

FERNANDA MACHADO BAPTESTINI

**EFEITO DA GRANULOMETRIA E DA EMBALAGEM NA SORÇÃO
DE ÁGUA PELO CAFÉ TORRADO E MOÍDO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2011

FERNANDA MACHADO BAPTESTINI

**EFEITO DA GRANULOMETRIA E DA EMBALAGEM NA SORÇÃO
DE ÁGUA PELO CAFÉ TORRADO E MOÍDO**

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

APROVADA: 19 de julho de 2011

Adélia Aziz Alexandre Pozza

Evandro de Castro Melo

Paulo Cesar Corrêa
(Orientador)

Aos meus pais, João e Luzia.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido saúde, força para a conclusão deste trabalho e por ter colocado pessoas maravilhosas em minha vida.

Aos meus pais pelo amor, amizade e incentivo e por sempre terem trabalhado para que eu e meus irmãos fôssemos pessoas dignas.

Aos meus irmãos pela amizade, carinho e apoio.

Ao professor Paulo Cesar Corrêa, pela orientação, conselhos, ensinamentos, oportunidade e apoio para que eu conseguisse concluir esta importante etapa de minha formação pessoal e profissional.

Aos professores Paulo Roberto Cecon e Nilda de Fátima Ferreira Soares, pelo auxílio e sugestões.

Aos amigos pela amizade sincera e irrestrita, incentivo e disponibilidade na condução dos trabalhos.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), pela amizade e ajuda na realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela ajuda na realização deste trabalho.

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

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que de alguma forma contribuíram para que essa importante etapa de minha vida se realizasse.

BIOGRAFIA

FERNANDA MACHADO BAPTESTINI, filha de João Baptistini e Luzia Machado Baptistini, nasceu em Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, em 17 de janeiro de 1984.

Em março de 2004, iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, graduando-se em julho de 2009. No período de setembro de 2007 a junho de 2009, foi bolsista Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico atuando no laboratório de Propriedades Físicas e Avaliação de Qualidade.

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

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
INTRODUÇÃO GERAL	1
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	7
CAPÍTULO 1	10
RESUMO	10
ABSTRACT	11
1.1. INTRODUÇÃO	12
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	16
1.2.1. Matéria-Prima	16
1.2.2. Processo de torrefação	16
1.2.3. Moagem	17
1.2.4. Teor de água	18
1.2.5. Isotermas de sorção	18
1.2.5.1. Propriedades termodinâmicas da sorção de água	19
1.2.6. Análise estatística	23
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
1.4. CONCLUSÕES	35
1.5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	36
CAPÍTULO 2	40
RESUMO	40
ABSTRACT	41
2.1. INTRODUÇÃO	42
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	46
2.2.1. Matéria-Prima	46
2.2.2. Processo de torrefação	46
2.2.3. Moagem	47
2.2.4. Embalagem e armazenagem	47
2.2.5. Teor de água	48
2.2.6. Atividade de água	48

2.2.7. Massa específica unitária.....	48
2.2.8. Avaliação da cor.....	49
2.2.9. Análise sensorial.....	50
2.2.10. Análise estatística.....	50
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
2.3.1. Teor de água.....	52
2.3.2. Atividade de água.....	55
2.3.3. Massa específica unitária.....	57
2.3.4. Avaliação da cor.....	61
2.3.4.1. Evolução da coordenada L [*]	61
2.3.4.2. Evolução da coordenada a [*]	63
2.3.4.3. Evolução da coordenada b [*]	66
2.3.4.4. Diferença total de cor.....	68
2.3.5. Análise sensorial.....	69
2.4. CONCLUSÕES.....	76
2.5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	77
CONCLUSÃO GERAL.....	79
ANEXO.....	81

RESUMO

BAPTESTINI, Fernanda Machado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2011. **Efeito da granulometria e da embalagem na sorção de água pelo café torrado e moído.** Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Coorientadores: Paulo Roberto Cecon e Nilda de Fátima Ferreira Soares.

Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da granulometria e da embalagem na sorção de água pelo café torrado e moído. Foram utilizados grãos de café arábica com teor de água inicial de $0,1234 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$, torrados no ponto de torra médio, com perda de massa de 17%, tendo sido estabelecido quatro níveis granulométricos: grão inteiro, grossa, média e fina. Para a obtenção das isotermas de sorção da água e das propriedades termodinâmicas, foram analisadas diferentes condições de temperatura e umidade relativa, variando entre 25 e 30 °C e de 0,3 a 0,8 (decimal), respectivamente. Para a etapa de armazenamento, o café torrado e moído, nos diferentes níveis granulométricos especificados a cima, foram acondicionados em embalagens de dois diferentes tipos de filmes: PEBD/PP (embalagem 1) e PET/BOPP metalizado (embalagem 2) e armazenados em câmara tipo BOD a 25 °C. A cada 30 dias eram feitas as seguintes análises: teor de água, atividade de água, massa específica unitária, avaliação da cor e análise sensorial. O modelo de Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos; o teor de água de equilíbrio do café torrado é diretamente proporcional à umidade relativa do ar ambiente e decresce com o aumento de temperatura para um valor de umidade relativa; com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia liberada pela sorção da água no produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de sorção; com a redução do teor de água, ocorre aumento dos valores da entropia diferencial de sorção, sendo que, para um mesmo teor de água, a entropia diferencial do café torrado no nível granulométrico fina foi maior que do no nível média e grossa, respectivamente, devido à maior superfície específica; a teoria da compensação entalpia-entropia pode ser

satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção, sendo controlado pela entalpia; os tipos de filmes utilizado na composição do material das embalagens não afetaram a qualidade final do café torrado nos diferentes níveis granulométricos; o teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens não ultrapassou os limites estabelecidos pela legislação brasileira; a atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos aumentou ao longo do armazenamento na embalagem 1, e na embalagem 2, ela diminuiu pela presença de válvula; a massa específica unitária não foi sensível ao aumento do teor de água do café torrado; o café torrado escureceu ao longo do armazenamento; o café torrado e moído nos diferentes níveis granulométricos e armazenado em dois tipos de embalagens enquadra-se na categoria *gourmet*, mantendo as características positivas de acidez, doçura e corpo.

ABSTRACT

BAPTESTINI, Fernanda Machado, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, June 2011. **Effect of granulometry and packaging on water sorption by roasted and ground coffee.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa. Coadviser: Paulo Roberto Cecon and Nilda de Fátima Ferreira Soares.

The objective of this study was to evaluate the effect of granulometry and types of packaging on the water sorption by roasted and ground coffee. Arabica coffee grains were utilized with an initial water content of $0.1234 \text{ kg}_w \text{ kg}_{dm}^{-1}$, roasted until the medium roast point, with a weight loss of 17%, in which four granulometric levels were established: whole grains and thick, medium and thin granulometries. To obtain the water sorption isotherms and the thermodynamic properties, different conditions of temperature and relative humidity were analyzed, ranging between 25 to 30 °C and 0,3 to 0,8 (decimal), respectively. In the storage stage, roasted and ground coffee in the above specified granulometries were packaged with two different types of films: LDPE/PP (Package 1) and PET/metalized BOPP (Package 2), and stored in a BOD chamber at 25 °C. Every 30 days, were performed the following analysis: moisture content, water activity, unitary density, color evaluation and sensorial analysis. Copace model was the one that better represented the hygroscopic equilibrium for sorption in roasted coffee, for all granulometric levels; the equilibrium moisture content of roasted coffee is directly proportional to the relative humidity of ambient air and decreases when increasing the temperature for a relative humidity value; with the reduction in moisture content, the energy released by product water adsorption increases, represented by integral isosteric heat of sorption values; by reducing the moisture content, values of differential entropy of adsorption increase, and for the same moisture content, the differential entropy for roasted coffee in thin granulometry was higher than for the coffee in medium and thick granulometry, due to a higher specific surface; the theory of enthalpy-entropy compensation can be satisfactorily applied to the sorption phenomenon, being

controlled by enthalpy. The types of films used in the composition of packaging material did not affect the final quality of roasted coffee for all granulometric levels; the moisture content of roasted coffee did not exceed the limits established by Brazilian legislation for all granulometric levels and both types of packaging; the water activity for roasted coffee in all granulometric levels increased during storage in package 1, and in the package 2 it decreased due to the presence of a valve; the unitary density was not sensitive to the increase in roasted coffee moisture content; the roasted coffee became darker during storage; the roasted and ground coffee stored in two types of packaging with different granulometries fits into gourmet category, keeping the positive characteristics of acidity, sweetness and body.

