

Cortez (2001) relacionou as variáveis de temperatura com a perda de água dos grãos de café arábica durante a torrefação e verificou que: até os grãos atingirem 105°C não houve atividade química; entre 105 e 150°C, apresentou-se uma fase endotérmica, com produção de CO₂ e aumento do tamanho dos grãos, por causa da pressão do gás que se expandiu e forçou as paredes celulares do endosperma; e a partir de 150°C, iniciou-se uma fase de

reações exotérmicas, pela reação entre aminoácidos e sacarose, chamadas de “Reações de Maillard”, formadoras do gosto e do aroma do café. Essas reações perduram até cerca de 230°C, quando as reações químicas são esgotadas, iniciando a degradação de outros componentes do café como a celulose, as pentosanas, os lipídios insaponificáveis, dentre outros. Nesse momento, o processo deve ser interrompido pela adição de água ou de ar.

O estudo dos perfis de temperatura dos gases de torrefação para os ensaios com aquecimento constante com três tipos de torra permitiu a caracterização da torrefação em duas fases distintas: na primeira, há decréscimo de temperatura em razão do aquecimento dos grãos e do processo endotérmico de eliminação de água e voláteis; e, na segunda, ocorre o aumento progressivo da temperatura em decorrência da liberação de calor pelas reações exotérmicas de pirólise pelo aquecimento contínuo do sistema (FRANÇA et al., 2002a).

Em razão dessa diferença no perfil de temperaturas, Schmidt et al. (2008) analisaram quatro ensaios do processo de torrefação do café com as seguintes configurações: temperaturas de 180, 190, 210 e 230°C associadas a quatro tempos de torrefação (16, 18, 20 e 22 min), respectivamente. Esses autores demonstraram que houve desenvolvimento de cores como amarela, denominada torra clara, para as duas primeiras torras; marrom-avermelhada, considerada torra média escura, para a terceira torra; e marrom-escura, tendendo a preta, identificada como torra bem escura, para a quarta torra. As perdas de massas para cada coloração foram de 10,6; 11,25; 18,65; e 22,78%, respectivamente, ficando nítida a correlação entre a perda de massa e a coloração do produto e, por conseguinte, a qualidade desse.

O controle da torra é feito normalmente pela temperatura do torrefador. Uma outra variável é a temperatura da massa dos grãos, durante o processo de torrefação. Pesquisadores como Nicoli et al. (1995), Schenker (2000), Cortez (2001), Hernández et al. (2007) e Alessandrini et al. (2008) observaram que a temperatura do produto está associada à perda de água e às transformações da matéria seca, o que faz iniciar o processo de pirólise. Esse processo de pirólise moderada é o que determina as características de aroma, cor e sabor dos grãos de café torrados (FRANÇA et al., 2002a).

Quanto aos tipos de torrefadores, há poucas referências em relação aos torrefadores rotativos horizontais a gás e com cilindro perfurado. Há necessidade de mais estudos para obterem-se informações sobre as características desse tipo de torrefador, que é usado há muito tempo pelas indústrias torrefadoras, em nível de laboratórios, para análises de amostras. Baggenstoss (2008) faz referência que a transferência de calor é realizada principalmente por condução e demora mais tempo na torrefação nesse tipo de torrefador tradicional.

O processo final de torrefação do café é caracterizado por alterações químicas e físicas complexas. Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram:

- Monitorar e registrar a temperatura do torrefador e da massa dos grãos, durante as três etapas do processo de torrefação.
- Correlacionar a temperatura da massa dos grãos de café ao atingir os diferentes níveis de torrefação com a perda de massa, em diferentes condições de temperatura e tempo de torrefação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

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

2.1. Matéria-prima

Utilizaram-se grãos de café beneficiados, com tamanho acima da peneira 17, *Coffea arabica* L. variedade Catuaí Vermelho, com teor de água inicial de 0,1386 quilogramas de água por quilogramas de matéria seca ($\text{kg}_a \text{kg}_{ms}^{-1}$), provenientes de uma unidade beneficiadora de café localizada em Viçosa, Minas Gerais.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e armazenadas em câmara fria à temperatura em torno de 18°C, a fim de se

manterem as características iniciais do produto até sua torrefação. Antes das operações de torrefação, as amostras foram retiradas da câmara fria e expostas à temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas, visando atingir o equilíbrio térmico para minimizarem as alterações relacionadas à temperatura.

2.2. Processo de torrefação

Na Figura 1, é apresentado o torrefador utilizado de queima de gás direto com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com pré-aquecimento e capacidade de 350 g de café cru. A taxa de consumo do combustível foi constante para manter a temperatura estável no torrefador, durante todo o processo. As temperaturas médias de torrefação foram de 255, 284, 305 e 335°C.



Figura 1 - Torrefador de cilindro rotativo perfurado de combustão direta de gás.

Para se obterem os quatro índices de torrefação de café numa mesma temperatura foi necessário deixar o produto por mais tempo no torrefador até atingir a cor desejada. Um profissional qualificado da área auxiliou os trabalhos, durante a torrefação, a fim de se obter a cor característica das amostras.

2.3. Determinação da temperatura

O processo de torrefação foi iniciado com temperatura mais baixa (255°C), aumentando de modo gradativo até chegar à mais alta (335°C). Para estabilização da temperatura interior do cilindro rotativo foi feito o pré-aquecimento de 20 min do torrefador.

Usou-se um termômetro infravermelho, marca Mult-Temp portátil, que forneceu leituras entre -50 e 500°C, com tempo de resposta de 1 e resolução de 0,1°C. A relação é 9 para 1 entre a distância e o diâmetro de alvo.

A temperatura média do torrefador foi medida na parede interna do cilindro e a da amostra, na superfície dos grãos, a cada 30. A distância foi de 20 cm entre o medidor e o alvo, conforme a Figura 2.



Figura 2 – Medição da temperatura na superfície da massa dos grãos de café.

Para se minimizarem os erros relativos à movimentação da massa de grãos no interior do cilindro e nos dois removedores internos, foram feitas duas leituras na parede do cilindro para calcular a média de temperatura do torrefador, usando 350 g de café cru, que ocupou o espaço suficiente para garantir a medição da temperatura na massa de grãos.

2.4. Perda de massa

Em cada tratamento, observou-se a perda de massa total para cada amostra inicial de 350 g. Quando retirados os grãos de café torrados e aquecidos, esses foram resfriados em ar, à temperatura ambiente, e, logo após, pesados em balança digital com precisão de 0,01 g. Para calcular a perda relativa da massa inicial, usou-se a equação 1:

$$\Delta M = \frac{(m_0 - m)}{m_0} * 100 \quad (1)$$

em que ΔM é a perda de massa na amostra (%); m , massa da amostra no final da torrefação (g); e m_0 , massa da amostra de grãos crus (g).

2.5. Determinação do teor de água

Os teores de água do produto foram determinados por meio da secagem das amostras na estufa com circulação de ar a $105^\circ\text{C} \pm 3$ até massa constante, segundo o método físico-químico para análise de alimentos (INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL, 2004), em três repetições.

2.6. Avaliação da cor

A torrefação do café foi classificada, segundo a cor dos grãos em média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E), com os números correspondentes da Tabela Agron da Figura 3: SCAA#65, SCAA#55, SCAA#45 e SCAA#35, respectivamente.



Figura 3 – Torrefação do café e discos coloridos da Tabela Agtron.

2.7. Análise estatística

No total, foram feitos 16 tratamentos com três repetições e com diferença de uma semana entre si. O experimento foi realizado em esquema de parcelas subdivididas em blocos casualizados, tendo nessas as temperaturas do torrefador de 255, 284, 305 e 335°C e, nas subparcelas, a torrefação dos grãos: média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E). Os dados foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste F. Os modelos foram escolhidos a partir dos 5% de confiança dos coeficientes de regressão e do coeficiente de determinação R^2 .

3. RESULTADOS

3.1. Temperatura de torrefação

Na Figura 4, no início da torrefação, foi observada a diminuição da temperatura no cilindro por causa da temperatura da massa dos grãos crus,

pois o torrefador transferiu parte da energia para aquecer a massa dos grãos, que foi pelo menos 10 vezes mais fria.

A transferência de calor foi por condução e por radiação das paredes internas do cilindro à massa de grãos. As reduções das temperaturas foram entre 31 e 56°C, para se estabilizarem entre 255 e 335°C, respectivamente, no torrefador. Essa informação é necessária para se estabelecerem as temperaturas do início da torrefação, considerando as diminuições dessas ao colocar o café, que nesse caso foram de 286 e 391°C.

Na Figura 4, em aproximadamente 2,5 min, estabilizou-se a temperatura no torrefador. Os valores da temperatura média do torrefador foram obtidos depois desse tempo em 334,7; 304,7; 283,6; e 255,4°C. As medições de temperaturas feitas na parede interna do cilindro representam a temperatura do torrefador, que manteve a diferença de mínima de 20°C entre essas.

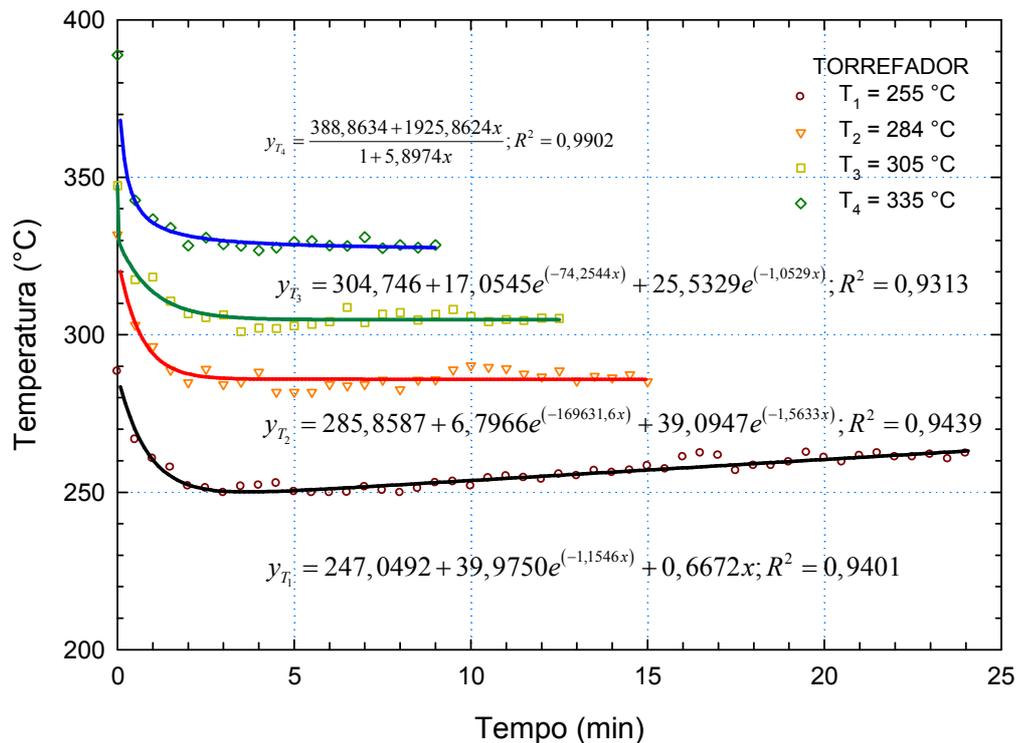


Figura 4 – Temperatura média no cilindro do torrefador durante o processo de torrefação até atingir a torrefação média clara no café.

A relação entre o tempo e a temperatura no torrefador foi predominante para a equação exponencial, que se ajustou para R^2 acima de 0,93.

A partir de 255°C no torrefador, percebeu-se depois de 10 min houve aumento da temperatura no cilindro até o final da torrefação, o que foi associado ao processo exotérmico dos grãos; entretanto, não foi percebido para as outras temperaturas acima de 255°C.

3.2. Aquecimento da massa dos grãos

A determinação da temperatura foi na superfície da massa dos grãos. Segundo Hernández et al. (2007), a medição superficial da temperatura é diferente da interna do grão no início da torrefação, mas os valores tornaram-se semelhantes no final.

Na Figura 5, são observadas as linhas da temperatura média da massa dos grãos de café para atingir a torrefação média clara. Os pontos finais das linhas correspondem à temperatura final do produto, os quais foram diferentes para se obter o mesmo índice de torrefação, quando esses foram submetidos a quatro temperaturas de torrefação.

O aquecimento foi descrito para cada temperatura do torrefador. Os ajustes logarítmicos tiveram R^2 acima de 0,98, portanto as relações foram adequadas para representar o aquecimento dos grãos e o tempo de torrefação. Os resultados estão de acordo com Geiger (2004), que obteve linhas logarítmicas de temperatura em experimento com alta temperatura e curta duração, com 100 g, em torrefador com camada de leito fluidizado.

Nos primeiros 2,5 min, observou-se rápido aquecimento dos grãos, mas depois desse tempo continuou com taxa constante até o final do processo de torrefação; a temperatura da massa dos grãos, nesse momento, esteve entre 120 e 150°C. Segundo a literatura, ainda estaria no processo da secagem, que acontece abaixo de 160°C na temperatura do grão. A transição entre as etapas de secagem e torrefação aconteceu sem ser percebida pela temperatura do torrefador e quantidade de massa avaliada.

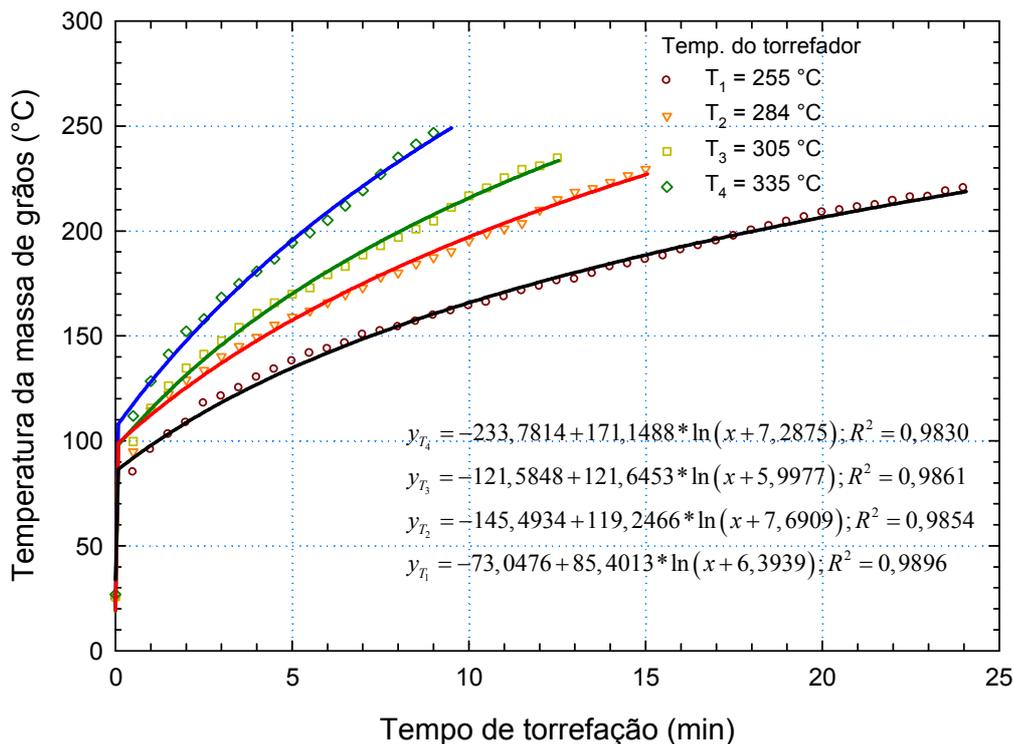


Figura 5 – Aquecimento da massa de grãos do café para quatro temperaturas do cilindro para se obter a torrefação média clara.

As taxas de aquecimento dentro do grão (intragranular) foram estudadas por Hernández et al. (2007), os quais determinaram que no início da torrefação havia gradiente de temperatura dentro do grão, que é significativo em menos de 2,5 min para ar quente entre 190 e 300°C.

Durante as torras, percebeu-se que o agradável odor, a fumaça e o estouro aconteceu quando a massa dos grãos atingiu aproximadamente 200°C. No entanto, a temperatura sugerida na literatura é a de 190°C para começar as reações exotérmicas (BAGGENSTOSS, 2008; ILLY e VIANI 1995). O mínimo valor obtido na massa de grãos foi de 218°C e o máximo não passou de 250°C no final do processo.

Depois de estabilizada a temperatura do torrefador, essa se manteve estável. A etapa seguinte é a de aquecimento constante por causa da evaporação da água dos grãos e da diminuição do gradiente térmico no interior do grão. A massa total torna-se principalmente matéria seca e água de

constituição, com predominância da matéria seca; portanto, aquecida numa taxa constante até iniciar o processo exotérmico (FRANÇA et al., 2005).

Há pouca informação sobre o torrefador utilizado. Baggenstoss (2008) simulou o perfil da temperatura da massa dos grãos e o do interior desses grãos em um torrefador de leito fluidizado. Segundo esse autor, esses perfis foram diferentes no início das torras, mas depois de 3,3 min ficaram com diferenças mínimas, podendo ser considerados semelhantes. Após 10 min, praticamente foram iguais com tempos de torrefação de aproximadamente 15 min.

3.3. Resfriamento dos grãos

Para interromper o processo de torrefação dos grãos de café, foi necessário o resfriamento imediato com ar à temperatura ambiente. O resfriamento foi em razão do intercâmbio de calor por convecção dos grãos ao ar. Determinou-se que a relação entre a temperatura dos grãos e o tempo foi representada satisfatoriamente por um modelo exponencial com R^2 de 0,9803.

Observou-se que a diminuição térmica na massa de grãos de café torrado pode ser explicada segundo a Lei de Resfriamento de Newton quando se usa ar à temperatura ambiente. A constante de tempo foi determinada por regressão em 42,7 s. Determinou-se que para o torrefador utilizado o equilíbrio térmico entre o fluido e a massa de grãos sucedeu rapidamente e em menos que 4 min.

Quando foram retirados os grãos de café do torrefador, esses foram resfriados com ar à temperatura ambiente numa relação menor que 10 vezes a temperatura dos grãos.

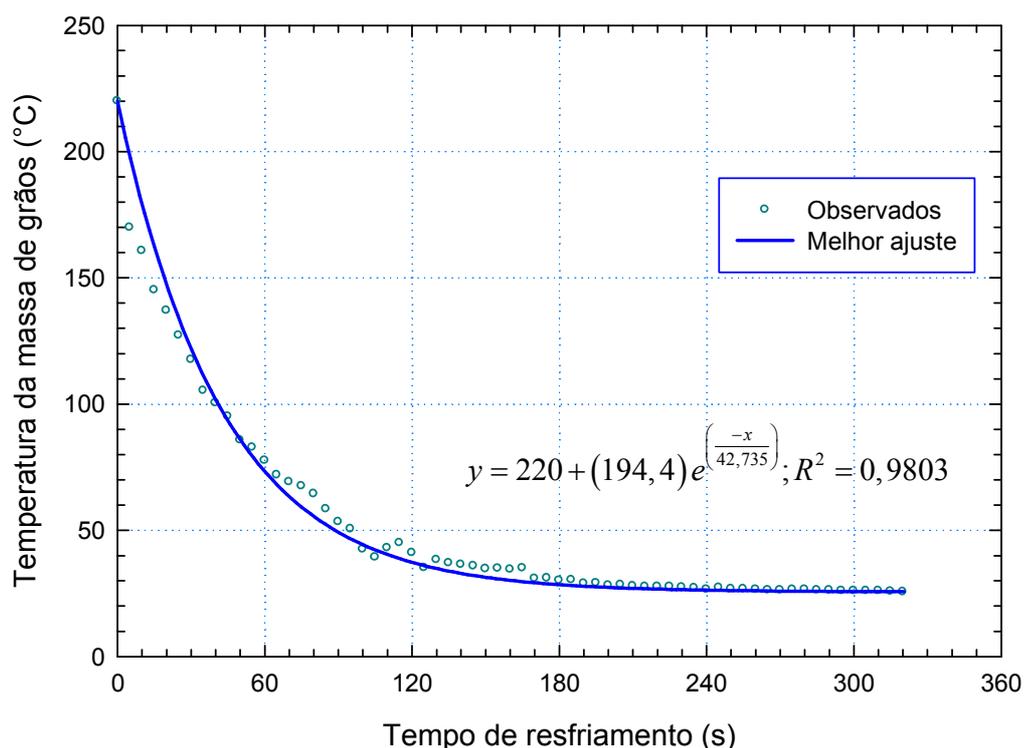


Figura 6 – Resfriamento da massa de grãos de café depois do processo de torrefação com ar à temperatura ambiente 25,6 °C.

3.4. Tempo de torrefação

O tempo máximo e o mínimo de torrefação neste estudo foram de 33 e 9 min associados às temperaturas de 255 e 335°C, respectivamente. Com base na Tabela 1, pode-se observar a média do tempo decorrido para que as amostras atingissem a cor característica, segundo o nível de torrefação dos grãos. Verificou-se o efeito direto da temperatura do torrefador com o tempo de torrefação, detectando que o tempo diminuiu significativamente quando se aumentou a temperatura. Além disso, o aumento da temperatura no torrefador diminuiu a diferença nos intervalos do tempo de 8 para 1,4 min, nos índices das cores do café desde médio claro até escuro.

Tabela 1 - Tempo necessário (min) para os grãos de café atingirem torrefação média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E)¹

Torrefação	Temperatura do torrefador			
	255°C	284°C	305°C	335°C
MC	23,67 d	15,67 d	12,47 c	9,33 c
M	25,00 c	16,92 c	14,00 b	9,97 b
ME	28,67 b	18,43 b	14,60 b	10,17 ab
E	31,67 a	19,94 a	15,56 a	10,73 a
² Δt	8,0	4,3	3,1	1,4

¹ As médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

² Diferença entre o tempo do dado inicial e o do final da coluna.

Com base na Tabela 1, pode-se verificar que há diferença significativa entre os tempos para se obterem os quatro níveis da cor nos grãos; para alta temperatura do torrefador é preciso mais de um minuto entre amostras de diferente nível de torrefação.

Na temperatura alta como a de 335°C, foi necessário menos que 1,5 min para se obterem os quatro índices de torrefação dos grãos de café, em razão de ter sido muito instável o processo de torrefação, que aumentava rapidamente a temperatura dos grãos, conseqüentemente passando de um tipo de torra para outro com rapidez.

Observa-se pela Figura 6 que a relação entre o tempo torrefação e a temperatura do torrefador é representada adequadamente por equações potenciais, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,992. Cada linha representa um índice de torrefação nos grãos.

Os resultados apresentados, na Figura 2, atendem às necessidades dos torrefadores, pois integram os dois principais parâmetros de torrefação, o tempo e a temperatura do torrefador. Os ajustes potenciais servem para prever o tempo de torrefação, variando as temperaturas do torrefador para um grau de torrefação definido. Esses resultados estão de acordo com Nagaraju et al. (1995), os quais estabeleceram que a equação não é linear.