INTRODUÇÃO GERAL

O café é um dos mais importantes produtos agrícolas do Brasil devido ao seu elevado retorno econômico proveniente das exportações e de sua industrialização, bem como ao grande número de empregos diretos e indiretos relacionados à sua cadeia produtiva. As duas espécies mais importantes quanto ao valor comercial são a *Coffea arabica* (café arábica) e a *Coffea canephora* (café robusta). O café arábica é mais fino, resultando em bebida de qualidade superior, com aroma e sabor de maior apreciação pelo consumidor, já o robusta, por apresentar maior teor de sólidos, é indicado para a produção de café solúvel, podendo também ser usado na formação de *blends* com o café arábica, com a finalidade de conferir mais corpo à bebida e diminuir a acidez da mistura (ABIC, 2010).

Segundo o último boletim da Associação Brasileira da Indústria de Café (ABIC, 2011), sobre os indicadores da indústria de café no Brasil em 2010, o consumo per capita de café torrado foi de 4,81 kg, quase 81 L para cada brasileiro por ano, registrando evolução de 3,5% em relação ao período anterior. Aproximando-se assim à Alemanha cujo consumo é de 5,86 kg/hab ano e ultrapassando os índices da Itália e da França. No entanto, está muito aquém do consumo dos países nórdicos, como Finlândia, Noruega e Dinamarca, que tem um volume próximo de 13 kg/hab ano.

O café é a bebida mais consumida no mundo depois da água. Sua popularidade não é baseada no valor nutricional ou nos benefícios potenciais para a saúde, mas, sim no seu efeito estimulante ou simplesmente pelo sabor característico (BAGGENSTOSS, 2008). No entanto, além da cafeína, o café possui minerais, aminoácidos, proteínas, lipídeos, açúcares e polissacarídeos. O ácido clorogênico é mais um componente que, nos últimos anos, vem sendo muito estudado pelas suas propriedades antioxidantes.

A qualidade final da bebida do café depende de uma série de variáveis, incluindo desde a produção do grão até o seu processamento, como as técnicas de produção, tipo de processamento, temperatura de secagem, beneficiamento,

condições e tempo de armazenamento, torrefação, moagem e embalagem, além de atributos territoriais, como solo, altitude e clima, entre outros (CAIXETA, 1999; MELO, 2004; BAGGENSTOSS, 2008).

O café torrado e moído é susceptível à perda de qualidade pela exposição ao oxigênio, à luz, à umidade e a temperaturas elevadas. A oxidação das substâncias responsáveis pelo aroma e sabor e a oxidação de lipídios contidos no café levam à perda do sabor e odor característicos e ao desenvolvimento do sabor de ranço (ALVES et al., 2003). A qualidade do café torrado e moído também é função do grau de torrefação, da granulometria, da porosidade e das características do grão tais como variedade, número de defeitos, maturação etc.

O café torrado e moído possui teor de água em torno de 0,03 a 0,05 $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ e atividade de água média de 0,2 (OLIVEIRA e ALVES, 2004), assim, a partir deste valor, iniciam-se as reações, como a oxidação lipídica e o escurecimento não enzimático. De acordo com Labuza (1982), citado por Alves et al. (2003), a partir de um determinado teor de água, o produto se aglomera e posteriormente ocorre o desenvolvimento microbiano. Conforme Cabral e Fernandes (1982), a $0,066 \text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ inicia-se o processo de aglomeração do produto, e a $0,070 \text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, o café torrado e moído se deteriora rapidamente. Assim, o teor de água máximo de 5,0% (b.u.), equivalente a $0,0526 \text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, permitido para o café torrado em grão e para o café torrado e moído estabelecido pela Instrução Normativa nº 16 (IN 16), é seguro.

Dependendo da temperatura de estocagem, o oxigênio em concentração de até 1% no interior da embalagem é consumido entre 3 e 4 semanas, permitindo a preservação das propriedades do produto por vários meses. Para um valor de 2%, o tempo aumenta para 6 semanas, porém, com valores acima de 5%, a proteção oferecida pela embalagem torna-se desprezível (KAREL, 1974 apud CABRAL e FERNANDES, 1982).

A temperatura do café torrado e moído no momento do acondicionamento nas embalagens é outro ponto importante. Ao embalar o produto ainda quente, a probabilidade de formação de pequenas gotas de água oriundas da condensação do vapor dentro da embalagem aumenta, podendo favorecer a formação de grumos, processos oxidativos e o crescimento de fungos durante o período de estocagem (SILVA, 2008).