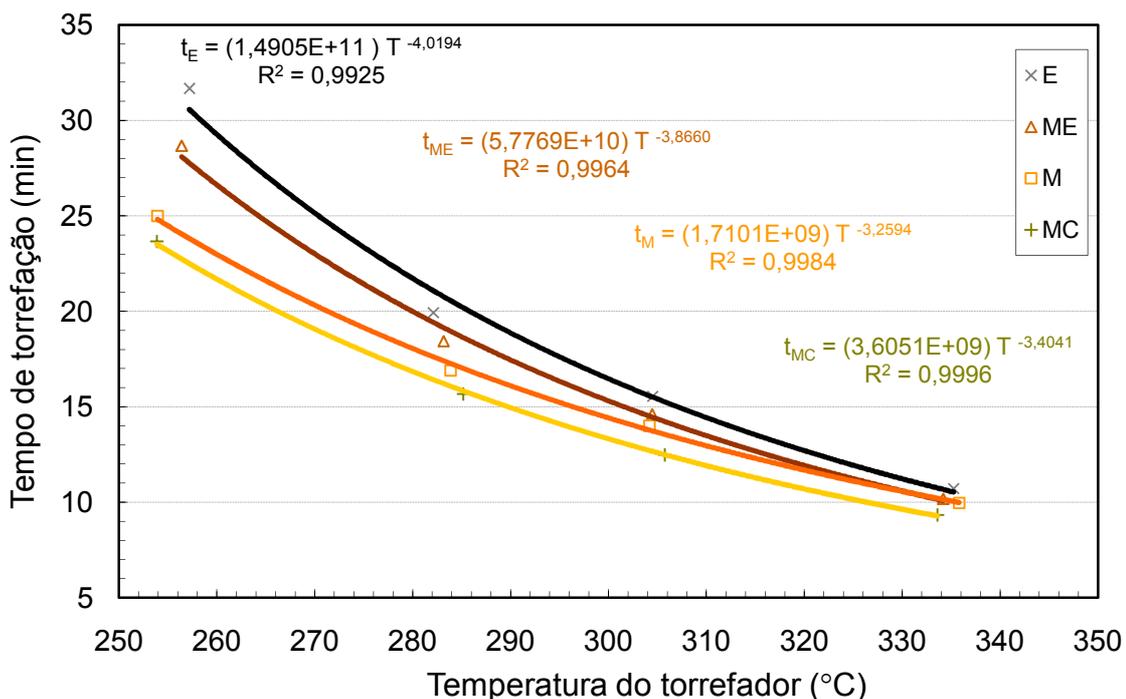


Figura 6 - Linhas do mesmo nível de torrefação dos grãos de café, segundo a cor média clara (+), média (□), moderadamente escura (△) e escura (×) no final da torrefação.

Na Figura 6, que atende às necessidades dos torrefadores, estão integrados os dois principais parâmetros de torrefação que são o tempo e a temperatura do torrefador, só precisando definir o grau de torrefação.

O tempo e a temperatura de torrefação estão associados à quantidade de amostra usada; portanto, as equações podem ser ajustadas incluindo o fator de massa variável. Nagaraju et al. (1995) demonstraram que em amostras de 1,0 e 0,75 kg de grãos a duração da torra foi menor para as de 0,75 kg na mesma temperatura e cor.

As amostras de café torradas em temperaturas mais elevadas precisaram de maior cuidado pela dificuldade na observação da diferenciação da cor, referente aos quatro níveis de torrefação, à intensidade da fumaça na saída do torrefador, ao rápido estouro dos grãos e ao forte aroma liberado pelas reações químicas.

Os modelos obtidos, segundo os parâmetros da torrefação avaliados, foram feitos para um mesmo tipo de grão e de qualidade tipo exportação. Os

resultados alcançados estão de acordo com os encontrados por Hernández et al. (2007), em relação ao controle da temperatura e ao tempo da torra; no entanto, em nível industrial é difícil porque se processam diversas qualidades do café cru.

Em relação ao tempo, resultados semelhantes foram observados em outros estudos com torrefadores elétricos com tempos de 10 a 25 min e temperaturas de 200 e 230°C, no início da torra, de acordo com Moura et al. (2007); e com 200 até 240°C, com tempos 0 a 70 min, com amostras de 2 kg a 10 rpm, segundo Mwithiga e Jindal (2003).

Uma vez conhecidos os parâmetros térmicos do torrefador, é possível usar o equipamento para se avaliarem os efeitos dos diferentes tipos de café como fizeram Alessandrini et al. (2008), os quais avaliaram diferenças nas qualidades de torra, no tipo de café e nas misturas, em nível comercial.

3.5. Perda de massa total

A cor é um dos parâmetros principais para indicar o nível de torra do café; a avaliação desse é, geralmente, feita por um operador com ampla experiência. No entanto, há necessidade de esse parâmetro ser complementado com os valores da perda de massa total para se ter certeza de que a qualidade desejada foi atingida, bem como o planejamento da produção comercial.

Na Tabela 2, são observadas as médias da perda de massa das amostras em razão das temperaturas de torrefação. Para cada temperatura, os grãos podem ser torrados até atingirem a cor desejada; as perdas de massa são semelhantes para cada tipo de cor.

Na Figura 7, estão demonstradas a perda da massa total e a relação com a cor da Tabela Agron. O desvio-padrão para as torrefações média clara e média foi menor que 0,4%; a moderadamente escura foi de 0,2%; e a escura, 0,9%. A maior variação na massa final foi entre amostras de torrefação escura.

Tabela 2 – Médias da perda de massa total (g) dos grãos de café às torrefações média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E)¹

Torrefação	Temperatura do torrefador				Média
	255°C	284°C	305°C	335°C	
MC	15,97 d	15,85 d	15,58 d	16,01 d	15,85
M	17,23 c	16,67 c	17,03 c	17,16 c	17,02
ME	18,85 b	18,78 b	18,77 b	18,57 b	18,74
E	21,26 a	20,48 a	20,42 a	20,15 a	20,58

¹ As médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

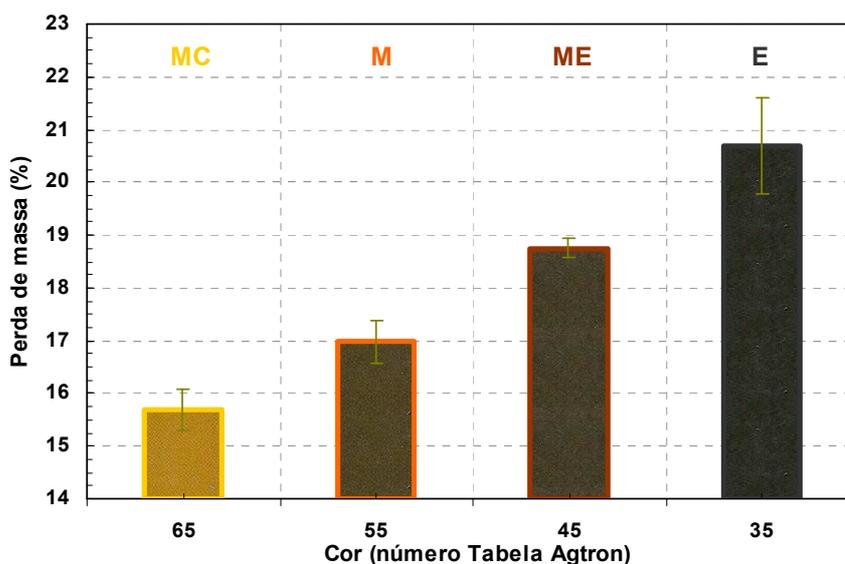


Figura 7 - Perda de massa total das amostras de café às torrefações média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E).

A variação entre as médias da perda da massa dos grãos para a torra escura pode ser explicada pelas dificuldades associadas ao aquecimento contínuo da massa de grãos durante a torra, temperatura final da massa de grãos atingida e intensidade de reações quando se chegava a essa qualidade. A mínima temperatura registrada para a massa de grãos escura foi de 238°C, que é considerada alta em relação às verificadas. Schwartzberg (citado por

HERNÁNDEZ et al., 2007) trabalhou com essa temperatura no grão como critério para finalizar a torrefação.

Durante a torrefação, observou-se que o operador, independentemente do tipo de equipamento, tem o critério por comparação pelo contraste da cor e por conhecimento próprio do ponto de torra para extrair os grãos no momento certo. Hernández (2002) destacou a grande dificuldade para medir adequadamente as características dos grãos em razão da movimentação da massa durante a torrefação e mencionou a importância que desempenha um operador experiente na indústria do café, pois esse interpreta as características físicas mensuráveis como a temperatura e o tempo de torrefação, assim como as organolépticas do produto.

Na Figura 8, estão apresentadas as equações lineares com valores de r^2 maiores que 0,953, que representaram adequadamente a relação entre a perda de massa e o tempo de torrefação; as inclinações das linhas foram as taxas de perda de massa nos grãos para cada temperatura do torrefador. Obtiveram-se taxas de perda de massa em percentagem por minuto ($\% \text{ min}^{-1}$) de 0,62; 1,12; 1,59 e 3,04 associadas a 255, 284, 305 e 335°C, respectivamente, no torrefador.

Ao final do processo de torrefação, os grãos perderam massa. A rapidez de perda de massa é a mesma (taxa constante) e depende da temperatura utilizada no torrefador, o que foi observado por outros pesquisadores (GEIGER, 2004; ALESSANDRINI et al., 2008). Hernández et al. (2007) determinaram que, depois de 10 min, a percentagem de perda em massa era controlada pela temperatura do torrefador, o que corrobora o presente experimento.

Ao final do processo de torrefação, a média geral do teor de água dos grãos foi de $0,0113 \text{ kg}_a \text{ kg}_{\text{ms}}^{-1}$, o que coincide com os valores determinados com outros tipos de torrefadores e quantidades de produto (ALESSANDRINI et al., 2008; GEIGER, 2004).

O teor de água permite quantificar a perda dessa e a matéria seca durante o processo. Nesse caso, a amostra tinha no início 350 g de café cru; no entanto, para atingir uma torra escura precisou diminuir a massa até 280 g, cuja massa final foi distribuída em 3,1 g de água e 276,9 de matéria seca; isto é, 98,9% da massa final é matéria seca.

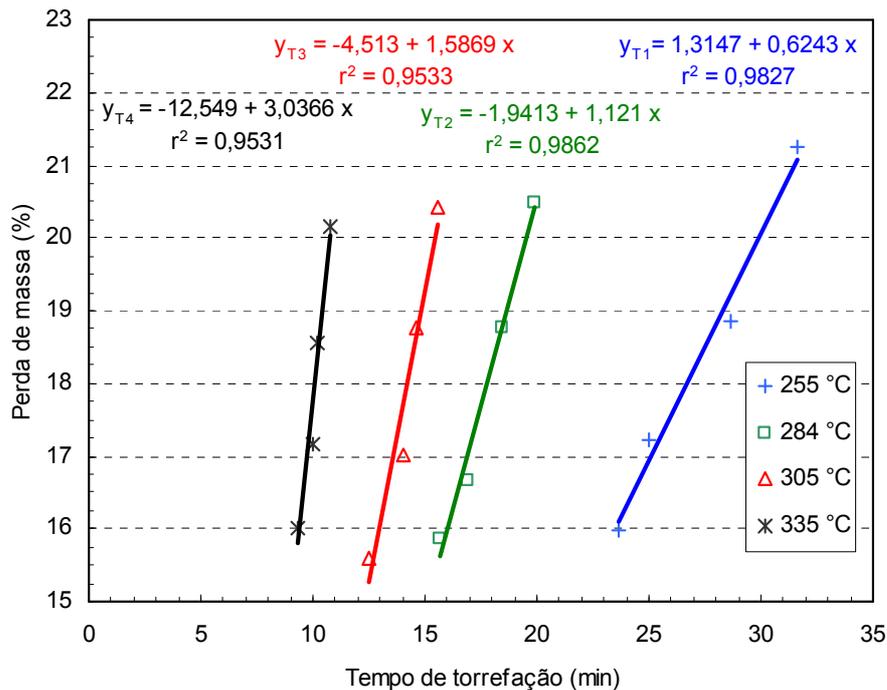


Figura 8 - Rapidez da perda de massa das amostras de café em quatro temperaturas para torrefação.

Em relação ao torrefador tradicional, há pouca informação específica, o que precisa diferenciar as condições em que foram feitas as torras. Os efeitos da temperatura do torrefador nas taxas mássicas foram denominados como de alta temperatura/curta duração e baixa temperatura/longa duração, quando foram usados ar a 260 e 228°C em 2,8 e 12 min, respectivamente (GEIGER, 2004). As perdas de massa correspondentes foram de 15,4 e 15,9% para amostras de 100 g em torrefador de leito fluidizado.

Os valores de perda de massa total no produto foram de 16, 17, 19 e 21% em relação aos de perda de massa seca foram 5,4; 6,5; 8,8; e 11,0%, respectivamente. Os valores obtidos estão dentro da classificação internacional de café como *medium* (5 a 8%) e *dark* (8 a 12%), segundo Illy e Viani (1995).

3.6. Temperatura final da massa dos grãos

A determinação da temperatura final do café foi feita na massa de grãos ao final da torra, no instante em que se precedeu a retirada do material do cilindro do torrefador.

Na Tabela 3, verifica-se que um aumento de temperatura no torrefador causou aumento de temperatura na massa de grãos para se obter a mesma cor entre amostras. As temperaturas na massa de grãos evidenciaram que esses foram aquecidos constantemente quando ficaram mais tempo na torrefação.

Tabela 3 - Temperatura (°C) da massa dos grãos de café torrados para atingir torrefações média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E)¹

Índice de torrefação	Temperatura do torrefador			
	255°C	284°C	305°C	335°C
MC	218,67 c	228,00 d	233,00 d	245,33 c
M	222,33 c	237,67 c	243,33 c	251,67 b
ME	234,33 b	244,33 b	249,67 b	255,33 b
E	239,67 a	249,00 a	255,00 a	259,33 a

¹ As médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

As temperaturas médias finais não superaram os 260°C para a massa de grãos, o que está no limite da torrefação e das reações exotérmicas. Acima dessa temperatura, os grãos começam a oxidarem-se (COSTE, 1968 citado por HERNÁNDEZ et al., 2008); isto é, para as torras escura é possível abaixar a temperatura do torrefador a fim de atingir uma cor desejada e evitar a queima dos grãos.

A máxima temperatura média dos grãos foi de 259,3°C com máxima no torrefador de 335°C e na torra escura. Os resultados deste trabalho estão de acordo com as observações feitas por Mwithiga e Jindal (2003), os quais

mediram a temperatura dos grãos em movimentação e observaram que quando utilizaram altas temperaturas na superfície do cilindro, aumentavam-se, consideravelmente, a temperatura da massa de grãos no final da torra e o mesmo índice para a cor nas amostras.

Cada vez que se aumentaram as temperaturas do torrefador, houve diferença de 4°C, aproximadamente, entre as amostras, com torrefações moderadamente escura e escura; os grãos nesses índices de qualidade mantiveram as taxas de aquecimento semelhantes.

Na Figura 9, pode-se observar a relação linear entre a temperatura do torrefador e a temperatura da massa de grãos. Essas equações representam adequadamente a relação térmica com coeficientes de determinação r^2 acima de 0,951.

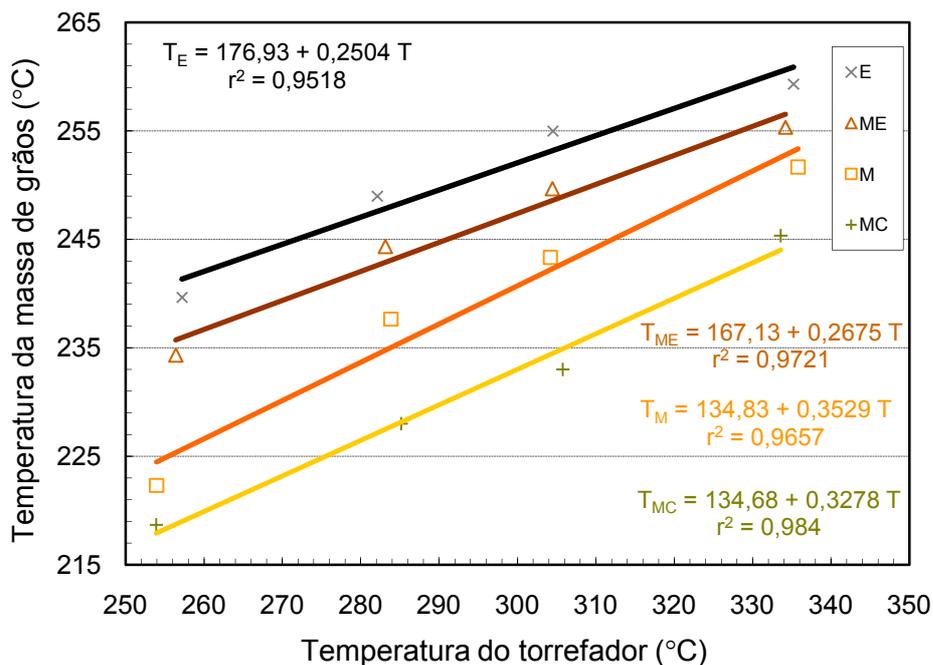


Figura 9 - Relação entre a temperatura da massa dos grãos e do torrefador quando o café atingir o grau de torrefação *médio claro* (+), *médio* (□), *moderadamente escura* (Δ) e *escura* (x).

Quando se estabilizou o torrefador a 284 e 305°C, houve diferença de pelo menos 20°C na temperatura da massa de grãos entre amostras com cor média clara e escura.

As amostras com cor escura foram as que aqueceram mais, por ficarem mais tempo no torrefador; ao aumentar a temperatura do torrefador, a massa de grãos elevou-se proporcionalmente.

Neste trabalho, a medição da temperatura foi feita na superfície da massa dos grãos, adequando-se de acordo com Hernández et al. (2007). Esses autores demonstraram que no início da torrefação a temperatura medida no interior do grão é diferente a da superfície. Ao final da torrefação, a diferença entre essas é nula, o que implica que o gradiente de temperatura no interior do grão desaparece ao final das torras, com ar quente em temperaturas entre 190 e 300°C.

A respeito das diferenças de temperatura tanto externa quanto interna dos grãos, para perdas de massa acima de 14%, Baggenstoss et al. (2008) compararam café com teores de água inicial de 5,10; 10,04; e 14,70% b.u. com uma mesma temperatura de torrefação, e não houve diferenças ao final. No entanto, houve efeito na temperatura no início da torrefação. O gradiente de temperatura no interior e na superfície do grão desapareceu ao final da torrefação, ao se colocarem amostras com diferentes teores de água. As perdas de massas avaliadas neste trabalho foram acima de 15%, e os grãos não apresentaram diferenças de temperatura pelo efeito do teor de água.

Diante dessa análise, pode-se dizer que as temperaturas medidas da massa dos grãos no final da torrefação equivaleram à temperatura dos grãos.

Na Figura 10, está evidenciado o aquecimento dos grãos no tempo em que esses foram torrados. Observou-se a rapidez em que foram aquecidos e que dependeu da temperatura do torrefador.

A linha isotérmica, na Figura 7, está relacionada ao torrefador; observa-se o tempo necessário em que amostras foram mudando de cor, desde índices de torra claros até mais escuros.

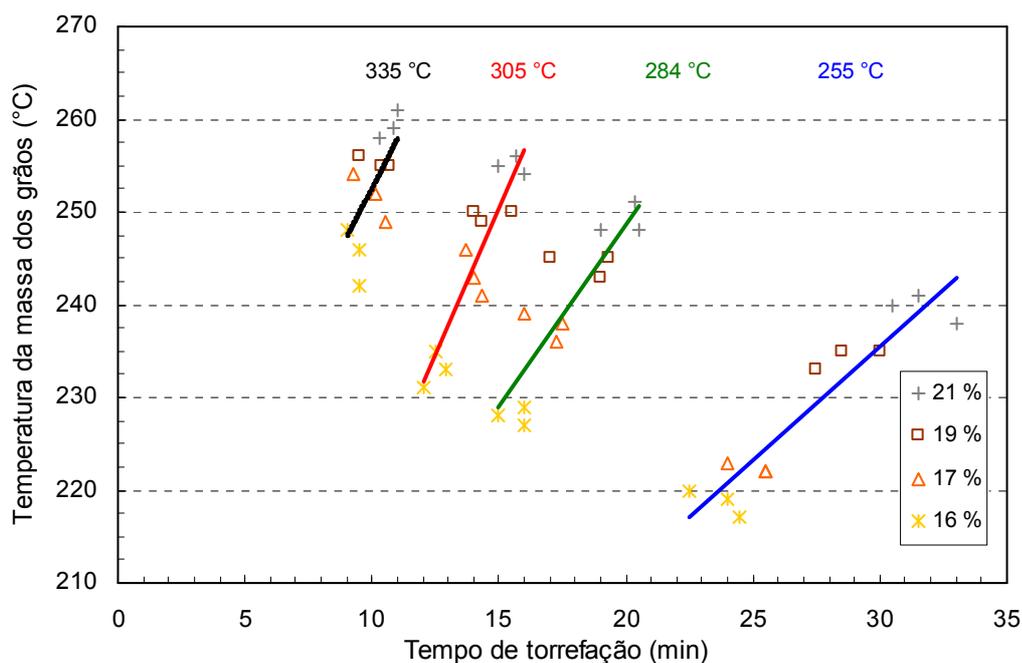


Figura 10 - Condições finais de tempo e temperatura da massa de grãos de café torrados para se obterem as qualidades média clara (+), média (□), moderadamente escura (Δ) e escura (*) no torrefador cilíndrico rotativo em amostras de 350 g.

Tabela 4 - Modelo das isotermas de café para prever a temperatura da massa de grãos, de acordo com o tempo e a temperatura do torrefador

Temperatura	Modelo	
255°C	$T = 161,66 + 2,462 t$	$r^2 = 0,8712$
284°C	$T = 169,8 + 3,943 t$	$r^2 = 0,7622$
305°C	$T = 157,03 + 6,2317 t$	$r^2 = 0,8194$
335°C	$T = 204,74 e^{0,021 t}$	$R^2 = 0,3919$

em que T é temperatura dos grãos (°C); e t , tempo de torrefação (min).

Quando se abriu a válvula do gás, o torrefador aqueceu. Foi observado que diminuíram os tempos de torrefação, bem como os dos intervalos, para se obterem amostras desde torras claras até escuras. As taxas de aquecimento dos grãos foram aproximadamente de 2,46; 3,94; e 6,23°C min⁻¹ para 255, 284 e 305°C, respectivamente. Na Tabela 4, observa-se a falta de ajuste (R² de 0,3919) para 335°C; já na Figura 7, uma diferença aproximada de 14°C em 1,4 min, o que daria uma taxa de 10°C min⁻¹.

3.7. Relação dos parâmetros da torrefação

Na Figura 11, é observada a linha descontínua de isotermas em relação às temperaturas de operação do torrefador, para amostras com o mesmo índice de qualidade, que pode ser denominado de *isoqualidade* para facilitar a análise da temperatura da massa de grãos.

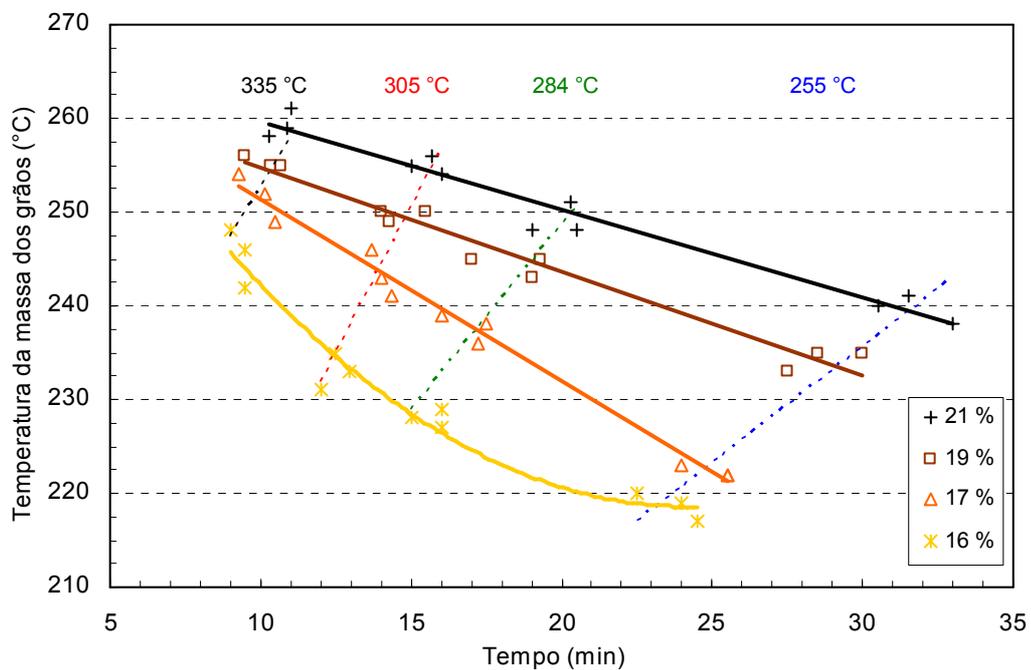


Figura 11 - Rede dos parâmetros de temperaturas, qualidade da massa dos grãos de café e tempo para um torrefador de cilindro rotativo para amostras de 350 g e qualidades média clara (+), média (□), moderadamente escura (Δ) e escura (*).