O efeito da temperatura, da atividade de água e da pressão parcial de oxigênio foi estudado por Cardelli e Labuza (2001), na determinação da vida de prateleira de café torrado e moído. Entre estes fatores, o oxigênio teve papel crítico, acelerando em cerca de 20 vezes a deterioração com o aumento da pressão parcial deste gás de 0,5 para 21,3 kPa. O segundo efeito mais importante foi a atividade de água, reduzindo a vida útil do café em aproximadamente 60% para cada 0,1 de seu aumento. Essa redução foi atribuída ao escurecimento não enzimático, seguido pela temperatura, sendo que para cada 10 °C de aumento observou-se uma redução de 20% na vida de prateleira do café torrado e moído.

A granulometria exerce influência direta na sorção de água e, conseqüentemente, nas características sensoriais como aparência, sabor e textura de pós. Segundo Moraes e Trugo (2001), para o café a granulometria é definida industrialmente como grossa, média e fina, sem, no entanto, associar as características do processo com a composição química e a qualidade do produto final, sendo o processo de infusão responsável por definir as características da moagem dos grãos de café.

De acordo com os mesmos autores, pouco se conhece sobre a influência da granulometria do café torrado, tanto no rendimento quanto na qualidade da bebida. Há necessidade de um estudo sistematizado para fornecer diretrizes para os produtores, visando à otimização de normas industriais. Menos ainda se sabe sobre os efeitos da combinação da granulometria com o ponto de torra sobre a qualidade e o rendimento da bebida.

A distribuição granulométrica das partículas formadas pela moagem do café torrado é definida pelas características do moinho. Geralmente, a granulometria fina e média é utilizada na infusão por filtração, seja com filtro de pano ou de papel. Partículas de tamanho médio também são usadas na infusão por pressão (café expresso). Na infusão por percolação (cafeteira italiana), a moagem é a grossa, assim como por prensagem (prensa francesa). Há também o grau de moagem pulverizado, utilizado na preparação do café árabe, em que o pó não é coado (ABIC, 2011a).

A moagem é um passo crítico na preparação do café. O principal objetivo deste processo é o aumento da superfície específica de extração, ou seja, aumentar a extensão da interface entre água e o café para facilitar a transferência de substâncias solúveis e emulsão para a bebida. Ao mesmo tempo, a ruptura dos tecidos e células do café acelera a liberação de dióxido de carbono e compostos voláteis que conferem o aroma (ANDUEZA et al., 2003).

O tamanho das partículas influencia o tempo de extração e a quantidade de substâncias coloidais para a fase líquida. De acordo com Cappuccio e Suggi-Liverani (1989), citados por Baggeenstoss et al. (2008), em simulação computacional o café torrado e moído grosseiramente leva à formação de grandes canais, por onde a água flui com elevada velocidade, diminuindo o rendimento da extração. Por outro lado, se as partículas são de tamanho muito pequeno, os poros do filtro são obstruídos, a umidificação é insuficiente e a extração ocorre pelo prolongado tempo de contato entre a água e o pó. Portanto, a fim de aperfeiçoar a extração, deve-se obter uma distribuição de partículas média entre as duas granulometrias, assegurando assim uma bebida final de qualidade.

A influência da granulometria na infusão também foi estudada por Bell et al (1996), que verificaram maior eficiência de extração de cafeína na moagem finíssima. Andueza et al. (2003) observaram melhores características do aroma e do sabor para o café expresso, a partir do *blend* 20% arábica e 80%

robusta nesta mesma moagem. E a partir da mesma mistura, incluindo 50% de açúcar, eles observaram esses atributos mais evidentes na moagem grossa.

A escolha do tipo de embalagem é fundamental na vida de prateleira do produto. Existe no mercado uma grande variedade de filmes, de tipos de embalagens e de sistemas de acondicionamento para café torrado e para o café torrado e moído. As embalagens simples são úteis quando se deseja estocar por pequenos períodos, já as mais sofisticadas permitem maior tempo de prateleira para o produto, além de manterem as propriedades originais do café (FERNANDES et al., 2006).

Tradicionalmente, as embalagens para alimentos tem sido planejadas para proteger o produto, e um de seus principais requisitos é a não interação com o alimento acondicionado, funcionando assim como uma barreira inerte entre o alimento e o ambiente (AZEREDO et al., 2000).

Segundo Alves et al. (2003), o sistema com atmosfera normal é amplamente utilizado no Brasil e consiste no acondicionamento do produto na embalagem logo após os processos de torrefação e moagem que, em seguida, é furada para evitar o abaulamento devido à liberação de dióxido de carbono. Porém, esta ação ocasiona o contato do produto com o oxigênio do ar, acelerando seu processo de deterioração, restringindo a vida útil do produto. A perfuração da embalagem destrói a barreira à troca de gases, passando a embalagem a atuar apenas como veículo de contenção do produto. Entre os materiais mais utilizados, estão os filmes de PET (poliéster) impressos e metalizados laminados ao PEBD (polietileno de baixa densidade).

No sistema de embalagem a vácuo, o produto depois de torrado e moído passa por etapa de desgaseificação, e dependendo do grau de torrefação e da granulometria, este período deve ser o menor possível para prevenir a oxidação do produto e a perda de componentes aromáticos (ALVES et al., 2003).

A embalagem a vácuo favorece a logística, graças ao longo período de vida útil, permitindo atingir mercados distantes, difíceis de atuar com as

embalagens do tipo almofada com atmosfera normal. Neste caso, a estrutura geralmente é composta de PET/Al/PE, em que PET tem a função de impressão e resistência, o alumínio (Al) funciona como barreira a gases, umidade e aroma e o polietileno (PE), como selante. Entretanto, outras estruturas também tem sido utilizadas como PET/Al/PA/PE, em que a poliamida (PA) aumenta a resistência mecânica da embalagem e PET/PET metalizado/PELBD, sendo a metalização do PET especial, de forma a obter alta barreira a gases e à umidade (OLIVEIRA e ALVES, 2004).

Outro sistema de acondicionamento de café torrado e moído é aquele que usa atmosfera inerte. Este é caracterizado, principalmente, pela retirada do oxigênio durante o acondicionamento do produto, sendo o ar do espaço livre substituído por nitrogênio. Neste sistema, a diminuição do oxigênio retarda a deterioração do café. O material usado geralmente é um laminado em que um dos componentes é metalizado (PET ou BOPP-polipropileno bi-orientado).

No sistema controlado, as válvulas desgaseificadoras permitem a saída do dióxido de carbono produzido durante a torrefação e impedem a entrada do oxigênio (RIAÑO e JARAMILLO, 2000). As válvulas podem ser aplicadas em todos os sistemas de embalagem, incorporando vantagens como a não necessidade de um longo tempo de espera para embalar o café torrado, mantendo a qualidade com preservação do aroma, garantindo o frescor do produto. Outra tecnologia empregada no sistema controlado são os absorvedores, sendo mais comum o uso de sistemas absorvedores de oxigênio, e o mais utilizado é na forma de *sachets*, contendo agentes redutores à base de pós de ferro (ALVES et al., 2003).

Diante da importância do café para o agronegócio brasileiro, a escassez de resultados e publicações no âmbito de café torrado e moído e, sabendo que inúmeros fatores interferem na qualidade final do produto, objetivou-se com este trabalho estudar o efeito da granulometria e da embalagem no processo de sorção de água e na qualidade do café torrado.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. **Qualidade do café.** Disponível em: <http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=68>. Acesso em: 18 de abril de 2010.

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. **Indicadores da indústria de café no Brasil – 2010.** Disponível em: <http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=61#472>. Acesso em: 02 de abril de 2011.

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. **Dicas de preparação de café.** Disponível em: <http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=39#6>. Acesso em: 19 de abril de 2011a.

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. Disponível em: <http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?tpl=home>. Acesso em: 02 de abril de 2011.

ALVES, R. M. V.; MORI, E. E.; MILANEZ, C. R.; PADULA, M. Café torrado e moído em embalagens inertizadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas. v.23, p. 22-27, 2003.

ANDUEZA, S.; DE PEÑA, M. P.; CID, C. Chemical and Sensorial Characteristics of Espresso Coffee As Affected by Grinding and Torrefacto Roast. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 51, p. 7034-7039, 2003.

AZEREDO, H. M. C.; FARIA, J. A. F.; AZEREDO, A. M. C. Embalagens ativas para alimentos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas. v. 20, n 3, sept./dez. 2000. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0101-20612000000300010. Acesso em: 31 de agosto de 2010. doi: 10.1590/S0101-20612000000300010

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

BELL, L.N.; WETZEL, C. R.; GRAND, A. N..Caffeine content in coffee as influenced by grinding and brewing techniques.**Food Research International**, v. 29, n. 8, p. 185-189, 1996.