As linhas são equações empíricas que representam as condições dos grãos para o mesmo nível de torrefação, associado à temperatura final da massa de grãos e ao tempo de torrefação.

O grau de torrefação dos grãos é escolhido inicialmente. Portanto, a primeira decisão é a escolha de uma linha de isoqualidade; posteriormente, o torrefador é estabilizado numa temperatura de torrefação, cortando-se essa linha. Nesse ponto, aproximam-se graficamente o tempo e a temperatura dos grãos, quando esses atingem o grau de torra escolhido.

Há uma rede relacionando quatro características principais da torrefação, formada por isotermas e isoqualidades. As relações não são lineares quando se fixa uma diferença de aproximadamente 20°C entre as temperaturas usadas no torrefador.

Para se obter melhor aproximação, precisam-se avaliar ainda outras temperaturas para aumentar o nível de confiança da rede de parâmetros e a área dessa a respeito das posições dos índices de qualidade mais claros do café.

Uma análise desse tipo permitiria comparar diferentes qualidades de cafés crus, com a finalidade de conhecer os parâmetros necessários para serem adequados à torrefação, segundo a qualidade inicial do produto. Com um objetivo semelhante, Alessandrini et al. (2008) fixaram os parâmetros do tempo e da temperatura final da massa de grãos para comparar diferentes tipos de café em amostras de 250 g, atingindo 217°C em 6,5 min para se obterem perdas de massa de 17,4 até 20,1%, para os grãos de café arábicos em torrefador de leito fluidizado.

Pela Tabela 5, observam-se os modelos lineares que relacionam a temperatura da massa dos grãos com o tempo necessário para atingir a cor específica. No entanto, é necessário saber a temperatura do torrefador para se estabelecer um modelo matemático mais completo. O gráfico da Figura 8 permite aproximar as respostas para o torrefador usado neste trabalho.

Segundo os dados obtidos, medindo-se a temperatura da massa de grãos e a do cilindro, foi possível estabelecer equações empíricas para prever o tempo necessário a fim de que uma massa de grãos de café torrado atinja índice de qualidade de torra específica.

Para se obter melhor aproximação, é preciso avaliarem diferentes temperaturas às usadas neste experimento, para aumentar o nível de confiança da rede e a área dessa até a posição das qualidades mais claras do café. Acima da torra escura, podem-se ultrapassar os limites recomendados para a torrefação, em relação ao tempo e à temperatura.

Tabela 5 - Modelo da isoqualidade de café para predizer a temperatura da massa de grãos, de acordo com a duração da torrefação para o torrador a 255, 284, 305 e 335°C

Qualidade	Modelo	
Média clara	$T = 287,33 - 5,6886 t + 0,1177 t^2$	$R^2 = 0,9563$
Média	$T = 270,76 - 1,9434 t$	$r^2 = 0,9875$
Moderadamente escura	$T = 265,86 - 1,11 t$	$r^2 = 0,9667$
Escura	$T = 269,06 - 0,9403 t$	$r^2 = 0,9597$

em que T é temperatura dos grãos (°C); e t , tempo de torrefação (min).

Para a maioria dos laboratórios, onde se encontram torrefadores rotativos, furados, e que utilizam gás, os resultados deste trabalho tornam-se úteis ao preparo de amostras para a avaliação sensorial da qualidade do café produzido na região.

A massa do café é uma das variáveis mais importantes na torrefação e, ao mesmo tempo, difícil de medir. Ainda não foi desenvolvido um torrefador com sensor de massa em nível comercial; entretanto, em nível experimental já existe um torrefador em leito fluidizado, desenvolvido por Hernández et al. (2007).

A complexidade dos parâmetros térmico-temporais pode aumentar quando se incluem os atributos físicos da cor, da perda de massa e, principalmente, da qualidade do café cru. Os países compradores de café têm mais experiência que os países produtores, em relação aos parâmetros da

torrefação e ao desenvolvimento de equipamentos torrefadores. Estudos como esta pesquisa visualizam as características desejadas nos grãos e as mínimas no torrefador.

Normalmente, os torrefadores, em nível industrial, têm sensores de temperatura. Entretanto, esses precisariam de outros sensores, que, organizados, praticamente seriam um sensor térmico, para massa dos grãos; um sensor da cor, para superfície dos grãos; e um sensor da massa, para equipamentos mais sofisticados.

4. CONCLUSÕES

Não é fácil determinar o momento exato para efetuar a extração do produto do torrefador em razão da complexidade do processo e do valor do produto. É preciso experiência em torrefação para se estabelecerem os diferentes níveis de torrefação, segundo a semelhança ou contraste da cor na superfície dos grãos.

Determinou-se que a massa dos grãos do café estudado segue padrão de aquecimento durante a torrefação, que depende diretamente da temperatura do torrefador.

Em cada nível de torrefação dos grãos, o tempo foi estimado adequadamente pela relação exponencial com a temperatura do torrefador; a temperatura da massa dos grãos de café aumentou linearmente com o aumento da temperatura do torrefador.

A perda de massa total no processo de torrefação foi acrescentada com o aumento da temperatura do torrefador. A temperatura do torrefador tem efeito diretamente proporcional à taxa da perda de massa no final da torrefação dos grãos. Ao aumentar a temperatura no torrefador a taxa de perda de massa no produto aumenta.

A perda de massa total dos grãos no final da torra está em relação direta aos índices de torrefações, segundo a cor. Determinou-se que o índice de torrefação, segundo a inspeção visual, tem alta correlação com a perda de massa total e com o consumo da massa seca.

Os parâmetros tradicionais de controle são a temperatura do torrefador e o tempo de torrefação. Nesta pesquisa, estabeleceu-se um sistema de

equações empíricas para integrar as variáveis com outras características importantes, analisadas de maneira independente como o índice de torrefação, a perda de massa total e a temperatura da massa dos grãos.

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.

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

BAGGENSTOSS, J.; POISSON, L.; KAEGI, R.; PERREN, R.; ESCHER, F. Roasting and aroma formation: effect of initial moisture content and steam treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, p. 5847-5851, 2008.

BAGGENSTOSS, J.; POISSON, L.; LUETHI, R.; PERREN, R.; ESCHER, F. Influence of water quench cooling on degassing and aroma stability of roasted coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, p. 6685-6691, 2007.

CLARKE, R.J.; MACRAE, R. **Coffee**. London: Elsevier Applied Science, 1989. v. 2, 321 p.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; GONELI, A.L.D. Mathematical modelling for representation of coffee berry volumetric shrinkage. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14, 2004. **Proceedings...** 2004. p. 742-747.

CONSÓRCIO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO CAFÉ – CBPDC. **Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café**. Brasília, 2004.

CORTEZ, J.G. **Efeito de espécies e cultivares e do processamento agrícola e industrial nas características da bebida do café**. 2001. 71 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

DEBOÇÃ, L.P.; SANTOS, J.A.; REZENDE, A.M. Mercado de café torrado e moído: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. especial, n. 8, p. 54-58, 2004.

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.

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.

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, 2002a.

FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; CORRÊA, P.C. Estudo da adequação de modelos semi-empíricos para descrever a variação do teor de umidade e voláteis durante o processo de torrefação de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. especial, n. 4, p. 26-31, 2002b.

FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; MENDONÇA, J.C.F.; SILVA, X.A. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, v. 90, p. 89-94, 2005.

GEIGER, R. **Development of coffee bean structure during roasting: investigations on resistance and driving forces**. 2004. Tese (Doutorado) – Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Zurique, Suíça.

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.

HERNÁNDEZ, J.A.; HEYD, B.; TRYSTRAM, G. On-line assessment of brightness and surface kinetics during coffee roasting, **Journal of Food Engineering**, v. 87, p. 314-322, 2008.

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

MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 373-386, 2004.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. Physical changes during coffee roasting in rotary conduction-type heating units. **Journal of Food Process Engineering**, v. 26, p. 543-548, 2003.

NAGARAJU, V.D.; MURTHY, C.T.; RAMALAKSHMI, K.; RAO, P.N.S. Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. **Journal of Food Engineering**, v. 31, n. 2, p. 263-270, 1997.

NICOLI, M.; ANESE, M.; MANZOCCO, L.; LERICI, C.R. Antioxidant properties of coffee brews in relation to the roasting degree. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 30, p. 292-297, 1997.

PITTIA, P.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C.R. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

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

SCHMIDT; C.; MIGLIORANZA, E.; PRUDÊNCIO, S. Interação da torra e moagem do café na preferência do consumidor do oeste paranaense. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1111-1117, jul. 2008.

SILVA, G.V. **Degustação de café torrado e moído**: mapeamento do processo de torra. Brasília: MAPA, 2011. (Apostila do Curso de Qualificação de Classificadores de Café).

SIVETZ, M.; DESROSIER, N.W. **Coffee technology**. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, 1979. 716 p.

CAPÍTULO 2

AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO CAFÉ EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TORREFAÇÃO

RESUMO: Durante os processos que englobam a torrefação de café, a última etapa é caracterizada por mudanças químicas e físicas, como a mudança na cor e expansão dos grãos, alterando todas as propriedades relacionadas à massa e ao volume. O objetivo deste trabalho foi de estudar a variação das características físicas dos grãos nas diferentes condições de torrefação. O volume dos grãos foi medido pelo volume de deslocamento de óleo vegetal, produzido pelo grão, em picnômetro Hubbard de 25 mL. A massa específica aparente foi determinada no recipiente volume fixo de 0,55061 L (*one-pint dry U.S.*). O aumento do volume aparente está relacionado com a temperatura do torrefador e a temperatura da massa dos grãos, e essa está relacionada com a rapidez da perda de matéria seca. O volume aparente aumentou em até 70% e o unitário em até 80% na máxima temperatura do torrefador, a 335°C, associada ao mínimo tempo de torrefação. Quanto ao grau de torrefação, quando se aumentou a torra média clara à escura, foi observada diminuição significativa da massa específica unitária de 697 a 512 kg m⁻³ e, na massa específica aparente, de 364 a 298 kg m⁻³. A diminuição das massas específicas foi associada ao aumento do volume dos grãos e à rapidez da diminuição da matéria seca no processo de torrefação. A porosidade dos grãos torrados foi determinada em 45%, o que praticamente não variou em três temperaturas de torrefação, à exceção da obtida a 335°C, que teve uma relação linear.

EVALUATION OF COFFEE PHYSICAL PROPERTIES UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF ROASTING

ABSTRACT: During the processes which include coffee roasting, the final stage is characterized by chemical and physical changes, such as the exchange of color and the expansion of the bean, changing all the properties related to mass and volume. The objective of this work was to study variation of the physical characteristics in green bean in different conditions of roasting. The volume of roasted bean was measured by displacement volume of vegetable oil produced by bean into Hubbard pycnometer type of 0,025 L. The bulk density was determined in the fixed volume of container 0.55061 L (one-pint U.S. dry). The increased of grains mass volume is associated to the roaster temperature and to the temperature of grains, and that one is associated to the rapid loss of dry matter. The grain mass volume increased by 70% and bean volume up 80% at the maximum. When the roasting degree increased of browning of medium-light to dark, there was a significant decrease in true density from 697 to 512 kg m⁻³ and bulk density from 364 to 298 kg m⁻³. The decrease in density was associated with an expansion volume of roasted bean and the speed of decrease of dry matter in the roasting process. The porosity of the roasted beans was determined in 45%, and practically did not varied for three roasting temperature, with the exception at 335°C that had a linear relationship.

1. INTRODUÇÃO

O café é considerado um dos mais importantes produtos agrícolas no Brasil e no mundo em razão do alto retorno econômico, proveniente da exportação, industrialização e do elevado número de empregos diretos e indiretos relacionados à agroindústria. O Brasil é o principal produtor mundial desse produto, com produção de 2,2 milhões de toneladas de grãos em 2007 (FOOD AGRICULTURAL ORGANIZATION – FAO, 2010). A espécie *Coffea arabica* L. representa 75% do total de café produzido no Brasil; o Estado de Minas Gerais tem a maior contribuição com 67,1% desse total (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB, 2010).

Segundo Cortez (2001), a qualidade do café depende das condições climáticas, dos cultivares e do processamento agrícola. Esse mesmo autor concluiu que o processamento industrial deve ser estabelecido de acordo com a finalidade a que se destina o produto como o preparo de café expresso ou a forma tradicional de preparo da infusão.

No processamento do café, a etapa mais importante é a torrefação. França et al. (2002), avaliando o teor de água no processo de torrefação, observaram que, aos 12 min de torra, o teor de água de duas variedades de café arábica ficaram semelhantes em aproximadamente 0,02 kg de água por quilogramas de matéria seca ($\text{kg}_a \text{kg}_{ms}^{-1}$). Nesses teores de água, a massa específica aparente diminui entre 320 e 288 kgm^{-3} (SIVETZ; DESROSIER, 1979), assim como a massa específica unitária diminui de 1.200 até 600 kg m^{-3} , para café arábica (DUTRA et al., 2001; PITTIA et al., 2001).

Os constituintes do café associados à matéria seca são os responsáveis pela transformação química do grão cru em café torrado, dando as características próprias da cor na caramelização dos açúcares, do sabor, da decomposição dos carboidratos na formação do aroma (ILLY; VIANI, 1995) e do aumento do tamanho (SIVETZ, 1963; FRANÇA et al., 2002).

A última etapa é caracterizada pela expansão dos grãos, cujo volume duplica (SIVETZ; DESROSIER, 1979). O aumento de volume do café, durante a torra, pode ser quantificado, aproximando o grão à metade de um elipsoide e pelas medidas de seus três principais eixos (DUTRA et al., 2001). Há poucos

relatos na literatura especializada acerca de medições volumétricas diretas do grão, uma vez que a porosidade interna influencia a baixa massa específica, dificultando essa análise. Durante os processos que englobam a torrefação, o estudo das consequências (alterações no teor de água, cor e expansão dos grãos) torna-se necessário e a modelagem matemática é importante análise para predição desses dados. Essa avaliação pela modelagem fornece parâmetros para o estudo de transferência de calor e massa, durante o processo de secagem, para o dimensionamento de torrefadoras, além de possibilitar maior praticidade em relação à predição da qualidade do produto final.

Os modelos semiempíricos de secagem foram adaptados para ilustrar o comportamento do teor de água e de voláteis, durante a torrefação do café arábica. França et al. (2002) encontraram que o modelo de Page foi o mais adequado, apresentando adequada explicação dos dados experimentais. Esses mesmos autores concluíram que os parâmetros empíricos desse modelo não só estão relacionados como a difusividade efetiva dos grãos, mas também com a taxa de produção de água e voláteis, durante a fase de pirólise dos grãos. Corrêa et al. (2004), trabalhando com três tipos de frutos de café durante a secagem, concluíram que para cada tipo de café foi necessário um ajuste matemático particular para a representação da contração volumétrica dos grãos. Mayor e Sereno (2004) concluíram que os modelos aplicados em quatro produtos agrícolas podem dar grandes erros na determinação da contração volumétrica e recomendaram o uso de modelos empíricos, resultando em bons ajustes aos dados obtidos para as condições particulares.

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência da temperatura e do grau de torra nas características físicas dos grãos de café, medindo o volume aparente da massa de grãos, o volume unitário dos grãos, a massa específica aparente e a unitária e a porosidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Qualidade Sensorial e no de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas, pertencentes ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem

(CENTREINAR), do Departamento de Engenharia Agrícola, localizado na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, Minas Gerais.

2.1. Matéria-prima

Foram utilizados grãos de café *Coffea arabica* L., var. Catuaí Vermelho, beneficiados com tamanho acima da peneira 17, com teor de água inicial de, aproximadamente, $0,1386 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$, provenientes de uma beneficiadora de café localizada em Viçosa, Minas Gerais.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e armazenadas em câmara fria a uma temperatura em torno de 18°C , a fim de se manterem as características iniciais do produto até a utilização desse. Antes das operações de torrefação, as amostras foram retiradas da câmara fria e deixadas expostas à temperatura ambiente, por aproximadamente 12 horas, visando atingir o equilíbrio térmico para minimizar as alterações relacionadas à temperatura.

2.2. Processo de torrefação

Foi utilizado um torrefador a gás de combustão direta, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com preaquecimento e capacidade de 350 g de café cru. A taxa de consumo do combustível foi constante para manter a temperatura estável no torrefador.

As temperaturas de torrefação foram verificadas na superfície interna do cilindro do torrefador.

2.3. Perda de massa

A perda de massa total foi acompanhada para cada amostra ao atingir o ponto de torra. Após retirar os grãos de café torrado quentes, esses foram resfriados com ar ambiente em menos de 4 min pelo ventilador do torrefador. O produto obtido foi pesado numa balança digital, com precisão de 0,01 g, para estabelecer a massa final do produto.

2.4. Teor de água

Os teores de água do produto foram determinados por meio da secagem das amostras em estufa, com circulação de ar a 105°C, até o peso manter-se constante, de acordo com o Método Físico-Químico para Análise de Alimentos em três repetições (INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL, 2004).

2.5. Determinação do volume dos grãos

O volume dos grãos foi medido pelo volume de deslocamento de óleo vegetal, produzido pelo grão em picnômetro, em 25 grãos para cada amostra (MOREIRA et al., 1985; MOSHENIN, 1986; PITTIA et al., 2001). O volume aparente da massa de grãos torrados foi determinado num cilindro de acrílico graduado com capacidade de 1 L (GONELI, 2008), com aproximação da leitura de 5 mL.

2.6. Expansão volumétrica

A expansão volumétrica unitária dos grãos de café foi determinada pela relação entre o volume dos grãos durante a torrefação e o seu volume inicial determinado pelo picnômetro (Equação 1).

$$\psi_u = \frac{V_g}{V_{g_0}} \quad (1)$$

em que ψ_u é o índice de expansão volumétrica unitária dos grãos (adimensional); V_g , volume de 25 grãos torrados (mL); e V_{g_0} , volume de 25 grãos crus (mL).

A expansão volumétrica aparente de uma massa de grãos foi medida pela relação entre o volume aparente dos grãos durante a torrefação e o volume inicial desses (Equação 2).

$$\psi_a = \frac{V_{ap}}{V_{ap_0}} \quad (2)$$

em que ψ_a é o índice de expansão volumétrica aparente dos grãos (adimensional); V_{ap} , volume aparente da massa de grãos num dado tempo (mm^3); e V_{ap0} , volume aparente inicial da massa de grãos (mm^3).

Na falta de modelos destinados à modelagem da expansão volumétrica de grãos torrados, serão comparados alguns modelos matemáticos frequentemente utilizados para a representação da contração volumétrica de produtos agrícolas em função da umidade do grão, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos matemáticos para a variação volumétrica aparente e a unitária de grãos

Referência do modelo	Modelo
Polinomial	$\psi = 1 + aU + bU^2$ (3)
Exponencial	$\psi = a e^{bU}$ (4)

Nota: ψ é o índice de expansão volumétrica dos grãos (adimensional); U_0 , teor de água inicial do grão (decimal $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$), U , teor de água dos grãos em dado tempo (decimal $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$); e a e b , parâmetros de ajuste dos modelos.

2.7. Massa específica unitária e aparente

A massa específica unitária de 25 grãos torrados foi determinada em triplicata ou 25°C pelo método de deslocamento de fluido em picnômetro Hubbard com junta esmerilada como na Figura 1. Segundo calibração prévia com água destilada (IAL, 2004), o volume foi de 23,5559; 25,3152; e 23,8829 mL, num ambiente a 25°C. O fluido utilizado foi o óleo vegetal de girassol.

A Equação 5 foi a empregada para obtenção dos valores de massa específica unitária.

$$\rho_u = \rho_o \left(\frac{m_g}{m_{od}} \right) \quad (5)$$

em que ρ_u é a massa específica unitária dos grãos de café (kg m^{-3}); ρ_o , massa específica unitária do óleo (kg m^{-3}); m_g , massa de 25 grãos de café (kg); e m_{od} , massa do óleo deslocado pelo efeito dos grãos (kg).

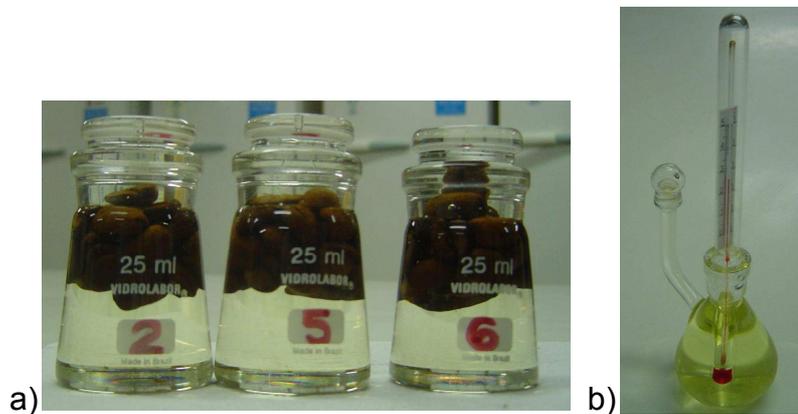


Figura 1 – Picnômetros usados: (a) tipo Hubbard e (b) para líquidos.

A massa específica aparente foi determinada após o término da torrefação e do resfriamento dos grãos com ar ambiente, pela relação da massa dos grãos acomodados em posição natural de repouso no recipiente com volume fixo de 0,55061 L (*One-pint dry U.S.*). Os cálculos foram realizados, de acordo com a Equação 6 e a Figura 2.

$$\rho_a = \frac{m_t}{V_t} \quad (6)$$

em que ρ_a é a massa específica aparente dos grãos de café (kg m^{-3}); m_t , massa total dos grãos (kg); e V_t , volume total do recipiente (m^3).



Figura 2 - Recipiente metálico de volume fixo 0,55061 L (*one-pint dry U.S.*).

2.8. Determinação da porosidade

A porosidade foi determinada indiretamente, a partir dos resultados da massa específica unitária e massa específica aparente, de acordo a Equação 3, proposta por Mohsenin (1986):

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_u} \quad (7)$$

em que ε é a porosidade intergranular (adimensional); ρ_a , massa específica aparente dos grãos (kg m^{-3}); e ρ_u , massa específica unitária dos grãos (kg m^{-3}).

2.9. Análise estatística

Foram realizados 16 tratamentos em um esquema de parcelas subdivididas em blocos, tendo nas parcelas quatro temperaturas (255, 284, 305 e 335°C) e nas subparcelas quatro qualidades (média clara, média, moderadamente escura e escura). Foram realizadas três repetições com diferença de uma semana entre si. Os dados foram submetidos à análise de variância de regressão e os modelos foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão e no coeficiente de determinação.

3. RESULTADOS

3.1. Teor de água

Na Tabela 1, observa-se que as temperaturas utilizadas no torrefador (255 a 335°C) diminuíram significativamente a umidade em todas as amostras, sendo a média geral de 0,0113 kg_a kg_{ms}⁻¹. O teor de água no início dos grãos crus foi de 0,1386 kg_a kg_{ms}⁻¹, resultando na perda de aproximadamente 92% da água total, mantendo 8% no final da torrefação. O teor de água que fica no grão é considerado água de constituição. Segundo Illy e Viani (1995), a liberação da água de constituição é acima de 100°C e o valor reportado por esses autores foi de 1,0% b.u. (0,0101 kg_a kg_{ms}⁻¹).