BRASIL – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 16 de 24 de maio de 2010. **Diário Oficial da União**. Nº 98, terça-feira, 25 de maio de 2010. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/LEGISLACAO/PUBLICACOES_DOU/PUBLICACOES_DOU_2010/MAIO_2010/DO1_25-05_0.PDF. Acesso em: 26 de novembro de 2010.

CABRAL, A. C. D.; FERNANDES, M. H. C. Embalagem para café torrado e café torrado e moído. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 19, n. 1, p. 1-9, 1982.

CAIXETA, G. Z. T.. **Economia cafeeira, mercado de café, tendências e perspectivas**. In: I Encontro sobre produção de café com qualidade. Viçosa, MG: UFV, Departamento de Fitopatologia, 1999.259 p.

CARDELLI, C.; LABUZA, T. P.. Application of Weibull Hazard analysis to the determination of the shelf Life of roasted and ground coffee. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.**, v. 34, n. 5, p. 273-278, 2001.

FERNANDES, S. M.; PEREIRA, R. G. A.; BORÉM, F. M.; NERY, F. C.; PÁDUA, F. R. M.. Alterações químicas em cafés torrados e moídos durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa – Especial Café**, nº 9, p. 12-18, 2006.

MELO, W. L. B.; A importância da informação sobre o grau de torra do café e sua influência nas características organoléptica da bebida. **Comunicado Técnico nº 58**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, São Carlos (SP) 2004.

MORAES, R.C. de P.; TRUGO, L.C. Efeito da torrefação e da granulometria na composição química do café. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2001, Vitória. **Anais**. Brasília: Embrapa Café, p.1511-1517, 2001.

RIAÑO L, C. E.; JARAMILLO C., B. Uso de válvulas desgasificadoras para el empaque y almacenamiento de café tostado. **Cenicafé**, v. 51 (1), p. 66-77, 2000.

SILVA, A. B. **Identificação de riscos e perigos no processo de torra e moagem de café visando a obtenção de produtos seguros e de qualidade.** Dissertação (Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Instituto de tecnologia departamento de tecnologia de alimentos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédia, 2008.

OLIVEIRA, P. A. P. L. V., ALVES, R. M. V. Embalagem para café torrado: uma alternativa para agregação de valor ao produto. **Boletim do Instituto de Tecnologia de Alimentos.** Campinas. v. 16, n 1, p. 1-6, 2004.

CAPÍTULO 1

Modelagem da cinética de sorção de água pelo café torrado

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho modelar da cinética de sorção de água pelo café torrado, em diferentes níveis granulométricos. Foram utilizados grãos de café arábica com teor de água inicial de $0,1234 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$, torrados no ponto de torra médio, com perda de massa de 17%, tendo sido estabelecido quatro níveis granulométricos: grão inteiro, grossa, média e fina. Para a obtenção das isotermas de sorção da água e das propriedades termodinâmicas, foram analisadas diferentes condições de temperatura e umidade relativa, variando entre 25 e 30 °C e de 0,3 a 0,8 (decimal), respectivamente. Os dados de teor de água de equilíbrio foram correlacionados com seis modelos matemáticos. O modelo de Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café torrado nos diferentes níveis granulométricos; o teor de água de equilíbrio do café torrado é diretamente proporcional à umidade relativa do ar ambiente e decresce com o aumento de temperatura para um valor de umidade relativa; com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia liberada pela sorção da água no produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de sorção; com a redução do teor de água, ocorre aumento dos valores da entropia diferencial de sorção, sendo que, para um mesmo teor de água, a entropia diferencial do café torrado no nível granulométrico fina foi maior que do no nível média e grossa, respectivamente, devido à maior superfície específica; a teoria da compensação entalpia-entropia pode ser satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção, sendo controlado pela entalpia.