Tabela 1 - Teor de água nos grãos com diferentes condições de torrefação

Tratamento	Teor de água (% kg _{água} kg _{matéria seca} ⁻¹)			Média (%kg _a kg _{ms} ⁻¹)
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
255°C - MC	0,0113±0,0003	0,0122±0,0005	0,0109±0,0005	0,0114±0,0007
255°C - M	0,0096±0,0003	0,0093±0,0004	0,0078±0,0001	0,0089±0,0010
255°C - ME	0,0108±0,0004	0,0119±0,0003	0,0104±0,0003	0,0111±0,0008
255°C - E	0,0109±0,0009	0,0122±0,0001	0,0092±0,0005	0,0107±0,0015
284°C - MC	0,0117±0,0002	0,0099±0,0001	0,0135±0,0002	0,0117±0,0018
284°C - M	0,0108±0,0001	0,0110±0,0005	0,0101±0,0002	0,0106±0,0005
284°C - ME	0,0112±0,0003	0,0122±0,0001	0,0086±0,0002	0,0106±0,0018
284°C - E	0,0117±0,0015	0,0127±0,0003	0,0088±0,0003	0,0110±0,0020
305°C - MC	0,0112±0,0004	0,0138±0,0007	0,0085±0,0006	0,0111±0,0027
305°C - M	0,0108±0,0004	0,0127±0,0002	0,0123±0,0003	0,0119±0,0010
305°C - ME	0,0112±0,0002	0,0126±0,0002	0,0119±0,0002	0,0119±0,0007
305°C - E	0,0093±0,0004	0,0117±0,0003	0,0125±0,0003	0,0112±0,0017
335°C - MC	0,0161±0,0005	0,0116±0,0007	0,0200±0,0008	0,0159±0,0042
335°C - M	0,0141±0,0003	0,0095±0,0003	0,0106±0,0003	0,0114±0,0024
335°C - ME	0,0114±0,0003	0,0105±0,0002	0,0095±0,0004	0,0105±0,0009
335°C - E	0,0107±0,0003	0,0107±0,0000	0,0100±0,0005	0,0105±0,0004

Os teores de água determinados estão de acordo com as normas vigentes de comercialização de grãos torrados, que devem ser menos que 5% b.u. ou $0,0526 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$ (BRASIL, 2010).

O índice de torrefação escuro está associado ao maior tempo em que a amostra foi mantida no torrefador, o que não se observou nenhuma relação entre o teor de água e o nível da torrefação dos grãos, demonstrando que o processo de torrefação depois de 9 min não alterou significativamente o teor de água nos grãos de café torrados.

As temperaturas do torrefador acima de 255°C foram suficientes para evaporar a água das amostras durante a torrefação e não influenciou o índice de torrefação. Baggenstoss (2008) comparou quatro tipos de torrefações, dois em torrefador em leito fluidizado e dois em torrefador tradicional, concluindo que os teores de água dos dois tipos tradicionais foram similares, a partir de 67% do tempo total de torrefação.

O resfriamento dos grãos, depois de torrados, foi feito com ar à temperatura ambiente, em 3 min. O teor de água nos grãos depois da torrefação foi associado à parte da água de constituição desses, assim como evidenciado por causa da reabsorção dos grãos torrados e secos, quando foram expostos por muito tempo ao ar ambiente. Teores de água inferiores a 5% b.u. ($0,0526 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$) se equilibram com umidades relativas do ar menores a 20% (ILLY; VIANI, 1995); entretanto, não se encontrou referência sobre a rapidez de reabsorção de café torrado no resfriamento com ar.

Associa-se uma perda de massa total de 16% para uma amostra de café torrado média-clara. Dessa perda, 69,8% foi de água e o resto de matéria seca; os valores estão de acordo com Illy e Viani (1995), os quais encontraram a perda da massa total nos grãos depois da torrefação, que foi distribuída em 70% para água e 30% para dióxido de carbono (CO_2).

3.2. Análise da matéria seca

A matéria seca foi calculada a partir da massa total e do respectivo teor de água dos grãos. As linhas contínuas observadas na Figura 3 relacionam os valores de matéria seca, tempo e temperatura do torrefador. A massa seca está diretamente associada à qualidade de torra, pois quanto mais escura a cor

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

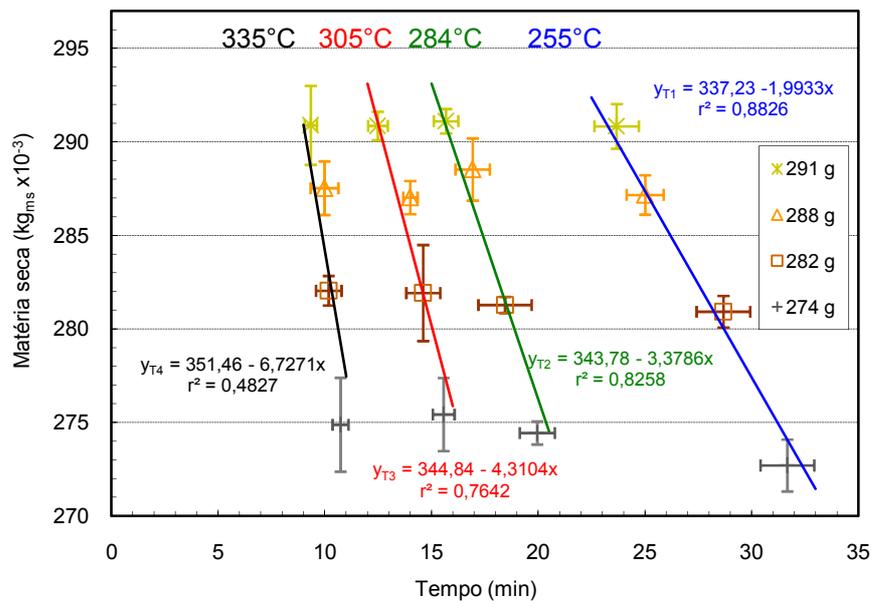


Figura 3 - Diminuição da massa seca final dos grãos de café, na obtenção de quatro qualidades de torrefação média clara (×), média (Δ), moderadamente escura (□) e escura (+).

Para cada linha contínua da Figura 3, observa-se uma inclinação diferente. A inclinação das linhas são taxas mássicas que relacionam a rapidez com que a massa seca diminui. Essas taxas foram calculadas em aproximadamente -2,0; -3,4; -4,3; e -6,7 g min⁻¹ para as temperaturas 255, 284, 305 e 335°C, respectivamente.

Em relação às perdas da matéria seca, Clarke e Macrae (1989) classificaram o café em diferentes torras: clara/light (1 a 5%), média/medium (5 a 8%), escura/dark (8 a 12%) e muito escura/very dark (maior de 12%). Segundo essa classificação, as perdas de massa seca determinadas neste trabalho foram 5,3; 6,6; 8,6; e 10,9%, ou seja, torrefações média e escura (medium e dark).

Na secagem de produtos agrícolas, a massa seca inicial e a final são as mesmas; entretanto, qualquer diminuição durante o manuseio dos produtos é considerada como perda de qualidade. Ao contrário da torrefação do café, a massa seca inicial diminui durante a torrefação e parte dessa massa é usada para modificar drasticamente a composição química dos grãos, que libera gás carbônico e compostos voláteis (PEREZ, 2008). Portanto, é necessário introduzir o termo razão de matéria seca (Y) que, matematicamente, é a divisão da massa seca (m_s) depois da torrefação entre a massa seca inicial (m_{s0}) do café cru (Equação 8).

$$Y = \frac{m_s}{m_{s0}} \quad (8)$$

A Equação 8 permite transformar os dados gravimétricos das amostras em proporções da matéria seca, possibilitando compará-los com outros estudos, independentemente da quantidade de massa analisada.

Na Figura 4, são observadas as linhas descontínuas em relação ao efeito térmico do torrefador sobre a rapidez de perda da razão de matéria seca, em que as taxas foram -0,022; -0,014; -0,011; e -0,006 $\text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_{\text{ms0}}^{-1} \text{min}^{-1}$, correspondendo a 335, 305, 284 e 255°C, respectivamente.

Observa-se, também, na Figura 4, que as linhas contínuas representam os grãos com a mesma qualidade (isoqualidade), notando regularidade na razão da matéria seca. As médias calculadas foram 0,946; 0,935; 0,916; e 0,893 $\text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_{\text{ms0}}^{-1}$, estando relacionadas com as perdas de massa total de 16, 17, 19 e 21%, respectivamente. Essas classificam-se em torrefações média clara, média, moderadamente escura e escura.

A razão da matéria seca dá ideia da proporção de massa seca que foi utilizada durante a torrefação de café, em relação ao início do processo ($1,0 \text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_{\text{ms0}}^{-1}$), sendo o valor desse parâmetro associado à qualidade do produto final obtido. Nesse sentido, para se obterem quatro níveis de torrefações de café bem diferenciados entre si pela cor, os valores determinados foram 0,946, 0,935, 0,916 e 0,893 $\text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_{\text{ms0}}^{-1}$, que foram associados às perdas de matéria seca de 5,4; 6,5; 8,4; e 10,7%, respectivamente.

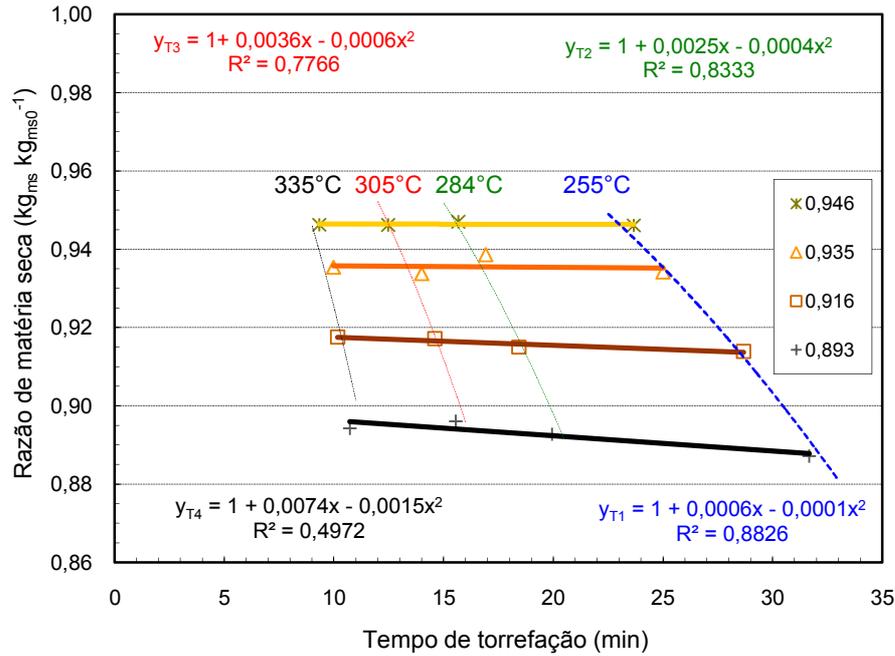


Figura 4 - Razão de matéria seca dos grãos de café, segundo a temperatura e o índice de torrefação.

3.3. Aumento do volume aparente dos grãos

O volume aparente dos grãos de café cru foi de 555 ± 5 mL; para os grãos torrados a medição se fez quando resfriou o produto. Na Tabela 2, é apresentada a temperatura do torrefador que influenciou a média do volume aparente dos grãos de 933,6; 898,4; 849,2; e 818,7 mL, associadas a 335, 305, 284 e 255°C, respectivamente.

Na Figura 5, as linhas contínuas das equações potenciais representam a relação entre o índice de expansão volumétrica aparente da massa de grãos e o tempo para se obter o mesmo índice de torrefação; as linhas descontínuas representam o efeito da temperatura do torrefador sobre o índice de torrefação dos grãos.

Tabela 2 - Volume aparente da massa de grãos de café torrados (mL)

$\Delta M/M$ (%)	Temperatura do torrefador			
	255°C	284°C	305°C	335°C
16	791,3 ± 16,0	823,0 ± 9,6	892,0 ± 13,9	924,3 ± 10,0
17	815,7 ± 2,5	845,7 ± 11,7	896,3 ± 13,3	932,1 ± 19,1
19	834,0 ± 21,7	869,0 ± 6,2	898,7 ± 8,5	939,7 ± 29,8
21	833,7 ± 13,2	859,0 ± 16,4	906,7 ± 24,5	938,3 ± 25,1

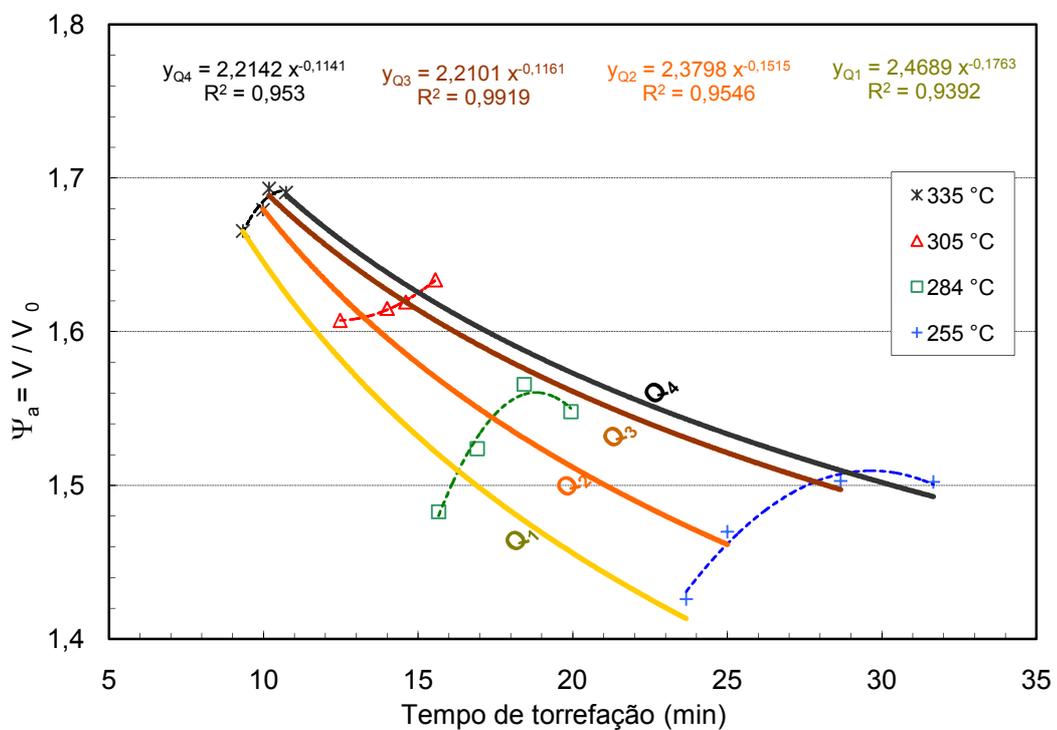


Figura 5 - Índice de expansão volumétrica aparente (Ψ_a) da massa dos grãos e o efeito do índice de torrefação do café (Q₁ médio claro, Q₂ médio, Q₃ moderadamente escuro e Q₄ escuro).

Pode-se observar, na Figura 5, que o tempo diminui significativamente enquanto a temperatura do torrefador aumenta. A torrefação mais rápida foi em 10 min a 335°C, com 1,68 no índice de expansão do volume aparente dos grãos. O menor desse índice foi de 1,42 em aproximadamente 24 min para 255°C. Os índices de expansão volumétrica aparente são semelhantes aos reportados por Illy e Viani (1995), que relacionaram o aumento do volume aparente em 40 e 60% (1,4 e 1,6), com a perda de massa de 16 e 18%, respectivamente; no entanto, a temperatura de torrefação não foi reportada.

Os grãos com o mesmo índice de torrefação obtiveram diferentes volumes, quando foram submetidos a diferentes tratamentos de temperaturas no torrefador. De forma geral, os menores valores de expansão dos grãos obtiveram-se com as baixas temperaturas do torrefador, enquanto os maiores volumes da massa de grãos foram obtidos das altas temperaturas.

Na Figura 6, as linhas contínuas são de equações que representam a relação entre o índice de expansão volumétrico aparente e a temperatura dos grãos. A temperatura é o mecanismo para ativar as reações químicas nos grãos que, segundo Baggenstoss (2008), quando o grão atinge 200°C as reações de pirólise começam e o fenômeno de expansão torna-se mais intenso após atingir essa temperatura.

As equações lineares foram escolhidas para representar as relações das duas maiores temperaturas do torrefador; as inclinações correspondem à divisão da maior variação do índice de expansão aparente (0,025) pela diferença da temperatura da massa de grãos, quando os grãos atingirem a torrefação média clara e a escura, diferença determinada em 20 e 15°C para 305 e 335°C, respectivamente. Nessas condições, a perda de massa total foi desde 16 até 21%, observou-se que a temperatura da massa de grãos foi maior que 235°C e a variação do volume aparente, aproximadamente 3%.

Em relação à perda de massa, Illy e Viani (1995) observaram que para a perda de massa de 20% o volume aparente aumentou em até 90%. Caso essa perda aumentasse em até 22%, o volume se manteria praticamente o mesmo.

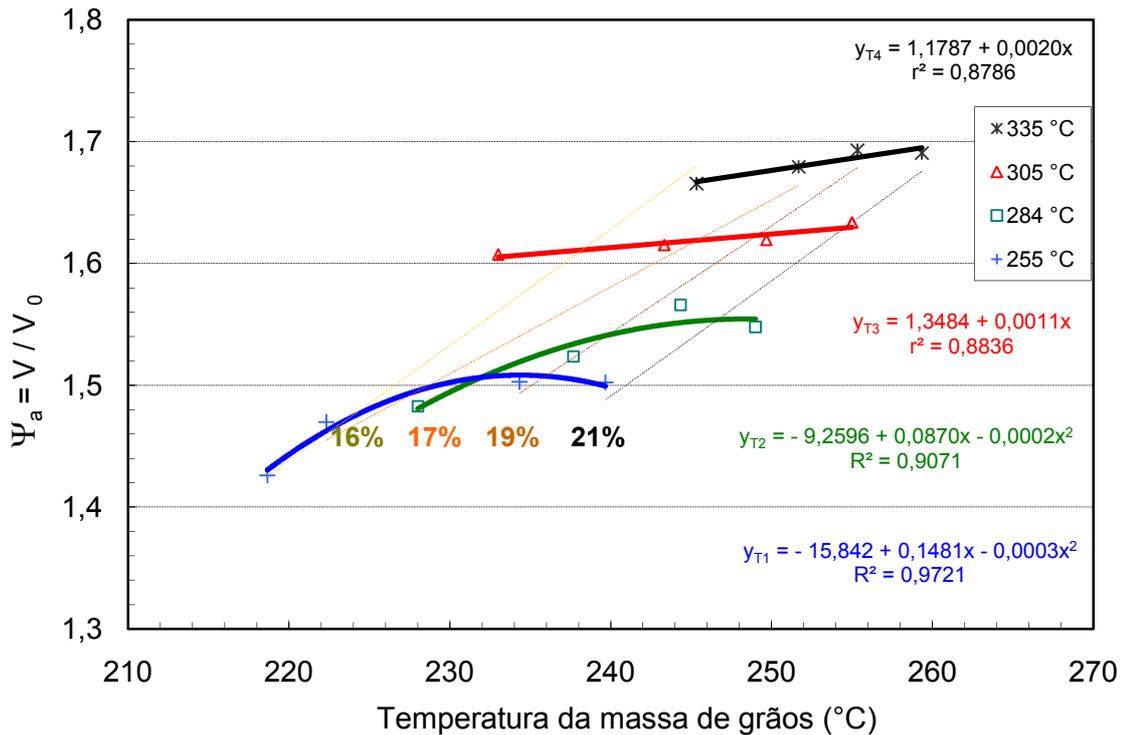


Figura 6 - Índice de expansão volumétrica aparente (Ψ_a) e temperatura da massa de grãos para quatro temperaturas do torrefador.

Nas temperaturas baixas do torrefador de 255 e 284 $^{\circ}\text{C}$, foi observado que as equações quadráticas de segundo grau podem representar a relação entre a temperatura dos grãos e o índice de expansão volumétrico aparente desses. A variação do índice de expansão volumétrico aparente foi de 0,075 (aproximadamente 8% do volume), para a diferença de 20 $^{\circ}\text{C}$ na massa de grãos, quando essa atingiu os índices de torrefação médio claro e o escuro.

Nota-se, na Figura 6, a importância de se relacionar a temperatura da massa de grãos com o aumento do volume, o que está associado com a capacidade das paredes celulares do grão de manter alta a pressão dos gases que se formam durante a torrefação (SCHENKER, 2000).

Evidenciou-se que depois de 235 $^{\circ}\text{C}$ o índice de expansão volumétrico aparente é praticamente o mesmo; portanto, a máxima expansão de volume acontece quando a temperatura dos grãos é menor que esse valor.

O efeito da temperatura do torrefador sobre o aumento de volume dos grãos foi associado ao rápido aquecimento dos grãos, pois quando aumentou a

temperatura do torrefador diminuiu o tempo de torrefação e aumentou a taxa de perda de massa, que está associada à produção de gases durante a pirólise.

O grão aumenta de tamanho em razão da pressão dos gases produzidos e da capacidade de mantê-los no interior. Quando esse perde essa capacidade, libera os gases, rompendo as paredes rígidas e produzindo o estouro, que foi observado quando a temperatura da massa de grãos foi aproximadamente 211°C.

As linhas contínuas que estão evidenciadas na Figura 7 são equações que relacionam o índice de expansão volumétrico aparente dos grãos e a razão de matéria seca do café. Observou-se que para a mesma temperatura de torrefação as amostras obtiveram câmbios do volume aparente entre 3 e 8%, quando os valores de razão de matéria seca foram desde 0,946 até 0,893 $\text{kg}_{\text{ms}} \text{kg}_{\text{ms0}}^{-1}$. Esse resultado concorda com os ensaios de Illy e Viani (1995), os quais observaram que quanto maior foi a perda de massa seca maior foi a expansão dos grãos.

De acordo com a Figura 7, nota-se o aumento do volume aparente entre 19 e 24% para a mesma razão de matéria seca dos grãos, nas temperaturas entre 255 e 335°C do torrefador. Em todas as torrefações feitas na maior temperatura do torrefador (335°C) obtiveram-se os maiores índices de expansão volumétricas 1,665; 1,679; 1,693; e 1,691, associados às torrefações média clara, média, moderadamente escura e escura, respectivamente.

A temperatura do torrefador teve mais influência na expansão do volume aparente dos grãos do que no consumo da matéria seca. O mesmo resultado foi obtido por Schenker (2000), quando esse autor fixou a perda de massa total em 16% e comparou dois tratamentos, um de alta e outro de baixa temperatura de torrefação, determinando os índices de expansão de 1,7 e 1,4, respectivamente.

No início da torrefação, as altas temperaturas do torrefador aquecem rapidamente os grãos, aumentam a pressão do vapor de água e os gases no interior dos grãos. Segundo Illy e Viani (1995), a torrefação rápida não facilita a perda de água, o que pode influir no aumento do volume dos grãos desde as etapas da secagem.

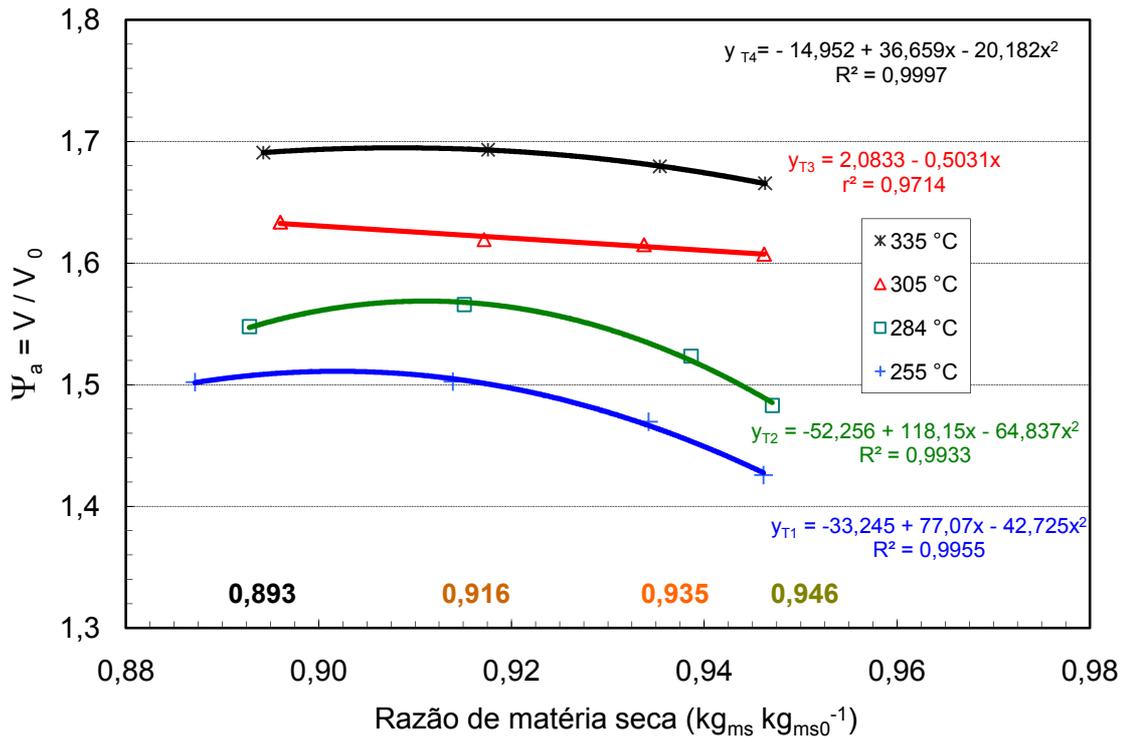


Figura 7 - Índice de expansão volumétrica aparente (Ψ_a) e razão de matéria seca da massa de grãos torrados.

Os grãos foram aquecidos durante a etapa endotérmica e a exotérmica com a temperatura constante até atingirem o índice de torrefação. Iniciada a etapa exotérmica, não há necessidade de manter a mesma temperatura no torrefador, podendo essa ser diminuída para controlar o ponto final da torrefação dos grãos.

3.4. Aumento no volume unitário dos grãos

O volume real dos grãos foi medido segundo o volume de óleo girassol deslocado por esses, com densidade média de $915,51 \text{ kg m}^{-3}$. Os óleos vegetais foram usados em outras pesquisas para medição da massa unitária de outros tipos de grãos (MOREIRA et al., 1985) e de café (SCHENKER, 2000).

Na Tabela 3, evidencia-se que os índices de expansão volumétrica unitária dos grãos torrados estiveram entre 1,4 e 1,8, associados às perdas de

peso de 16 e 21%, com temperaturas do torrefador de 255 e 335°C, respectivamente.

Tabela 3 - Índices de expansão volumétrica unitária para grãos de café com quatro níveis de torrefação

Torrefação	Temperatura do torrefador			
	255°C	284°C	305°C	335°C
MC	1,405 ± 0,038	1,435 ± 0,023	1,518 ± 0,034	1,574 ± 0,036
M	1,498 ± 0,053	1,561 ± 0,051	1,612 ± 0,071	1,600 ± 0,060
ME	1,611 ± 0,034	1,664 ± 0,043	1,686 ± 0,039	1,653 ± 0,037
E	1,697 ± 0,009	1,738 ± 0,060	1,775 ± 0,040	1,794 ± 0,062

Nas condições em que a perda de massa total foi desde 16 até 21%, mantendo a mesma temperatura de torrefador, observa-se, na Tabela 3, que o volume unitário nos grãos aumentou entre 22 e 30%. Já na mesma perda de massa, mas com a temperatura do torrefador de 255 até 335°C, foi evidenciado que o volume unitário nos grãos aumentou entre 4 e 17%. Portanto, a perda de massa total teve mais influência na expansão do volume unitário dos grãos do que a temperatura de torrefação.

Para representar a expansão volumétrica unitária dos grãos e o tempo de torrefação, na Figura 8, observam-se linhas contínuas, para ilustrar o mesmo índice de torrefação, e as descontinuas, para indicar os tratamentos na mesma temperatura do torrefador.

Os grãos com torrefação escura obtiveram a máxima expansão unitária, de 80% a 335°C em 11 min e 70% a 305°C em 32 min. A mínima expansão unitária foi de 40%, em 24 min a 255°C, para os grãos com perda de massa total de 16% e torrefação média clara.

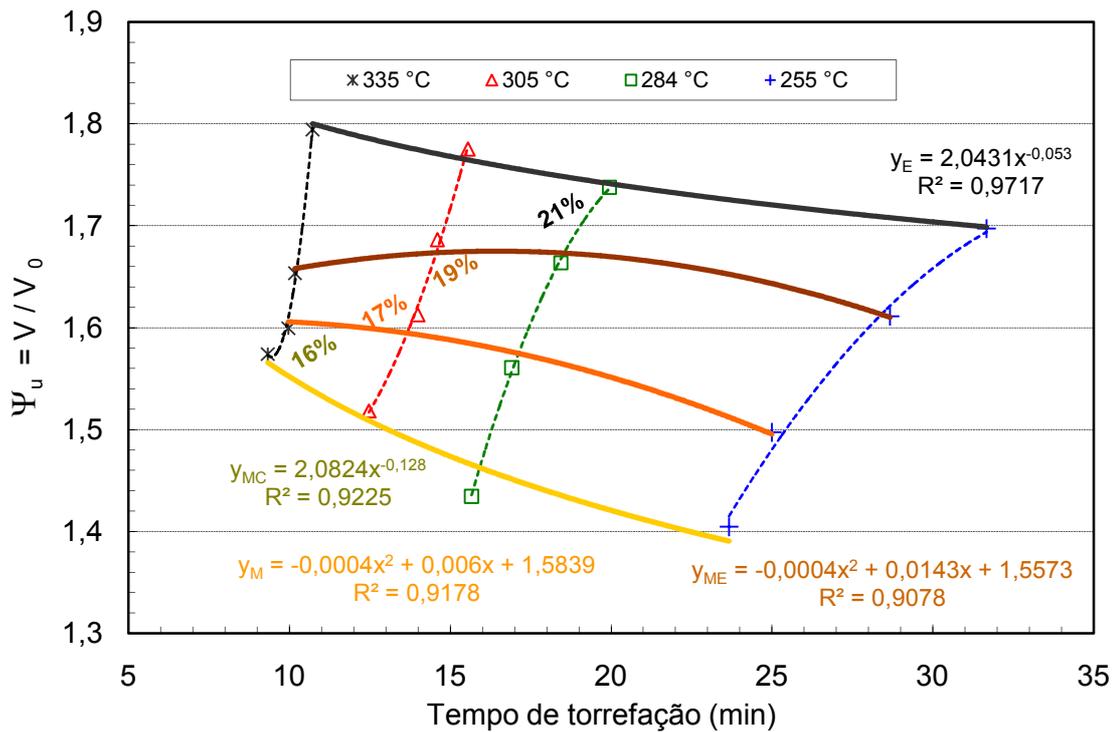


Figura 8 - Índice de expansão volumétrica unitária (Ψ_u) dos grãos de café na torrefação e o efeito do índice de torrefação (16% médio claro; 17%, média; 19%, moderadamente escuro; e 21%, escuro).

De acordo com a Figura 8, pode-se observar que os grãos mantidos mais tempo no torrefador e aquecidos constantemente aumentaram o índice de expansão volumétrica unitária. Dessa forma, a temperatura dos gases no interior dos grãos aumentou em razão de esses terem atingido maiores temperaturas e conseqüentemente torrefações escuras (SCHENKER, 2000).

Na Figura 9, as linhas contínuas representam o mesmo índice de torrefação dos grãos; e as descontínuas, o efeito da temperatura do torrefador no aumento do volume unitário com a temperatura dos grãos. A variação máxima do volume unitário dos grãos foi de 8% com o aquecimento de 20°C dos grãos na faixa de 235 até 255°C; portanto, as maiores variações volumétricas unitárias ocorreram antes que os grãos atingiram 235°C.

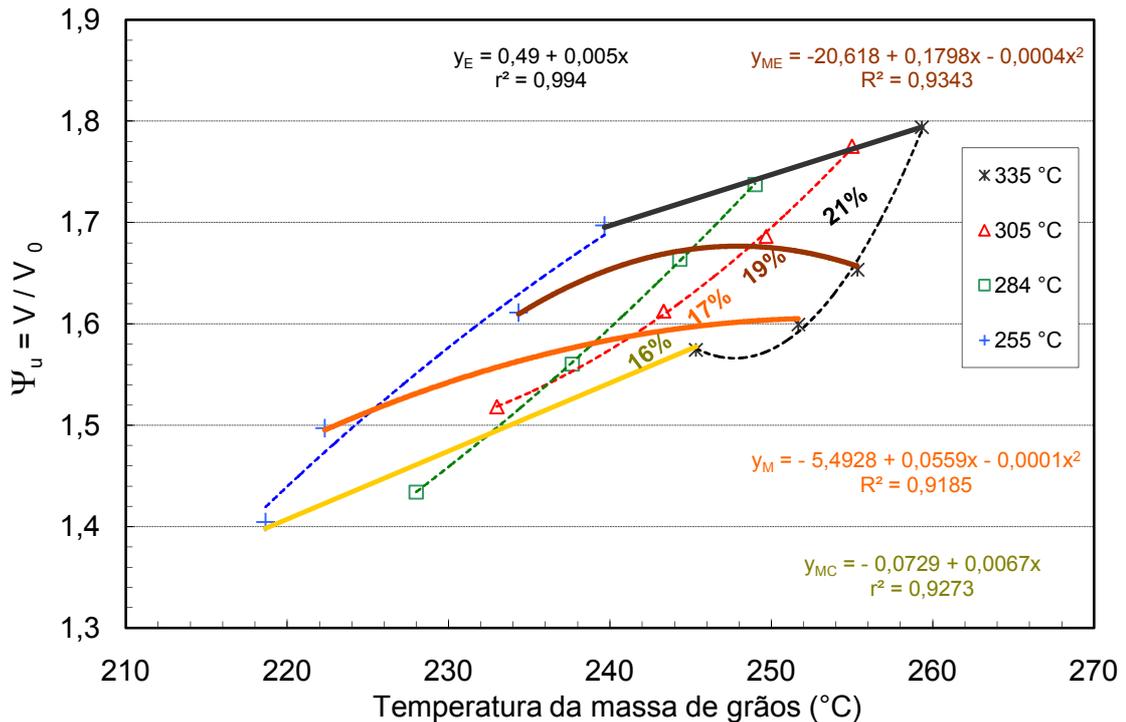


Figura 9 - Índice de expansão volumétrica unitária (Ψ_u) e temperatura da massa de grãos em quatro níveis de torrefação (médio claro, MC; médio, M; moderadamente escuro, ME; e escuro, E).

Os grãos de café para atingir uma torrefação escura tiveram que permanecer mais tempo no torrefador, com aquecimento de temperaturas entre 240 e 260°C, obtendo-se os maiores índices de expansão unitária entre 1,7 e 1,8. Os valores estão de acordo com Schenker (2000), o qual encontrou o índice de expansão máxima de 1,8, para perdas do peso em 19%, para amostras em tratamentos com alta temperatura.

Na Figura 10, está apresentado que o índice de expansão volumétrica unitária dos grãos está associado principalmente ao consumo da matéria seca durante a torrefação. A matéria seca dos grãos com torrefações mais escuras foi mais consumida e transformada em produção de gases, o que aumentaram as pressões internas no grão, causando maior volume unitário; conseqüentemente, os grãos mais escuros obtiveram o volume unitário maior que os claros, o que está de acordo com outras pesquisas que associaram a perda de massa com a expansão dos grãos (ILLY; VIANI, 1995; SCHENKER, 2000).

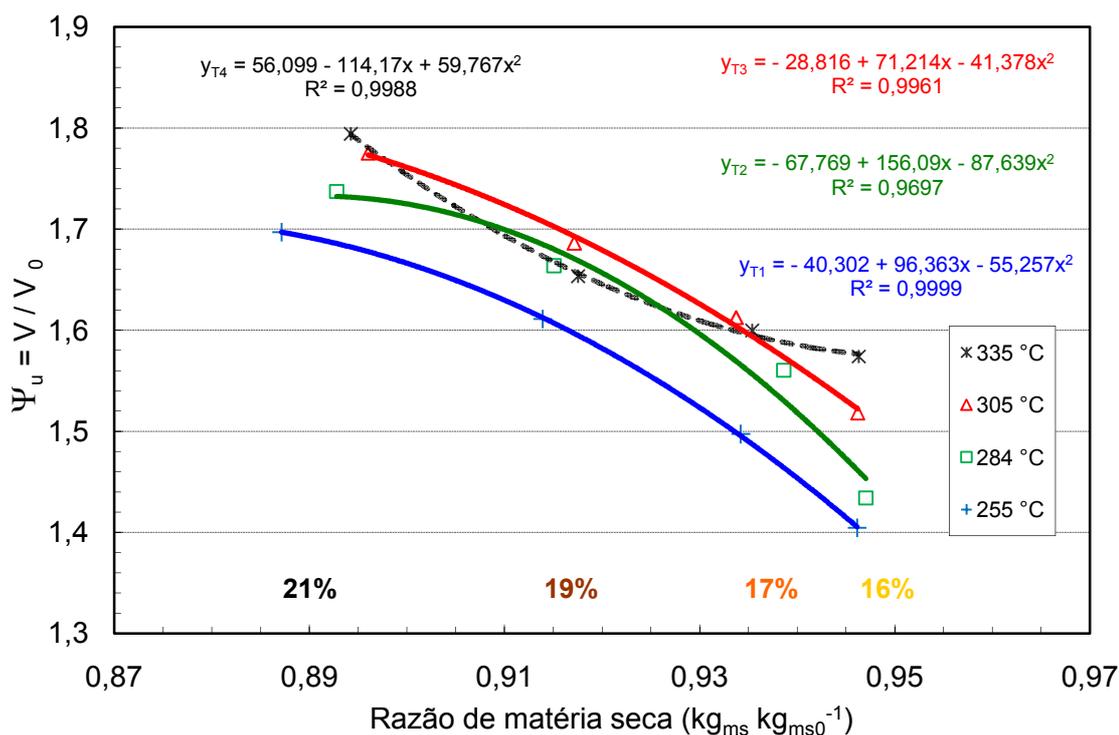


Figura 10 - Índice de expansão volumétrica unitária (Ψ_u) e razão de matéria seca dos grãos de café torrados em quatro temperaturas.

Os grãos com torrefação média até escura com temperaturas do torrefador de 285, 305 e 335°C tiveram semelhança na expansão e diferenças máximas de 6% entre si. Os coeficientes de determinação das equações quadráticas que representam o índice de expansão unitária dos grãos, em função da razão de matéria seca R^2 , foram superiores a 0,96.

3.5. Massa específica aparente

Na torrefação do café, pelo efeito combinado da perda de massa total e o aumento do volume aparente da massa de grãos, resultou em diminuição da massa específica aparente do café cru, que no início foi de 675,03 kg m⁻³. O valor obtido no experimento está de acordo com os dados reportados por Illy e Viani (1995), para os grãos crus, de 550 a 700 g L⁻¹.

As massas específicas aparentes dos grãos estiveram na faixa de variação de aproximadamente 100 kg m⁻³, enquanto o valor máximo e mínimo

foi de 382 e 289 kg m⁻³, respectivamente. A máxima variação das médias dentro de cada avaliação foi de 3,3 kg m⁻³ e em todos os tratamentos a variação máxima foi aproximadamente 11,1 kg m⁻³, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Massa específica aparente do café torrado em cada repetição

Amostra	Massa específica aparente (kg m ⁻³)			Média (kg m ⁻³)
	Avaliação 1	Avaliação 2	Avaliação 3	
255°C - MC	371,62 ± 1,59	382,19 ± 2,70	369,74 ± 1,22	374,54 ± 6,71
255°C - M	355,81 ± 0,99	349,37 ± 2,19	353,07 ± 2,26	352,75 ± 3,23
255°C - ME	314,77 ± 1,89	319,10 ± 2,10	323,70 ± 1,97	319,19 ± 4,46
255°C - E	298,43 ± 2,14	301,18 ± 1,31	296,64 ± 1,52	299,08 ± 3,28
284°C - MC	366,28 ± 1,69	366,15 ± 1,51	365,47 ± 1,28	365,97 ± 0,43
284°C - M	350,53 ± 3,08	341,08 ± 1,17	347,47 ± 0,85	346,36 ± 4,82
284°C - ME	313,66 ± 2,00	320,39 ± 0,82	324,35 ± 1,38	319,47 ± 5,41
284°C - E	293,75 ± 2,29	297,24 ± 1,60	308,90 ± 2,36	299,96 ± 7,94
305°C - MC	346,17 ± 1,06	386,06 ± 1,94	354,17 ± 1,38	356,14 ± 11,08
305°C - M	331,25 ± 1,08	336,91 ± 1,38	335,61 ± 3,32	334,59 ± 2,96
305°C - ME	313,05 ± 2,55	317,28 ± 1,67	313,15 ± 1,06	314,49 ± 2,42
305°C - E	286,97 ± 1,81	301,83 ± 1,35	304,38 ± 0,63	297,73 ± 9,40
335°C - MC	356,61 ± 2,05	365,40 ± 0,57	356,38 ± 1,11	359,46 ± 5,14
335°C - M	341,88 ± 0,81	347,94 ± 1,20	335,40 ± 1,45	341,74 ± 6,27
335°C - ME	305,90 ± 1,05	323,73 ± 1,78	324,00 ± 1,90	317,88 ± 10,37
335°C - E	288,87 ± 0,56	300,39 ± 1,34	305,81 ± 0,96	298,36 ± 8,65

A faixa de valores determinados da massa específica aparente dos grãos de café torrados está de acordo com os discriminados por Sivetz (1963), sendo 23 lb ft⁻³ (368 kg m⁻³), para tipo claro (*light roast*), e 18 lb ft⁻³ (288 kg m⁻³), para tipo escuro (*darkly roasted*).

Na Figura 11, nota-se que, para uma mesma temperatura do torrefador, deixaram-se mais tempo os grãos de café para passar da torra média clara até a escura, com perda de massa total entre 16 e 21%; entretanto, foram observadas diferenças de massa específica aparente de aproximadamente 75 kg m⁻³. A massa específica aparente diminuiu linearmente

com o tempo, em taxas de $-26,6$; $-16,2$; $-13,6$; e $-8,5$ $\text{kg m}^{-3} \text{min}^{-1}$ para 335 , 305 , 284 e 255°C do torrefador, respectivamente. As taxas determinadas foram às obtidas pelas inclinações das linhas, as que foram adequadamente representadas por equações lineares com r^2 maior que $0,51$.

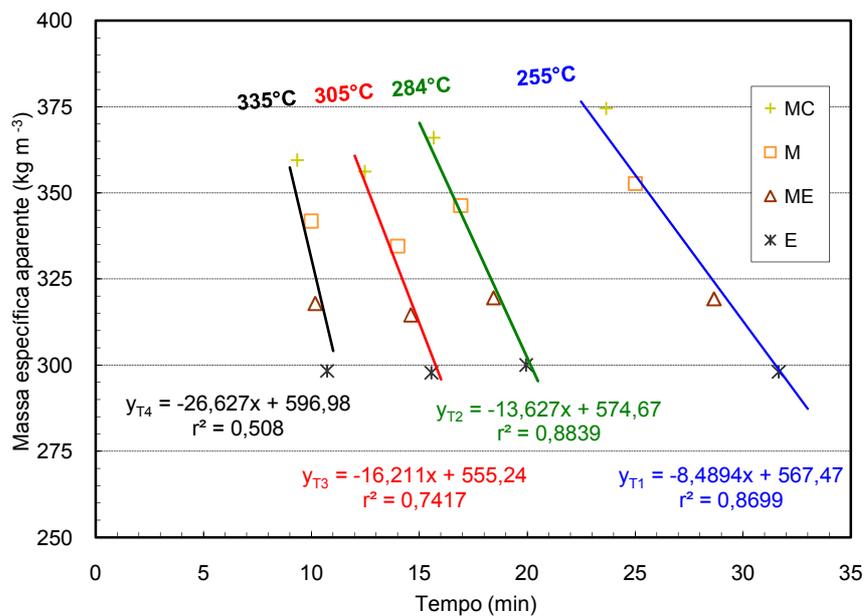


Figura 11 - Massa específica aparente em grãos de café com torrefações média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E), em quatro temperaturas de torrefação.

As linhas contínuas demonstradas na Figura 12 representam o mesmo nível de torrefação dos grãos e as descontínuas, a temperatura do torrefador. Observou-se que a massa específica aparente poderia ser usada como índice da qualidade dos grãos torrados. Os grãos com torrefação média clara, média, moderadamente escura e escura corresponderam a $364,02$; $343,86$; $317,76$; e $298,53$ kg m^{-3} , respectivamente. As médias foram diferentes significativamente segundo o teste de Tukey para um nível de confiança estatístico de 5%.

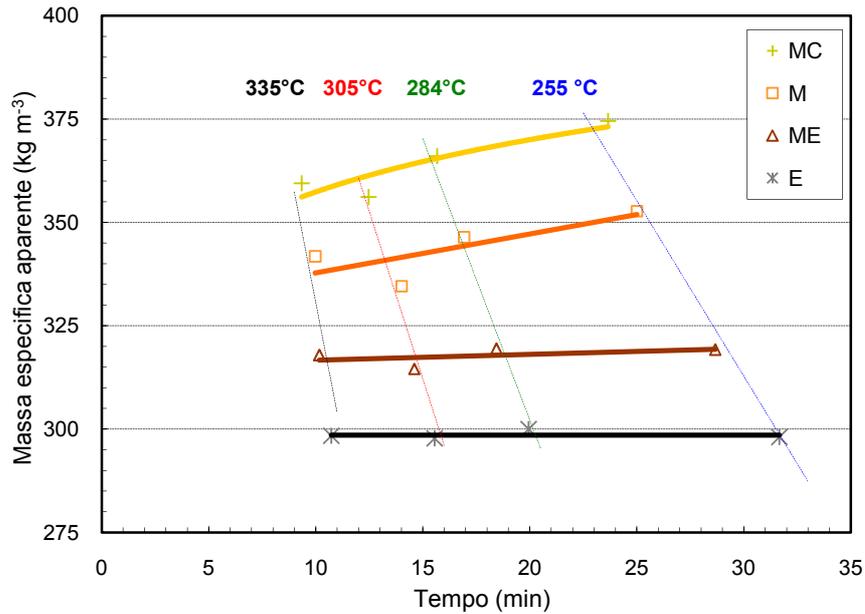


Figura 12 - Massa específica aparente para grãos de café com a mesma categoria de torrefação: média clara (+), média (□), moderadamente escura (Δ) e escura (*).

Nos grãos com índice de torrefação médio claro, a massa específica aparente diminuiu de 375 até 360 kg m⁻³, quando a temperatura de torrefação aumentou de 255 até 335°C, assim como o tempo diminuiu de 23,7 até 9,3 min, respectivamente. Na análise das condições anteriores, a massa específica aparente diminuiu na taxa de 1,21 kg m⁻³ min⁻¹, associada principalmente ao efeito do aumento do volume aparente da massa de grãos, produzido pela rapidez de aquecimento dos grãos para atingir 219 e 245°C, de acordo com a Figura 12.

Os grãos com índices de torrefação médios foram obtidos entre 25 e 10 min com torrefador a 255 até 335°C, respectivamente. Nessas condições, a taxa de variação da massa específica aparente foi de 0,94 kg m⁻³ min⁻¹ e a máxima variação, 14 kg m⁻³. A massa de grãos foi aquecida entre 222 e 252°C, segundo o aquecimento do torrefador nas condições ditas anteriormente.