ABSTRACT

The objective of this study was to model the kinetics of water adsorption by roasted coffee in different granulometric levels. Arabica coffee grains were utilized with an initial water content of $0.1234 \text{ kg}_w \text{ kg}_{dm}^{-1}$, roasted until the medium roast point, with a weight loss of 17%, in which four granulometric levels were established: whole grains and thick, medium and thin granulometries. To obtain the water sorption isotherms and the thermodynamic properties, different conditions of temperature and relative humidity were analyzed, ranging between 25 to 30 °C and 0,3 to 0,8 (decimal), respectively. The data of equilibrium moisture content were correlated with six mathematical models. Copace model was the one that better represented the hygroscopic equilibrium for sorption in roasted coffee for all granulometric levels the equilibrium moisture content of roasted coffee is directly proportional to the relative humidity of ambient air and decreases when increasing the temperature for a relative humidity value. With the reduction in moisture content, the energy released by product water adsorption increases, represented by the values of integral isosteric heat of sorption; by reducing the moisture content, values of differential entropy of sorption increase, and for the same moisture content, the differential entropy for roasted coffee in thin granulometry was higher than for the coffee in medium and thick granulometry, due to a higher specific surface; the theory of enthalpy-entropy compensation can be satisfactorily applied to the sorption phenomenon, being controlled by enthalpy.

1.1. INTRODUÇÃO

A presença da água nos alimentos, tais como café torrado, biscoitos, bolos e produtos agrícolas, como grãos, sementes, frutos e outros, pode ser medida de diferentes formas, mas nem todos os métodos indicam como ela se encontra e nem se toda ela está ligada do mesmo modo ao material biológico, como também não fornece indícios sobre os efeitos desta água, tendo em vista a composição do alimento. Assim, a atividade de água ou o teor de água no equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente é o melhor indicativo destas características.

O teor de água no equilíbrio é útil na determinação da perda ou ganho de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa, relacionando-se diretamente com os processos de secagem e armazenagem de produtos agrícolas (GHODAKE et al., 2007), sendo alcançado quando a pressão parcial de vapor de água no produto se iguala à pressão do ar que o envolve.

A relação entre o teor de água de um produto e a umidade relativa de equilíbrio, para uma dada temperatura, é expressa por meio de curvas características, chamadas isotermas de sorção. O conhecimento dessa relação de interdependência auxilia na identificação do tipo de forças envolvidas na ligação da água com os elementos de composição do produto. Permite certas avaliações da sua estabilidade durante o armazenamento, podendo servir como parâmetro indicativo de embalagens apropriadas para melhor conservação e vida de prateleira de produtos industrializados (CORRÊA e MOURE, 2000).

As isotermas de sorção podem ser obtidas por meio de modelos matemáticos, os quais diferem na sua base teórica ou empírica e na quantidade de parâmetros envolvidos (MULET et al., 2002). Segundo Resende e Corrêa (2007), estes modelos são essenciais para prever e simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo.

Dois métodos são utilizados para determinar experimentalmente o teor de água no equilíbrio, para determinada condição de temperatura e umidade

relativa do ar. O método estático, em que o teor de água no equilíbrio entre o produto e a atmosfera circundante é atingido sem movimentação do ar ou do produto, e o método dinâmico, em que o ar ou mesmo o produto é movimentado até o estabelecimento do equilíbrio (BROOKER et al., 1992).

A termodinâmica, em processos de sorção, é usada para a compreensão das propriedades da água e o cálculo do requerimento de energia associada com a transferência de calor e massa em sistemas biológicos. As propriedades termodinâmicas da sorção fornecem melhor compreensão do equilíbrio da água com seus arredores para determinadas condições de temperatura e umidade relativa (FASINA, 2006), trazendo informações a respeito da afinidade do sorvente pela água e da espontaneidade do processo de sorção. Além disso, permitem definir o conceito de ordem e desordem existente em sistemas água-sorvente. As funções termodinâmicas podem ser obtidas por meio de isotermas de sorção, facilitando assim a interpretação dos parâmetros termodinâmicos (RIZVI e BENADO, 1984).

A entalpia diferencial, também denominada de calor isostérico líquido de sorção, corresponde ao calor liberado ou absorvido pelo produto a pressão constante e é utilizada como indicador da força de ligação entre a água e o sólido (MOREIRA et al., 2008). Para produtos secos, ela é essencial para a modelagem de diversos processos agroindustriais e seu armazenamento.

O calor isostérico integral de sorção corresponde à soma da entalpia diferencial e do calor latente de vaporização da água livre. O calor de vaporização da água é definido como a quantidade de energia necessária para mudar uma unidade de massa da fase líquida para vapor a dada temperatura. A variação de entalpia negativa representa uma transformação exotérmica, ou seja, com liberação de calor. Ao contrário, quando a variação de entalpia é positiva, ocorre um processo com absorção de calor, isto é, endotérmico.