Os grãos com índices de torrefação moderadamente escuros foram obtidos entre 29 e 10 min com torrefador a 255 e 335°C, respectivamente. Nessas condições de aquecimento do torrefador, a massa de grãos foi aquecida até 234 e 255°C, respectivamente. A massa específica aparente dos

grãos com os níveis de torrefação moderadamente escuro e escuro praticamente não variaram, quando se usaram diferentes temperaturas do torrefador; as médias foram 317,8 e 298,5 kg m⁻³, respectivamente. Observou-se uma diferença constante dos grãos de aproximadamente 20 kg m⁻³ entre os dois índices de torrefação.

Os grãos com índice escuro obtiveram a mínima massa específica aparente, que atingiu 240 e 260°C para as torrefações feitas a 255 e 335°C, respectivamente. Nessas condições, o tempo de torrefação diminuiu de 31,5 a 10,3 min.

Os grãos escuros ficaram maior tempo no torrefador do que os grãos claros (9 até 24 min), sendo aquecidos continuamente e liberando mais quantidade de fumaça. Nessa etapa, produziram-se odores intensos, escurecimento dos grãos e estouros simultâneos, que foram as evidências que a massa seca foi usada para produzir as mudanças químicas e físicas nos grãos de café. Assim, os grãos escuros diminuíram a massa específica aparente principalmente pela perda de matéria seca.

A relação entre a perda de massa total do café torrado e sua massa específica aparente é semelhante ao modelo matemático potencial com coeficiente de determinação R² de 0,9445, nas três avaliações feitas. Percebe-se que a massa específica aparente decresce enquanto aumenta o nível de torrefação nos grãos, desde os índices mais claros até os mais escuros (Figura 13).

Os valores obtidos da massa específica aparente no experimento estão de acordo com Illy e Viani (1995), os quais reportaram valores de 300 a 450 g L⁻¹ para os grãos de café torrados.

Conforme a Figura 14, a matéria seca diminuiu durante a torrefação, desde torras mais claras até as mais escuras; bem como a massa específica aparente diminuiu entre esses índices de torrefações. A massa específica aparente dos grãos está diretamente relacionada com a razão de matéria seca e é representada adequadamente pela equação quadrática com coeficiente de determinação R² de 0,9584.

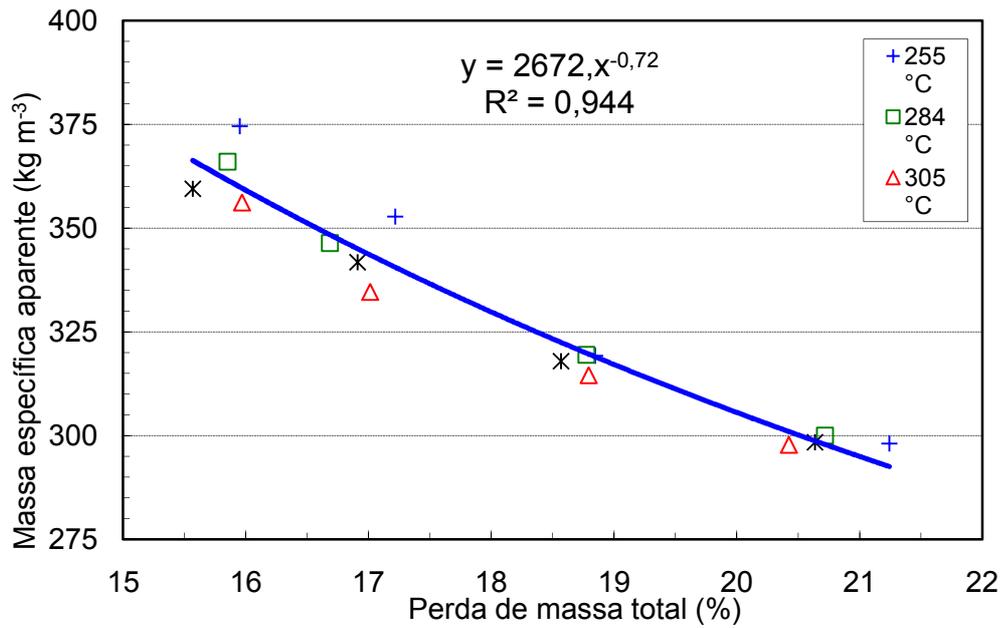


Figura 13 - Massa específica aparente e perda de massa total dos grãos de café torrados.

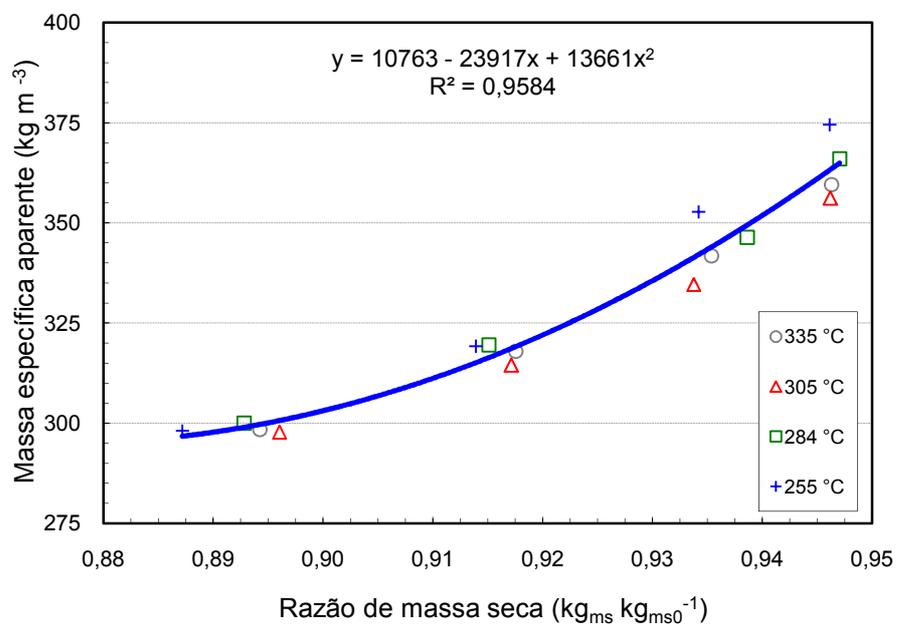


Figura 14 - Variação da massa específica aparente e razão de massa seca dos grãos de café submetidos a quatro temperaturas de torrefação.

Na Figura 14, observa-se que os grãos de café com o mesmo índice de torrefação obtidos em quatro temperaturas do torrefador obtiveram praticamente a mesma massa específica aparente, podendo essa ser considerada um indicador da qualidade física do café torrado.

O valor máximo e o mínimo da massa específica aparente para os grãos torrados foram de 287 e 382 kg m⁻³, relacionados com a razão de massa seca de 0,885 e 0,948 kg_{ms} kg_{ms0}⁻¹, respectivamente, o que indica que a matéria seca do café foi consumida durante a torrefação com perdas da massa seca de 5,2 até 11,5%, desde a torrefação mais clara até a mais escura.

A razão de massa seca entre os diferentes índices de torrefação é consideravelmente diferente, conforme a Figura 14. Na Figura 7, já pôde ser observado que o volume aparente (denominador) dos grãos se estabilizou nas amostras dos tratamentos a 305 e 335°C, o que se conclui que a massa específica aparente diminuiu mais por efeito da perda de massa (numerador) que por variação do volume aparente.

3.6. Massa específica unitária

De acordo com a Tabela 5, a massa específica unitária máxima e a mínima foi de 709 e 473 kg m⁻³, associadas às torrefações média clara e escura, respectivamente. A massa específica unitária dos grãos crus foi de 1.243,25 kg m⁻³, portanto os grãos torrados estavam entre 57 e 38% da massa específica unitária dos grãos crus. Na torrefação média clara e média, os valores obtidos foram de 53,7 e 50,5%, respectivamente, da massa específica unitária dos grãos crus, o que está de acordo com Sivetz (1963), o qual determinou 60 e 50% para a torrefação clara e média, respectivamente.

As médias gerais da massa específica unitária foram de 667,56; 628,00; 580,00; e 528,92 kg m⁻³, que foram classificadas pelo teste de Tukey para 5% de probabilidade, e associadas às torrefações média clara, média, moderadamente escura e escura, respectivamente.

Tabela 5 - Massa específica unitária dos grãos de café torrados

Amostra	Massa específica unitária (kg m ⁻³)			Média (kg m ⁻³)
	Avaliação 1	Avaliação 2	Avaliação 3	
255°C - MC	676,04 ± 16,27	708,95 ± 11,55	706,84 ± 22,77	697,28 ± 18,42
255°C - M	639,58 ± 14,40	648,42 ± 15,96	661,88 ± 17,83	649,96 ± 11,23
255°C - ME	573,61 ± 20,67	589,91 ± 12,96	592,45 ± 19,90	585,32 ± 10,22
255°C - E	543,42 ± 31,26	542,82 ± 22,26	533,56 ± 9,18	533,93 ± 5,53
284°C - MC	673,22 ± 12,05	676,32 ± 16,56	669,75 ± 22,09	673,10 ± 3,29
284°C - M	633,51 ± 6,22	627,21 ± 13,72	633,18 ± 16,74	631,30 ± 3,55
284°C - ME	564,25 ± 14,57	579,31 ± 29,30	584,94 ± 15,48	576,17 ± 10,70
284°C - E	549,12 ± 10,76	530,29 ± 18,85	534,59 ± 18,66	538,00 ± 9,87
305°C - MC	648,95 ± 4,09	637,28 ± 12,37	650,78 ± 10,31	645,67 ± 7,32
305°C - M	610,31 ± 10,98	593,19 ± 11,11	600,64 ± 12,67	601,38 ± 8,58
305°C - ME	581,59 ± 17,79	589,87 ± 6,15	553,83 ± 3,89	575,10 ± 18,88
305°C - E	511,18 ± 4,70	559,78 ± 10,29	504,72 ± 4,93	525,23 ± 30,10
335°C - MC	623,88 ± 9,78	653,89 ± 9,60	639,67 ± 30,20	639,15 ± 15,01
335°C - M	614,09 ± 2,94	646,48 ± 7,42	594,44 ± 5,08	618,34 ± 26,28
335°C - ME	565,29 ± 9,44	606,35 ± 2,77	574,98 ± 10,39	582,21 ± 21,47
335°C - E	520,06 ± 14,80	544,20 ± 15,57	473,29 ± 18,85	512,52 ± 36,06

Na Figura 15, as linhas contínuas são para representar o efeito da temperatura do torrefador sobre o tempo e o índice de torrefação dos grãos. A massa específica unitária diminuiu quando as amostras foram mantidas no torrefador na mesma temperatura, desde o índice médio claro até escuro.

Os grãos diminuíram sua massa específica unitária com rapidez de aproximadamente 45,5; 30,8; 26,8; e 16,9 kg m⁻³ min⁻¹ para 335, 305, 284 e 255°C, respectivamente. A equação linear para a temperatura de 335°C teve r² de 0,2447, sendo considerado de ajuste baixo, em razão da rápida variabilidade da massa específica unitária dos grãos.

Está apresentada, na Figura 15, a semelhança nas massas específicas dos grãos, com o mesmo índice de torrefação, quando essas são torradas a 255 e 284°C, em contraste; ao serem torradas a 305 e 335°C, notou-se variabilidade dos grãos com diferentes torrefações entre média clara e moderadamente escura.

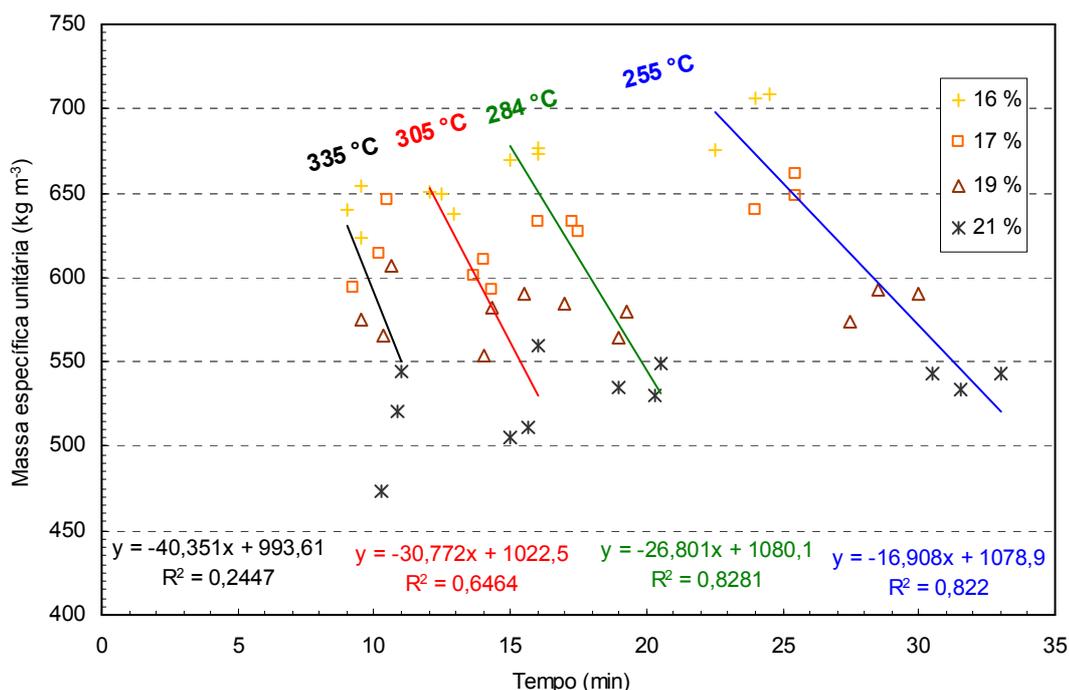


Figura 15 - Massa específica unitária dos grãos de café com torrefações média clara (+), média (□), moderadamente escura (Δ) e escura (*), em quatro temperaturas de torrefação.

A rapidez com que diminuíram a massa específica unitária, em razão da temperatura, foi registrada por Baggenstoss (2008), em dois tratamentos, sendo um à baixa temperatura-longa duração e outro à alta temperatura-curta duração; no final das torrefações, observou-se o comportamento linear, que está de acordo com esta pesquisa.

Para se obter os índices de torrefação médio claro até escuro a 335°C, foi necessário uma diferença de aproximadamente 1,5 min, variando desde 660 a 470 kg m⁻³. A torrefação mais lenta foi de 255°C, em 33 min, obtendo variações de 700 a 530 kg m⁻³, num intervalo de 10 min. A torrefação na alta temperatura promoveu maiores índices de expansão volumétrico aparente e unitário dos grãos, que foram associados às maiores taxas de perda de massa nas amostras, pois os dois efeitos combinados resultaram em menores massas específicas unitárias para as torrefações dos grãos escuros.

Os grãos com torrefação média clara tiveram o máximo valor de 700 kg m⁻³ até 625 kg m⁻³, associado às temperaturas de torra de 255 e 335°C, respectivamente, o que está de acordo com Baggenstoss (2008), o qual

reportou os valores de massa específica unitária para café com torrefação média (*medium degree roast*) de 700 e 600 kg m⁻³, para tratamentos em baixa e alta temperatura de torrefação, respectivamente.

Na Figura 16, são evidenciadas as linhas contínuas para representar o mesmo índice de torrefação dos grãos, observando-se que a massa específica unitária para os grãos no mesmo índice variou acima que 50 kg m⁻³, quando esses foram torrados a 305 e 335°C.

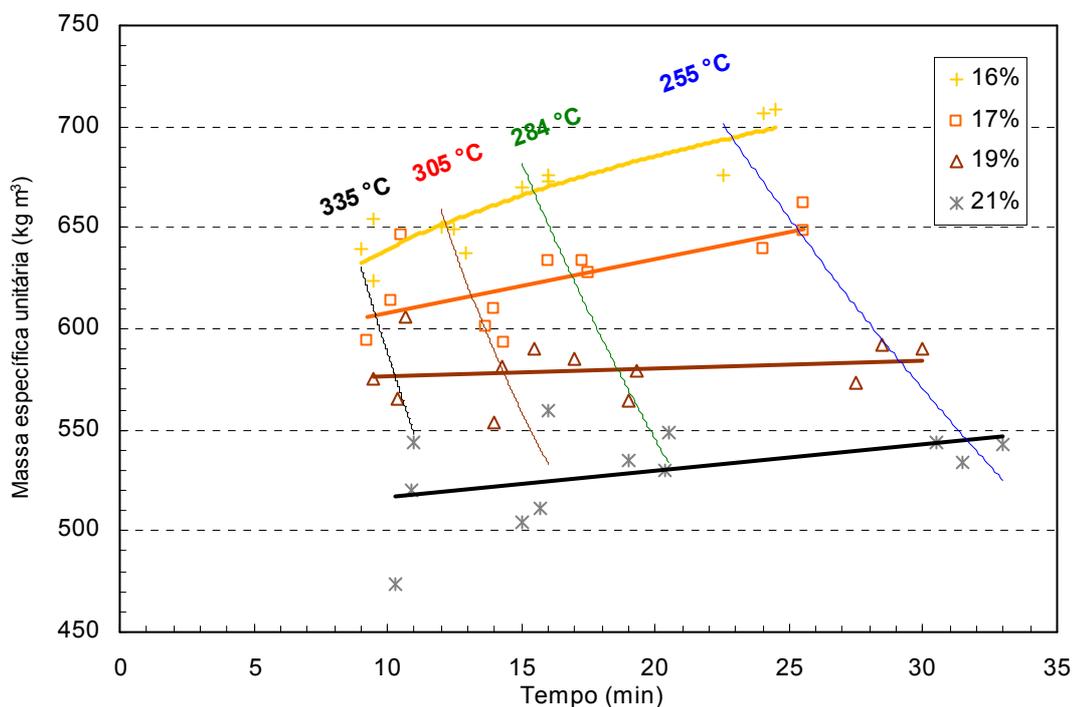


Figura 16 - Massa específica unitária dos grãos de café com torrefações média clara (+), média (□), moderadamente escura (Δ) e escura (*).

Quando os grãos são mais torrados, nota-se que há diminuição significativa da massa específica unitária, já que estão por mais tempo no processo da pirólise. A torrefação dos grãos com índice escuro obteve a menor massa específica unitária, o que está associada principalmente à maior perda de massa total nos grãos, 21%. Nesse caso, diminuiu a densidade da massa

unitária em razão da perda de massa seca do que pelo aumento do volume dos grãos.

Na Figura 17, estão apresentadas as equações quadráticas com r^2 superior a 0,95, que representaram adequadamente a relação entre a massa específica unitária e a razão de matéria seca dos grãos. Para as temperaturas de 284, 305, e 335°C foi obtida uma mesma equação; entretanto, foi necessária outra para 255°C.

Pode-se concluir que as amostras torradas a 255°C tiveram maior massa específica unitária em razão do menor volume unitário dos grãos para os mesmos valores de razão da matéria seca, em comparação aos obtidos das outras temperaturas do torrefador, de acordo com a Figura 17.

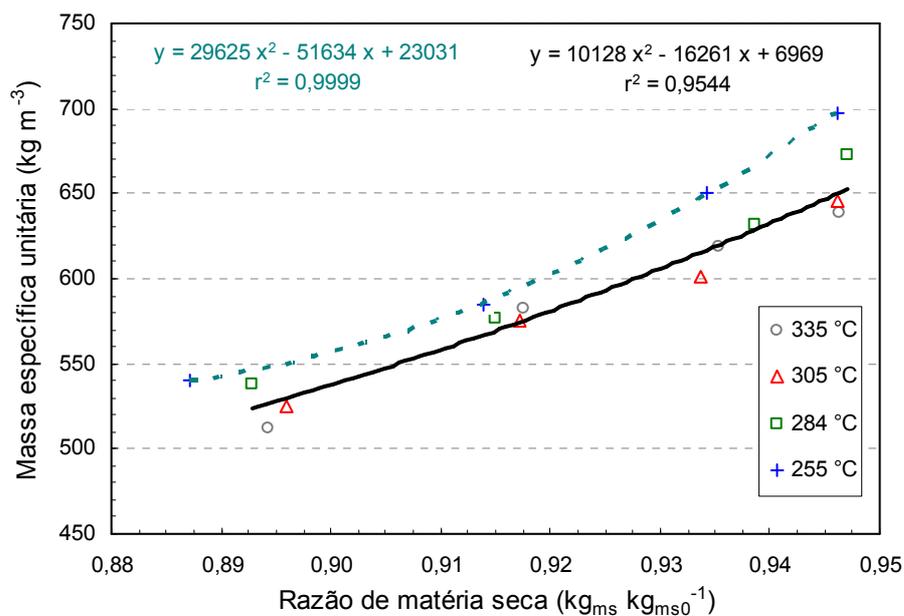


Figura 17 - Massa específica unitária e razão da matéria seca dos grãos de café submetidos a quatro temperaturas de torrefação.

Para atingir o índice de torrefação desejado nos grãos de café, determinou-se que qualquer temperatura do torrefador poderia ser usada. Neste experimento, observou-se o aquecimento linear da massa de grãos, mantendo a mesma temperatura do torrefador. Na torrefação industrial, o

operador pode diminuir a temperatura do torrefador para controlar o processo de torrefação e ter mais tempo de chegar ao ponto ideal de torrefação dos grãos de café.

3.7. Porosidade

Não se observou influência da temperatura nem da qualidade de torra na porosidade nos grãos torrados, pelo teste F para 0,05 de probabilidade. A média geral da porosidade intergranular foi de 44,75%, com coeficiente de variação de 3,98% para os grãos torrados em 48 dados observados.

Na Tabela 7, observa-se o valor mínimo e o máximo de 41,5 e 46,3%, respectivamente, o que está de acordo com a porosidade de 47%, para grãos de café arábicos, com torrefação média (medium roast), determinados por Radtke (citado por CLARKE; MACRAE, 1989).

Tabela 7 - Porosidade dos grãos de café em diversas condições de torrefação

Índice de torrefação	Temperatura do torrefador			
	255°C	284°C	305°C	335°C
MC	46,3 ± 1,3	45,7 ± 1,2	45,5 ± 0,4	44,8 ± 0,3
M	45,6 ± 0,2	45,1 ± 0,5	44,6 ± 0,1	44,2 ± 2,2
ME	44,8 ± 2,3	44,3 ± 1,3	45,3 ± 1,6	43,2 ± 3,2
E	43,7 ± 0,8	44,7 ± 1,3	45,4 ± 1,5	41,5 ± 5,3

Na Figura 18, nota-se que os grãos que foram torrados à temperatura de 335°C apresentaram relação lineal crescente entre a porosidade e a razão de matéria seca.

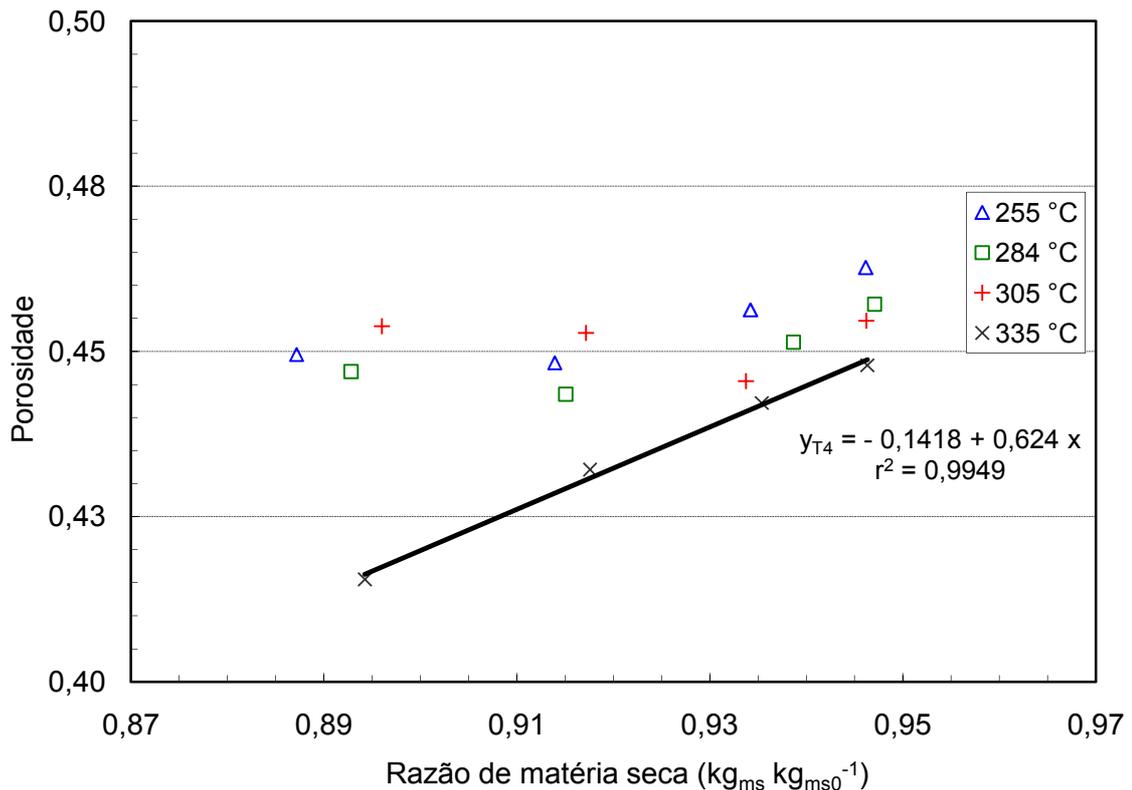


Figura 18 - Porosidade dos grãos de café e efeito da temperatura do torrefador.

De acordo com a Figura 18, a porosidade média de 45,2% se manteve estável em relação à variação da razão de matéria seca para os grãos torrados às temperaturas de 284, 305 e 305°C. Observou-se que a expansão volumétrica unitária se manteve estável. Nessa figura, nota-se que os grãos que foram torrados à temperatura de 335°C apresentaram relação linear entre a porosidade e a razão de matéria seca.

A porosidade para os grãos torrados a 335°C foi diminuída linearmente com a razão de matéria seca. Quando as amostras atingiram temperaturas mais altas, essas consumiram maior quantidade de matéria seca; os grãos atingiram temperaturas altas e se expandiram até 1,8 vez o volume, diminuindo a porosidade. O aumento do volume aparente está associado à temperatura da massa dos grãos, em relação à temperatura do torrefador.

O efeito da temperatura sobre a porosidade foi reportado por Baggenstoss (2008), quando esse autor determinou a porosidade de 52,8%,

para tratamentos em alta temperatura/curta duração, e 47,4%, para baixa temperatura/longa duração, com perda de peso total nas amostras de 15%.

4. CONCLUSÕES

A definição do termo “razão de matéria seca” permitiu analisar adequadamente as propriedades físicas do café torrado. Estabeleceram-se os níveis de matéria seca dos grãos, que diminuíram, proporcionalmente, segundo o aumento do nível de torrefação dos grãos. Quanto mais escura a torrefação dos grãos torrados, maior é a perda da matéria seca e menor a razão de matéria seca dos grãos.

Os cafés com diferentes graus de torrefação expandiram o volume aparente de 40 a 70% e o volume unitário de 40 a 80%. Determinou-se que o maior volume aparente da massa de grãos foi associado com as altas temperaturas do torrefador. Os grãos com maior volume unitário foram caracterizados por maior consumo da matéria seca e teve mais influência na expansão do que na temperatura do torrefador.

Determinaram-se as massas específicas aparentes e unitárias dos grãos de café torrados; para cada nível de torrefação, estabeleceu-se valor característico, que pode ser usado para caracterizar fisicamente os grãos.

Em relação aos grãos de café mais torrados, observou-se diminuição significativa da massa aparente e massa específica unitária; quando esses ficaram por mais tempo no processo da pirólise, a massa seca foi mais consumida, diminuindo a massa unitária mais pelo efeito de perda de massa seca do que pelo efeito da expansão volumétrica dos grãos.

A porosidade é um dos principais parâmetros físicos. No caso dos grãos de café com torrefação média clara, média, moderadamente escura e escura, essa porosidade é praticamente a mesma para as temperaturas menores que 335°C; entretanto, para os grãos com o torrefador a 335°C, essa decresceu linearmente com a perda de massa.

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.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 16, de 24 de maio de 2010. **Regulamento técnico para o café torrado em grão e para café torrado e moído**. Diário Oficial da União n.º 98, seção 1, 2010.

CLARKE, R.J.; MACRAE, R. **Coffee**. London: Elsevier Applied Science, 1989. v. 2, 321 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: safra café. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conab/web/download/safra/2_levantamento_2010.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2010.

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.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 4 jun. 2010.

FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; MENDONÇA, J.C.F.; SILVA, X.A. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, v. 90, p. 89-94, 2005.

GEIGER, R. **Development of coffee bean structure during roasting**: investigations on resistance and driving forces. 2004. Tese (Doutorado) – Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Zurique, Suíça.

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.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ – IAL. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz**. 4.ed. São Paulo: IMESP, 2004. p. 1004.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plants and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 730 p.

MOREIRA, S.M.C.; CHAVES, M.A.; OLIVEIRA, L.M. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 9-10, n. 1-2, p. 22-24, 1985.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. Physical changes during coffee roasting in rotary conduction-type heating units. **Journal of Food Process Engineering**, v. 26, p. 543-548, 2003.

NAGARAJU, V.D.; MURTHY, C.T.; RAMALAKSHMI, K.; RAO, P.N.S. Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. **Journal of Food Engineering**, v. 31, n. 2, p. 263-270, 1997.

NICOLI, M.; ANESE, M.; MANZOCCO, L.; LERICI, C.R. Antioxidant properties of coffee brews in relation to the roasting degree. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v.30, p. 292-297, 1997.

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.

PITTIA, P.; DALLA, M.R.; LERICI, C.R. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

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

SCHMIDT, C.; MIGLIORANZA, E.; PRUDÊNCIO, S. Interação da torra e moagem do café na preferência do consumidor do oeste paranaense. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1111-1117, 2008.

SILVA, G.V. **Degustação de café torrado e moído**: mapeamento do processo de torra. Brasília: MAPA, 2011. (Apostila do Curso de Qualificação de Classificadores de Café).

SIVETZ, M. **Coffee processing technology**. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, 1963. v. 2, 379 p.

SIVETZ, M.; DESROSIER, N.W. **Coffee technology**. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, 1979. 716 p.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO SENSORIAL DA QUALIDADE DO CAFÉ EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE TORREFAÇÃO

RESUMO: A torrefação é um dos principais fatores que contribui para a boa qualidade e aceitação da bebida do café. Para se alcançar essa qualidade, as principais variáveis a serem controladas são o tempo, a temperatura e o nível de torrefação, pois essas podem comprometer as características dessa bebida. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da bebida em razão das características sensoriais do café, submetido a diferentes tratamentos e associadas às variáveis de tempo, temperatura (255, 284, 305 e 355°C) e categoria de torrefação (média clara, média, moderadamente escura e escura). Foram utilizados grãos de café arábica, beneficiados e qualificados previamente como qualidade de exportação, provenientes da beneficiadora de café localizada em Viçosa, MG. Foi utilizado um torrefador cilíndrico com movimento rotativo e com capacidade para 350 g de café cru. A qualidade da bebida de café foi determinada por análise sensorial, realizada por três pessoas com experiência no campo da avaliação do café, aplicando-se o teste da xícara, segundo recomendações da Instrução Normativa n.º 16, de 24 de maio 2010 (BRASIL, 2010). As avaliações dos provadores de café demonstraram que o café de boa qualidade tipo *gourmet* deve ser torrado com nível médio claro até médio, pois nesses níveis foram mantidas as características sensoriais positivas como acidez, doçura e corpo e a negativa de adstringência baixa. As temperaturas de 284, 305 e 335°C do torrefador com tempos 15,7; 12,5; e 9,3 min, respectivamente, foram adequadas para torrar o café até torrefação média clara.

SENSORIAL EVALUATION OF COFFEE QUALITY IN DIFFERENT CONDITIONS OF ROASTING

ABSTRACT: Roasting processes is one of the main factors that contribute to a good standard for acceptance of coffee beverage. Depending on the quality of the coffee roasting desired, the main variables to be controlled are time, temperature and degree of roasting because the same may affect the characteristics of the drink. Thus, the objective was to assess the sensory characteristics of the cup coffee, under different treatments and associating variables of time, temperature (255, 284, 305 and 355° C) and degree of roasting (medium light, moderately dark) in this sensory evaluation. It was used Arabic coffee beans, processed and pre-qualified as export quality, from a processing of coffee located in Viçosa, MG. It was used a roaster with a cylindrical rotary motion and capacity for 350 g of raw coffee. The quality of the coffee beverage was determined by sensorial analysis carried by three persons with experience in the assessment of coffee, applying the test of the cup, following the recommendations of Instruction n.º 16, May 24, 2010 (BRASIL, 2010). Evaluations of coffee tasters showed that a good quality coffee should be roasted to gourmet type with medium light degree, because it held the main features of positive acidity, sweetness and body, keeping low the negative characteristics of astringency. Temperatures of 284, 305 and 335°C in the roaster with time 15.7, 12.5 and 9.3 min respectively, were appropriate for roasting coffee to that degree.

1. INTRODUÇÃO

A torrefação é um dos principais fatores que contribui para a boa qualidade e aceitação da bebida do café. Para se alcançar essa qualidade, as principais variáveis a serem controladas são o tempo e a temperatura de torrefação, pois essas podem comprometer as características dessa bebida.

Para Perez et al. (2008), a torra do café arábica deve ser moderadamente clara a quase média, correspondendo ao ponto de torra entre 60 a 65 no disco Agtron.

Segundo Perez et al. (2008), o café *gourmet* é considerado um café puro, constituído unicamente de café arábica, porque tem características de qualidades positivas, marcantes como doçura própria, classificado como estritamente mole, de tipos 2 a 4, de acordo com a Classificação Oficial Brasileira (COB), com ausência de defeitos pretos, verdes e ardidos e preto-verdes fermentados.

Considerando as transformações sensoriais, o processo da torrefação do café arábica ainda é cientificamente pouco conhecido. As principais características definidas para um teste da xícara são: acidez, amargor, doçura, adstringência e corpo.

Para Moura et al. (2007), os grãos de café de melhor qualidade são aqueles que mantêm o aroma, o corpo, a intensidade de sabor e a torrefação ótima, realizada em menor tempo e maior temperatura, aproximadamente de 215°C em 17,5 min. Entretanto, esses autores mencionaram que o padrão brasileiro de torrefação de café tem se caracterizado por apresentar, em geral, torrefação excessiva, produzindo a cor escura e o sabor amargo, que surgiu, provavelmente, com intenção de mascarar defeitos e impurezas da matéria-prima.

Segundo Schmidt et al. (2008), a torra deve ir até o ponto em que ocorre a pirólise, com a conseqüente liberação de CO₂, e, quando interrompida, a temperatura passa de 210°C. Caso a temperatura alcance 230°C, grande quantidade de óleo recobriria os grãos, reduzindo a aceitação do produto pela população.

A exigência da boa qualidade, na comercialização internacional, promoveu o surgimento de cafés mais nobres no mercado nacional. Segundo o

Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café – CBPDC (2004), a definição dos padrões de qualidade visa satisfazer os mercados interno e externo, que apontam para aumento de 20% na demanda por cafés especiais ou *gourmet*, que são até três vezes mais valorizados que os tradicionais.

Há estudos tentando mensurar as características sensoriais por meio de modelos preditivos para características físicas e químicas. Moura et al. (2007) testaram equipamentos como a língua eletrônica para avaliar diferenças nas torrefações.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade da bebida em razão das características sensoriais do café, submetido a quatro níveis de torrefação e associados às variáveis de tempo e temperatura de torrefação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análise de Qualidade Sensorial, do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

2.1. Matéria-prima

Utilizaram-se grãos de café beneficiados, com tamanho acima da peneira 17, *Coffea arabica* L., variedade Catuaí Vermelho, com teor de água inicial de $0,1386 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$, provenientes de uma unidade beneficiadora de café localizada em Viçosa, MG.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e armazenadas em câmara fria à temperatura em torno de 18°C , a fim de se manterem as características iniciais do produto até sua torrefação.

Antes das operações de torrefação, as amostras foram retiradas da câmara fria e expostas à temperatura ambiente, por aproximadamente 12 horas, visando atingir o equilíbrio térmico, para minimizarem as alterações relacionadas à temperatura.

2.2. Processo de torrefação

Na Figura 1, é apresentado o torrefador utilizado, de queima de gás direto, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com preaquecimento e capacidade de 350 g de café cru. A taxa de consumo do combustível foi constante para manter a temperatura estável no torrefador, durante todo o processo. As temperaturas médias de torrefação foram de 255, 284, 305 e 335°C.



Figura 1 - Torrefador a gás de combustão direta e cilindro rotativo perfurado.

2.3. Determinação da temperatura

Antes de ser iniciada a torrefação, foi feito o preaquecimento de 20 min do torrefador para estabilização da temperatura no interior do cilindro rotativo. O processo de torrefação iniciou-se com temperatura mais baixa (255°C) e aumentou de modo gradativo até chegar à temperatura mais alta (335°C).

A temperatura do torrefador foi medida na parede interna do cilindro, a cada 30 s. Foram necessárias duas leituras para determinar a temperatura média.

Usou-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, à distância de 20 cm entre o medidor e o alvo.



Figura 2 - Medição da temperatura na parede do cilindro rotativo do torrefador.

2.4. Nível de torrefação

Para se obterem os quatro níveis de torrefação nos grãos de café, à mesma temperatura, foi necessário deixar o produto por mais tempo no torrefador até atingir a cor desejada. Um profissional qualificado da área auxiliou os trabalhos durante a torrefação a fim de se conseguir a cor das amostras, de acordo com o padrão da Tabela Agtron.

As torrefações dos grãos foram: média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E), correspondentes a SCAA#65, SCAA#55, SCAA#45 e SCAA#35, respectivamente.

2.5. Avaliação sensorial

A qualidade do café foi determinada por meio da análise sensorial, por três profissionais com ampla experiência no campo da avaliação do café, aplicando-se o teste da xícara, segundo recomendações da Instrução Normativa n.º 16, de 24 de maio 2010 (BRASIL, 2010).

As principais características analisadas foram adstringência, acidez, doçura e corpo da bebida, com pontuação geral na escala de 100 pontos. As amostras foram avaliadas no tempo menor a oito horas, após serem torradas. Utilizou-se uma subamostra de 40 g para o teste, em quatro xícaras por tratamento.

Foram feitas três avaliações, com diferença de uma semana entre essas. As amostras foram codificadas por tratamento de temperatura e qualidade de torrefação (T1Q1, T1Q2, T1Q3 até T4Q4).

Inicialmente, o café foi torrado e classificado como estritamente mole.



Figura 3 - Avaliação sensorial de café com diferentes níveis de torrefação.

2.6. Análise estatística

No total, foram feitos 16 tratamentos repetidos, em três avaliações, com a diferença de uma semana entre essas.

O experimento foi realizado em um esquema de parcelas subdivididas, em avaliações casualizadas, tendo nessas parcelas as temperaturas 255, 284, 305 e 335°C. Nas subparcelas, as torrefações com a qualidade da cor dos grãos foram média clara (MC), média (M), moderadamente (ME) e escura (E). Os dados foram submetidos à análise de variância e, para a comparação de médias, utilizou-se o teste de Tukey, a 5% de probabilidade, usando o programa Sistema para Análises Estatísticas (SAEG). Na análise de regressão, foi usado o coeficiente de determinação r^2 .

3. RESULTADOS

3.1. Características sensoriais da bebida

De acordo com a Tabela 1, observou-se que a avaliação sensorial diferenciou a qualidade da bebida em pelo menos duas categorias, segundo as características sensoriais positivas de acidez, doçura e corpo para o mesmo tipo de café, variando o nível de torrefação nos grãos.

A característica sensorial da adstringência diminuiu a qualidade da bebida. Para perceber a diferença significativa na avaliação da adstringência, foram necessárias diferenças com valores maiores que 1 na pontuação.

Na Tabela 1, evidencia-se que em duas avaliações a adstringência foi classificada em pelo menos dois diferentes níveis; a máxima sensação da adstringência foi obtida para os índices de torrefação escuros e a mínima sensação para os índices claros. Na segunda avaliação, não foi percebida nenhuma diferença significativa entre as amostras. Segundo os provadores, no mesmo tipo de café o nível de adstringência será semelhante.

Tabela 1 - Qualidade da bebida de café, em três avaliações, segundo as características sensoriais, pelo teste da xícara, para diferentes torrefações¹

Torrefação	A1	A2	A3
		Adstringência	
Média clara	2,92 b	2,92 a	1,75 c
Média	3,08 b	2,92 a	2,75 b
Moderadamente escura	4,92 a	2,67 a	3,25 ab
Escura	4,83 a	3,25 a	3,58 a
		Acidez	
Média clara	4,67 a	4,00 a	4,00 a
Média	4,17 ab	3,50 ab	3,42 a
Moderadamente escura	3,67 b	2,75 ab	2,50 b
Escura	3,67 b	2,42 b	2,25 b
		Doçura	
Média clara	3,83 a	4,17 a	4,42 a
Média	3,75 ab	3,58 ab	3,50 ab
Moderadamente escura	3,00 bc	2,50 b	2,33 c
Escura	2,33 c	2,25 b	2,83 bc
		Corpo	
Média clara	4,33 a	4,58 a	4,67 a
Média	3,92 ab	3,58 ab	4,08 ab
Moderadamente escura	3,42 ab	2,92 b	3,42 b
Escura	3,17 b	2,92 b	3,33 b

¹ As medias seguidas por pelo menos a mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Para se obterem amostras de café com torrefações moderadamente escura e escura, foi preciso deixar mais tempo o café no torrefador. O intervalo de tempo entre ambos os níveis não superaram os 3 min no torrefador nas temperaturas utilizadas; portanto, para se perceberem diferenças na adstringência entre as amostras, o café precisou ficar mais de 3 min no torrefador.

Em relação à característica acidez, observou-se que o maior valor foi para as amostras com a qualidade média clara. Baggenstoss (2008) encontrou que essa característica não teve diferença quando foi torrada a diferentes temperaturas.

O máximo valor da característica doce foi identificado na torrefação média clara. O valor mínimo foi associado principalmente às amostras com torrefação escura, assim como a moderadamente escura. Segundo Pérez et al. (2008), o café tipo *gourmet* normalmente tem doce própria e não se recomenda ultrapassar da torra média.

A máxima pontuação para a característica corpo da bebida foi associada à torra média clara e a mínima, à escura. Em todas as avaliações feitas, observou-se que foi a característica com maior pontuação.

Nesta pesquisa, as variáveis de acidez, doce e corpo diminuíram significativamente com efeitos negativos para torras mais escuras, o que concorda com Moura et al. (2007), os quais encontraram que o aumento linear do tempo e o da temperatura apresentaram efeitos negativos ao aroma, ao sabor e à doce.

O menor valor de temperatura registrado da massa de grãos no final da torrefação foi de 233°C, para os cafés tipo moderadamente escuro, e 240°C, para o escuro. Portanto, os cafés de boa qualidade, tipo *café especial ou gourmet*, não podem ultrapassar os 233°C durante a torrefação, em razão da diminuição da pontuação geral da bebida pela adstringência percebida.

A menor perda de massa associada à torra moderadamente escura foi de 18,4% e a máxima, de 19,9%; portanto, o café perde características sensoriais positivas quando há perda de massa acima de 18,4%.

3.2. Pontuação geral

Na Tabela 2, nota-se que os avaliadores deram maior pontuação aos grãos com torrefação média clara. Na comercialização, esse café é considerado como *especial*, pois a média das avaliações foi superior a 80 pontos.

A diferença superior a três pontos na avaliação global da qualidade da bebida do café é suficiente para classificar os grãos com diferente índice de torrefação, segundo os dados da Tabela 2.

Foi evidenciado que o café perdeu as características sensoriais significativamente quando passou da torrefação média clara à moderadamente escura.

Para o café com torrefação média, na primeira e na segunda avaliação foram percebidas características semelhantes à torrefação média clara; a terceira avaliação foi percebida como significativamente diferente na pontuação. Foi concluído que quando há a torrefação média é que se encontra o limite das características sensoriais adequado para a boa bebida de café.

Tabela 2 - Pontuação geral da qualidade da bebida do café, em três avaliações, pelo teste da xícara, em torrefações média clara (MC), média (M), moderadamente escura (ME) e escura (E) ¹

Torrefação	A1	A2	A3
MC	79,92 a	80,67 a	81,33 a
M	78,75 a	77,75 ab	78,25 b
ME	75,17 b	74,75 b	75,00 c
E	74,33 b	74,25 b	74,83 c

¹ As médias seguidas por pelo menos a mesma letra minúscula, nas colunas, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Não se encontrou diferença significativa entre os cafés com índices de torrefação moderadamente escuro e escuro. As amostras com esses tipos de torras foram as que tiveram a menor pontuação na qualidade da bebida.

3.3. Efeito do tempo e da temperatura de torrefação

Na Figura 4, observa-se que os grãos com índice de torrefação médio claro foram os de maior pontuação pelos provadores, para as temperaturas de 284, 305 e 335°C e os tempos de 15,7; 12,5; e 9,3 min, respectivamente. Entretanto, a menor avaliação geral da qualidade da bebida foi a 255°C e com a torrefação escura, obtida em 31,7 min.

A pontuação diminuiu quando a amostra ficou mais tempo no torrefador e essa redução está relacionada de forma linear com a temperatura do torrefador, pois a maior temperatura do torrefador irá diminuir mais rápido a

pontuação da amostra em 3,3 pontos/min; a menor temperatura diminui em proporção baixa de 0,65 pontos/min.

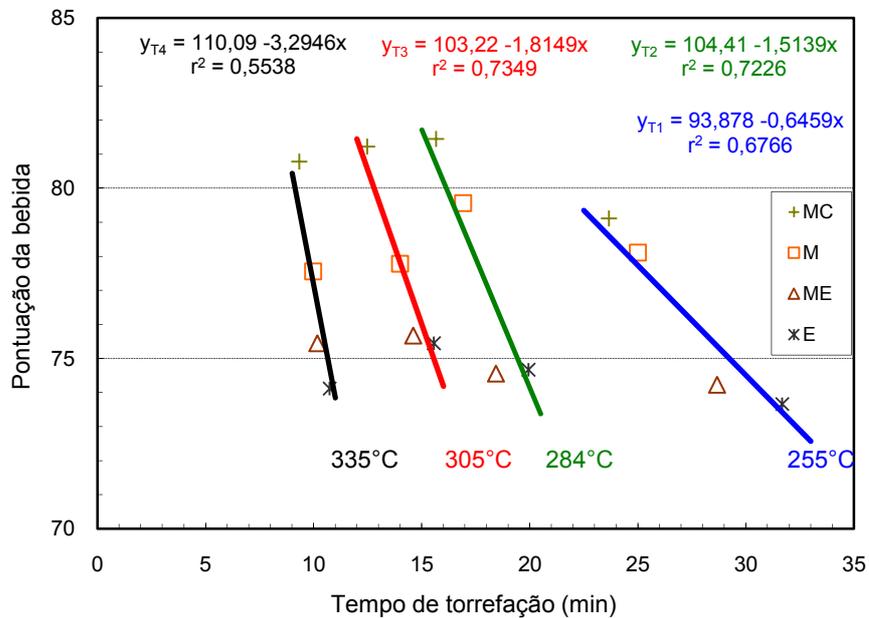


Figura 4 - Pontuação geral da qualidade da bebida de café em relação ao tempo e à temperatura de torrefação.

Encontrou-se que a máxima avaliação, pelo teste da xícara, foi para os grãos com torrefação média clara, à temperatura de 284°C, com 83 pontos, o que está de acordo com o café tipo *gourmet*, corroborando a avaliação do início do café cru e com o preço desse.

A aparência geral da massa de grãos foi desuniforme a 335°C do torrefador, pois alguns grãos apresentaram diversos índices de torrefação na mesma amostra; no entanto, a bebida foi avaliada de boa qualidade. Notou-se especificamente na primeira avaliação que nessa temperatura, em 9,5 min, foram obtidos 82,7 pontos para a torrefação média clara.

Na Figura 5, observa-se que o melhor ajuste foi quadrático para as torrefações média clara, média e escura, que obtiveram R² de 0,9951; 0,596 e 0,7263, respectivamente. As amostras que obtiveram boa pontuação geral na qualidade da bebida de café foram obtidas a temperaturas entre 335 e 284°C,

associadas aos tempos entre 9,3 e 15,7 min, respectivamente; depois de 16 min diminuiu a qualidade da bebida.

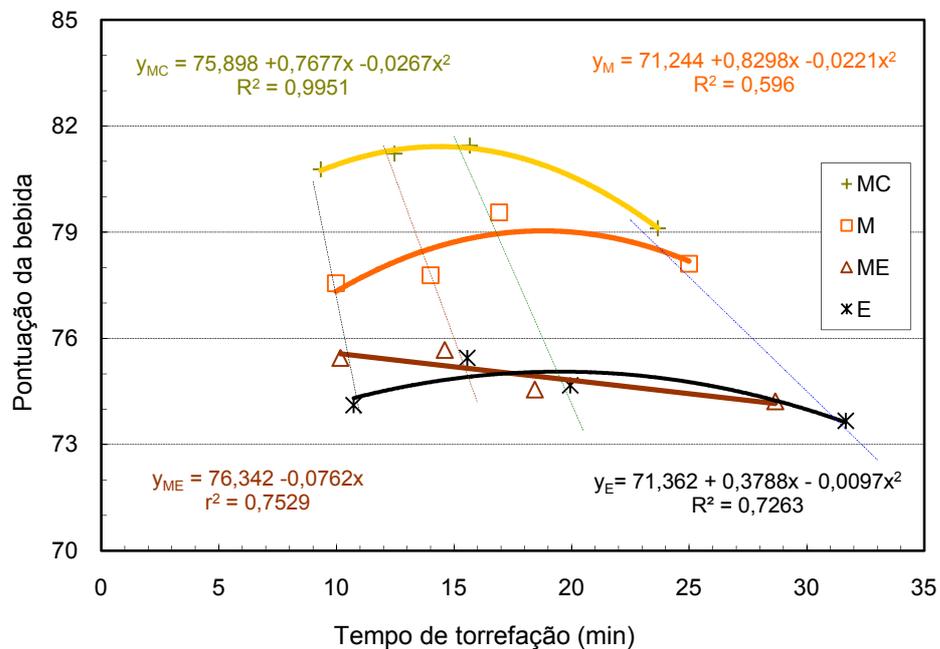


Figura 5 - Pontuação geral da qualidade da bebida de café em relação ao tempo e nível de torrefação dos grãos.

Os grãos moderadamente escuros ajustaram linearmente a relação entre a pontuação geral da bebida e o tempo de torrefação, com valor médio de 75 pontos.

Na Figura 6, é apresentado que foi possível a relação da adstringência no tempo de torrefação para a temperatura de 284°C, com a equação linear com r^2 de 0,6549. Moura et al. (2007) tentaram fornecer modelos preditivos para as características sensoriais com variáveis de tempo e temperatura de torrefação; entretanto, não foi possível para a adstringência, estabelecendo respostas preditivas nas características de doçura e amargor.

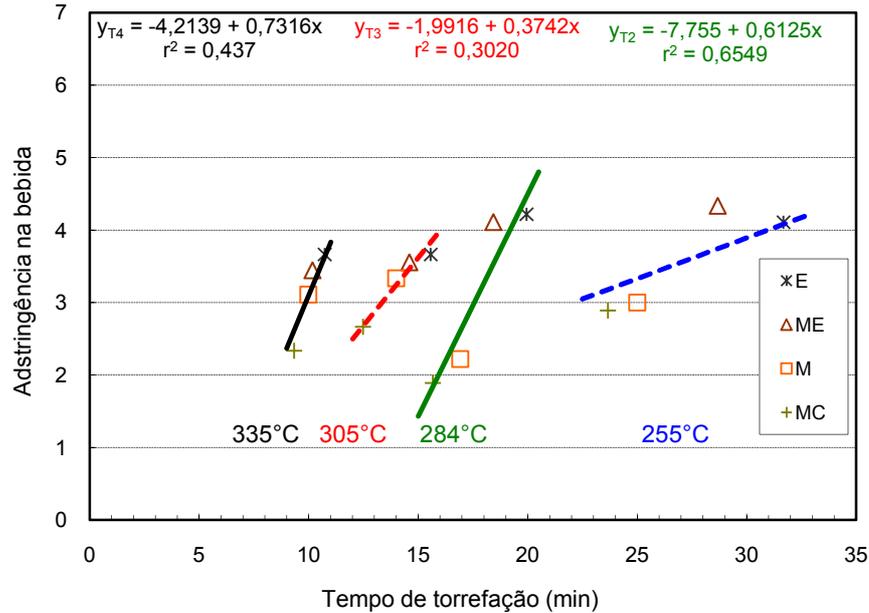


Figura 6 - Característica adstringência na qualidade da bebida do café em relação ao tempo e à temperatura de torrefação.

Observou-se que a adstringência aumentou nas amostras, quando essas ficaram mais de 4 min no torrefador, a 284°C, passando de média clara a escura. Para essa temperatura de torrefação, notou-se no perfil térmico das amostras que a temperatura da massa dos grãos, associada nessas qualidades de torra, foi em 15,7 min a 228°C e em 19,9 min a 250°C, em perdas de massa de 15,8 e 20,5%, respectivamente.

A menor sensação de adstringência foi percebida nas amostras torradas a 284°C para qualidade média clara. Nessa temperatura, conseguiu-se diferenciar a adstringência por aproximadamente 2 pontos entre os índices de torrefação; entretanto, nas outras temperaturas, não ultrapassaram essa diferença.

A característica adstringência foi difícil de diferenciar. Nas avaliações feitas, não se obtiveram diferenças significativas entre os tratamentos. Na Figura 6, o ajuste da equação foi baixo, mas é um dos primeiros avanços no desenvolvimento da percepção dessa característica, que pode ser associada à cor dos grãos, à perda de massa, ao tempo e à temperatura de torrefação.

Na Figura 7, é observada que a característica acidez só foi possível quando obteve-se a equação com coeficiente de determinação baixo, r^2 de 0,5563, à temperatura de 255°C no torrefador; nas outras regressões, foram menores a 0,30 e não foram consideradas na análise.

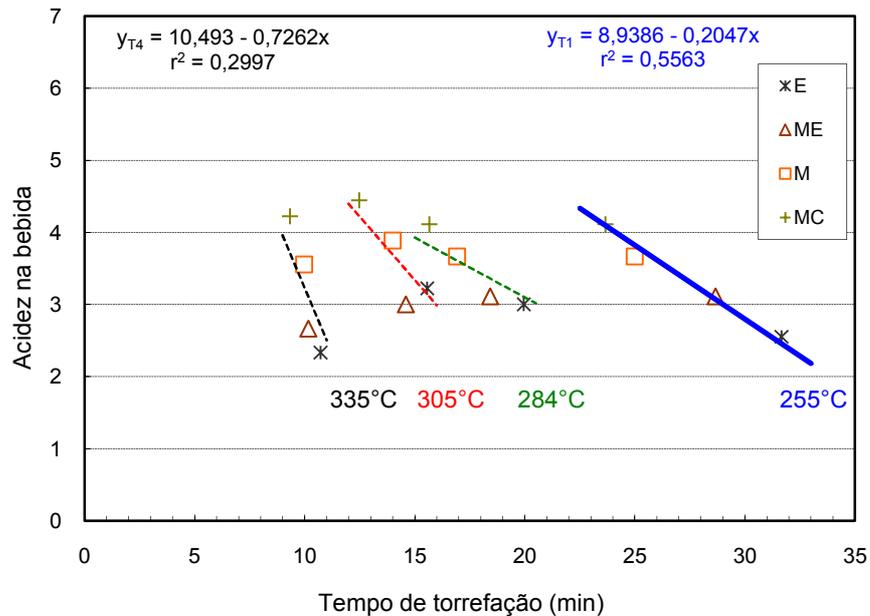


Figura 7 - Característica acidez na qualidade da bebida de café em relação ao tempo e à temperatura de torrefação.

A acidez foi avaliada com aproximadamente 4 pontos nos tratamentos tipo médio claro e não variou com a temperatura do torrefador. O resultado está de acordo com Schenker (2000), o qual determinou que a característica acidez não variou quando se aplicaram duas temperaturas bem diferenciadas no torrefador para o mesmo grau de torrefação.

Os cafés brasileiros são caracterizados pela menor percepção da acidez do que os lavados da América Central, que se fazem notar por maior percepção de acidez e intensidade do aroma (ILLY; VIANY, 1995).

De acordo com a Figura 8, é possível obterem-se equações lineares para a relação da característica doçura na bebida com o tempo e a temperatura de torrefação. O melhor ajuste com r^2 de 0,7075 foi a 255°C no torrefador.

A característica doçura nas avaliações feitas foi a mais estável na torrefação, obtendo-se a média de 4 pontos para a torrefação média clara. As amostras mantiveram-se a diferença na avaliação menor a 2 pontos.

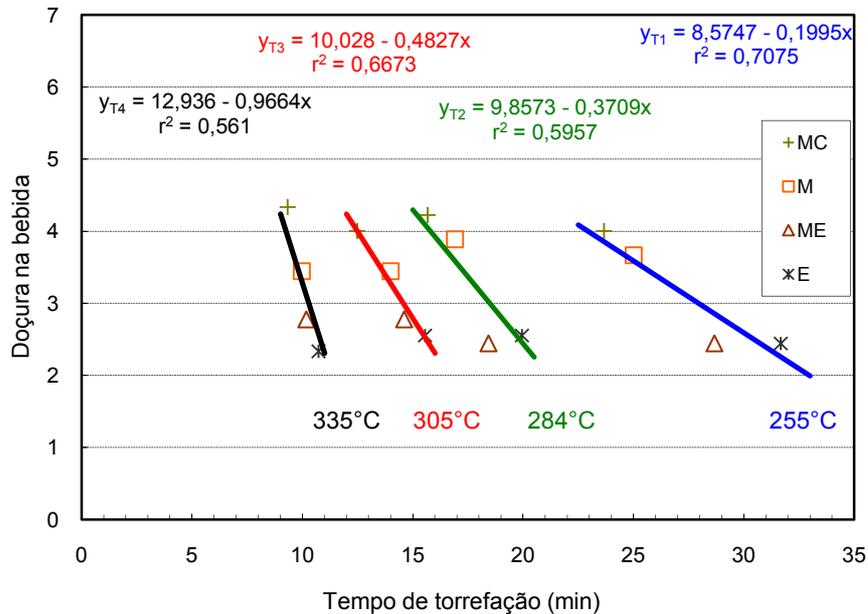


Figura 8 - Característica doçura na qualidade de bebida do café em relação ao tempo e à temperatura de torrefação.

Na Figura 9, é apresentada a característica corpo em relação ao tempo. As relações lineares correspondem a cada temperatura de torrefação. O corpo é a característica com maior pontuação, 5, a 284°C. Segundo Illy e Viani (1995), essa característica é valorizada em cafés brasileiros.

Neste estudo, a característica corpo nos testes da xícara foi semelhante entre as amostras obtidas a 284, 305 e 335°C, em contraste com as obtidas a 255°C, em que essa característica diminuiu a qualificação da bebida. A máxima adstringência foi associada à torrefação escura a 255°C, que teve mais tempo de torrefação.

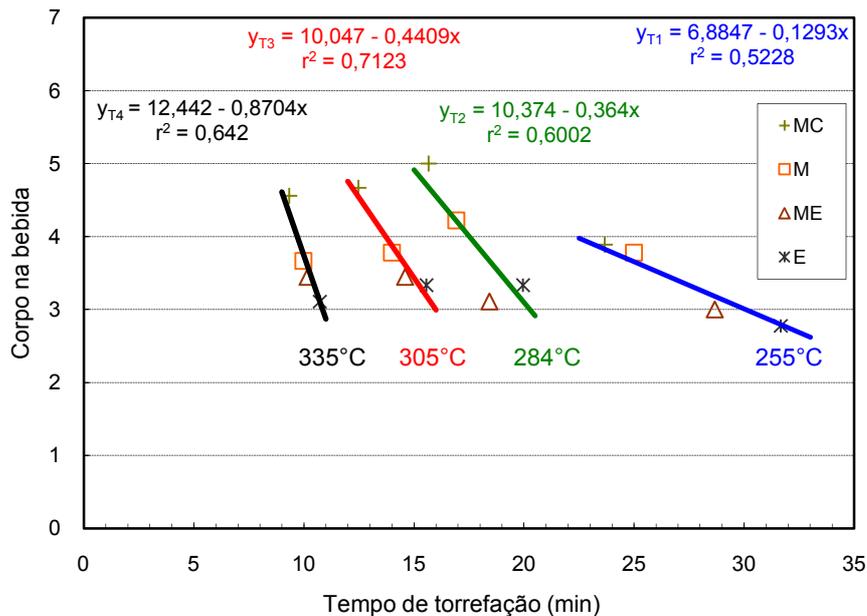


Figura 9 - Característica corpo na qualidade de bebida do café, em relação ao tempo e à temperatura de torrefação.

3.4. Efeito do índice de torrefação

Nas amostras de café com torrefação média clara, cumpriu-se que pelo menos um avaliador deu a pontuação acima de 80 pontos na prova da xícara. Encontrou-se que a máxima avaliação pelo teste da xícara foi com 83 pontos na terceira avaliação, para a torrefação média clara com temperatura de 284°C no torrefador. As características acidez, doçura, corpo e adstringência foram avaliadas como ótimas quando a perda de massa total foi de 15%, o tempo de 15,7 min e a pontuação geral de 80,6.

Na temperatura de torrefação de 335°C, observaram-se claramente as diferenças entre as características acidez, doçura e corpo, que decresceram segundo o tempo de torra; essas características positivas são necessárias para classificar a boa qualidade da bebida do café. Notou-se que o valor de adstringência aumentou com o maior tempo de torrefação, principalmente nas qualidades moderadamente escura e escura.

A média geral da pontuação, segundo a torrefação dos grãos de café foi de 80,6 pontos, para média clara; 78,3, para média; 75,0, moderadamente

escura; e, finalmente, 74,5, para escura. Segundo a pontuação da bebida para o café estudado, há uma ordem geral descendente pela coloração (média clara, média, moderadamente escura e escura) em cada temperatura, o que tem relação direta com o tempo de torrefação.

Segundo as avaliações dos provadores, em relação à qualidade da bebida do café, esses consideram que o café especial precisa da torrefação média clara até a média.

4. CONCLUSÕES

Segundo as avaliações dos provadores de café, dos quatro níveis de torrefação, o que melhor se adequou para o café tipo especial foi o tipo médio claro, pois esse manteve as características positivas de acidez, doçura e corpo.

Determinou-se que a torrefação feita à temperatura elevada e que permite tempo inferior a 15,8 min é recomendada para a boa pontuação geral das amostras. A torrefação média estabelece um limite de boa qualidade para tempos inferiores a 17 min.

À temperatura de 284°C no torrefador, obtiveram-se o mínimo valor de adstringência, a máxima avaliação de corpo, a doçura própria e a acidez adequada nas amostras.

O menor valor da característica adstringência foi associado às amostras que ficaram menos tempo no torrefador.

A pontuação geral da bebida e o índice de torrefação dos grãos foram classificados em ordem decrescente do tempo, resultando uma ordem de boa qualidade em médio claro, médio, moderadamente escuro e escuro.

Estabeleceram-se equações de regressão para representar as características sensoriais como adstringência, acidez, doçura e corpo, em razão do tempo e da temperatura de torrefação.

5. REFERÊNCIAS

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 16, de 24 de maio de 2010. **Regulamento técnico para o café torrado em grão e para café torrado e moído**. Diário Oficial da União n.º 98, seção 1, 2010.

CONSÓRCIO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO CAFÉ – CBPDC. **Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café**. Brasília, 2004.

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

MOURA, S.C.S.R.; GERMER, S.P.M.; ANJOS, V.D.A.; MORI, E.E.M.; MATTOSO, L.H.C.; FIRMINO, A.; NASCIMENTO, C.J.F. Influência dos parâmetros de torração nas características físicas, químicas e sensoriais do café arábica puro. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 10, n. 1. p. 17-25, 2007.

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.

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

SCHMIDT; C.; MIGLIORANZA, E.; PRUDÊNCIO, S. Interação da torra e moagem do café na preferência do consumidor do oeste paranaense. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1111-1117, 2008.

CONCLUSÃO GERAL

Nesta pesquisa, utilizou-se um mesmo cilindro de torrefador, com 45 rev min⁻¹. Em cada torrefação, a amostra foi com 350,0 g de café cru e o mesmo teor de água inicial; o produto foi de qualidade estritamente mole tipo *gourmet*, por meio dessas condições:

Determinou-se que numa temperatura do torrefador o aquecimento da massa de grãos seguiu o mesmo perfil de temperatura. No início, a temperatura dessa massa, em relação ao tempo, pode ser representado por uma equação logarítmica e, ao final da torrefação, por uma linear. Para cada temperatura do torrefador foi correspondido um perfil de temperatura.

Estabeleceu-se uma relação diretamente proporcional entre a temperatura do torrefador e a da massa de grãos, no final da torrefação, quando os grãos atingiram o mesmo índice de torrefação, a diferentes temperaturas do torrefador.

Encontrou-se, em relação às temperaturas do torrefador, que partir de 284°C essas foram adequadas para torrefação dos grãos, quando a temperatura na massa de grãos atingiu valores entre 228 e 245°C. As amostras foram avaliadas com os máximos valores na pontuação geral da bebida.

Observou-se que, em relação aos índices de torrefação, os grãos médio claros foram os que receberam melhor pontuação pelos provadores no teste da xícara. Os grãos mantiveram as características sensoriais com níveis ótimos de

doçura, acidez e corpo; no entanto, foram percebidos níveis baixos de adstringência na bebida.

Evidenciou-se que, ao elevar a temperatura no torrefador, houve aumento na taxa de aquecimento dos grãos, o que acelerou a perda de massa no produto. As taxas altas de aquecimento foram associadas à maior expansão dos grãos, durante a torrefação; portanto, para a maior temperatura do torrefador, obtiveram-se altos índices de expansão volumétrico aparente e unitário. Os dois efeitos, de perda de massa seca e de expansão, influíram na diminuição da massa específica aparente e unitária dos grãos torrados nessas condições. Notou-se que, para a qualidade do grão cru, estritamente mole, não se recomenda perda de massa superior a 16%, durante a torrefação, que foi diretamente associada à torra média clara, correspondendo numa razão de matéria seca de $0,946 \text{ kg}_{\text{ms}} \text{ kg}_{\text{ms0}}^{-1}$, com expansão da massa de grãos entre 50 e 68%. A expansão unitária foi de 45 a 55%; a massa específica aparente, de 365 kg m^{-3} ; a massa específica unitária, de 650 kg m^{-3} ; e a porosidade de, aproximadamente, 45% na massa de grãos torrados.

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.

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

BAGGENSTOSS, J.; POISSON, L.; LUETHI, R.; PERREN, R.; ESCHER, F. Influence of water quench cooling on degassing and aroma stability of roasted coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, p. 6685-6691, 2007.

BAGGENSTOSS, J.; POISSON, L.; KAEGI, R.; PERREN, R.; ESCHER, F. Roasting and aroma formation: effect of initial moisture content and steam treatment. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, p. 5847-5851, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n.º 16, de 24 de maio de 2010. **Regulamento técnico para o café torrado em grão e para café torrado e moído**. Diário Oficial da União n.º 98, seção 1, 2010.

CLARKE, R.J.; MACRAE, R. **Coffee**. London: Elsevier Applied Science, 1989. v. 2, 321 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: safra café. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conab/web/download/safra/2_levantamento_2010.pdf>. Acesso em: 04 jun. 2010.

CONSÓRCIO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO DO CAFÉ – CBPDC. **Programa Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Café**. Brasília, 2004.

CORTEZ, J.G. **Efeito de espécies e cultivares e do processamento agrícola e industrial nas características da bebida do café**. 2001. 71 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

DEBOÇÃ, L.P.; SANTOS, J.A.; REZENDE, A.M. Mercado de café torrado e moído: um estudo de caso. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. especial, n. 8, p. 54-58, 2004.

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.

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.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acesso em: 4 jun. 2010.

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, 2002a.

FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; CORRÊA, P.C. Estudo da adequação de modelos semi-empíricos para descrever a variação do teor de umidade e voláteis durante o processo de torrefação de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. especial, n. 4, p. 26-31, 2002b.

FRANÇA, A.S.; OLIVEIRA, L.S.; MENDONÇA, J.C.F.; SILVA, X.A. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, v. 90, p. 89-94, 2005.

GEIGER, R. **Development of coffee bean structure during roasting: investigations on resistance and driving forces**. 2004. Tese (Doutorado) – Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, Zurique, Suíça.

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.

HERNÁNDEZ, J.A.; HEYD, B.; TRYSTRAM, G. On-line assessment of brightness and surface kinetics during coffee roasting, **Journal of Food Engineering**, v. 87, p. 314-322, 2008.

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, 2004. p. 1004.

MAYOR, L.; SERENO, A.M. Modeling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 373-386, 2004.

MENDONÇA, J.C.; FRANÇA, A.; OLIVEIRA, L.; CORRÊA, P.C. Estudo preliminar de caracterização física e química de grãos defeituosos de café (PVA) antes e após a torra. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. especial, n. 7, p. 44-49, 2003.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plants and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 730 p.

MOREIRA, S.M.C.; CHAVES, M.A.; OLIVEIRA, L.M. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 9-10, n. 1-2, p. 22-24, 1985.

MOURA, S.C.S.R.; GERMER, S.P.M.; ANJOS, V.D.A.; MORI, E.E.M.; MATTOSO, L.H.C.; FIRMINO, A.; NASCIMENTO, C.J.F. Influência dos parâmetros de torração nas características físicas, químicas e sensoriais do café arábica puro. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, v. 10, n. 1. p. 17-25, 2007.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. Physical changes during coffee roasting in rotary conduction-type heating units. **Journal of Food Process Engineering**, v. 26, p. 543-548, 2003.

NAGARAJU, V.D.; MURTHY, C.T.; RAMALAKSHMI, K.; RAO, P.N.S. Studies on roasting of coffee beans in a spouted bed. **Journal of Food Engineering**, v. 31, n. 2, p. 263-270, 1997.

NICOLI, M.; ANESE, M.; MANZOCCO, L.; LERICI, C.R. Antioxidant properties of coffee brews in relation to the roasting degree. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 30, p. 292-297, 1997.

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.

PITTIA, P.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C.R. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

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

SCHMIDT, C.; MIGLIORANZA, E.; PRUDÊNCIO, S. Interação da torra e moagem do café na preferência do consumidor do oeste paranaense. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1111-1117, 2008.

SILVA, G.V. **Degustação de café torrado e moído**: mapeamento do processo de torra. Brasília: MAPA, 2011. (Apostila do Curso de Qualificação de Classificadores de Café).

SIVETZ, M. **Coffee processing technology**. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, 1963. v. 2, 379 p.

SIVETZ, M.; DESROSIER, N.W. **Coffee technology**. Westport, Connecticut: AVI Publishing Company, 1979. 716 p.