O calor isostérico integral é a energia total necessária para transferir as moléculas de água no estado de vapor para uma superfície sólida, ou vice-versa (FASINA, 2006). De acordo com Yang e Cenkowski (1993), citados por

Fasina (2006), este calor é útil em modelos de secagem, no cálculo do consumo de energia durante a secagem/umedecimento de produtos agrícolas, na concepção de equipamentos de secagem e na descrição de qualquer transferência de calor e massa relacionada a um processo.

A entropia diferencial de um material é proporcional ao número de sítios de sorção disponível correspondente a um nível específico de energia (MOREIRA et al., 2008), e indica o estado de mobilidade das moléculas de água no produto. Segundo Mazza e LeMaguer, (1978) esta entropia descreve o grau de desordem e aleatoriedade do movimento das moléculas de água e tem sido utilizada para explicar os modos de sorção de água, por material biológico (BABBITT, 1942).

Propriedades termodinâmicas, como entalpia e entropia, são necessárias para delinear o trabalho e para o entendimento qualitativo do estado da água na superfície do alimento. Variações de entalpia fornecem a medida da variação de energia do processo de interação entre as moléculas de água e o sorvente. A entropia pode estar associada com a ligação ou repulsão das forças no sistema e está associada com o arranjo espacial da relação água-sorvente. Assim, a entropia caracteriza o grau de ordem ou desordem existente no sistema água-sorvente (MCMINN et al., 2005).

A energia livre de Gibbs é influenciada pelas propriedades termodinâmicas, entalpia e entropia e indica a espontaneidade energética da interação água-sorvente, fornecendo a medida da disponibilidade de energia do processo. Se o valor desta propriedade for negativo, o processo é espontâneo, e se for positivo, o processo será não-espontâneo. Em sistema com muitos constituintes, como os alimentos, a energia livre de Gibbs não depende apenas da pressão e da temperatura, mas também da quantidade de cada componente (RIZVI, 1995).

A teoria da compensação entalpia-entropia é uma ferramenta para o reconhecimento dos diferentes mecanismos de sorção da água em diferentes condições (RIZVI, 1995). Ela indica que a compensação surge pelas alterações

na natureza das interações solvente-soluto, e que existe uma relação linear entre a entalpia e a entropia, sendo que a inclinação da reta corresponde à temperatura isocinética, na qual todas as reações em série acontecem no mesmo ritmo (MOREIRA et al., 2008).

Diante da importância do conhecimento da higroscopicidade dos produtos agrícolas, bem como da interação da água com o produto, objetivou-se com este trabalho determinar as isotermas de sorção do café torrado em diferentes níveis granulométricos, obtidas por adsorção, para diversas condições de temperatura e umidades relativas do ar, ajustar modelos matemáticos aos dados experimentais, além de determinar as propriedades termodinâmicas da sorção da água em função do teor de água no equilíbrio.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Análise de Qualidade Sensorial e de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – Minas Gerais (MG).

1.2.1. Matéria-Prima

Foram utilizados grãos de café beneficiados, com tamanho acima da peneira 16, da espécie arábica (*Coffea arabica L.*), variedade Catuaí Vermelho, com teor de água inicial de $0,1234 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$ adquiridos de uma unidade beneficiadora de café localizada em Viçosa, MG.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e armazenadas em câmara tipo BOD a temperatura de $18 \text{ }^\circ\text{C}$, a fim de manter as características iniciais do produto até sua torrefação. Antes das operações de torrefação, as amostras foram expostas à temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas, visando a atingir o equilíbrio térmico para minimizar as alterações relacionadas à temperatura.

1.2.2. Processo de torrefação

Para a torrefação dos grãos de café, foi utilizado torrefador com 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 mantida constante para garantir que a temperatura do torrefador permanecesse estável durante todo o processo. Antes de iniciar a torrefação, foi feito o pré-aquecimento do torrefador para estabilização da temperatura no interior do cilindro rotativo. A temperatura média de torrefação foi de $284 \text{ }^\circ\text{C}$. O ponto de torra foi estabelecido quando a temperatura da massa de grão atingiu cerca de $235 \text{ }^\circ\text{C}$ para um intervalo de tempo de aproximadamente 16 minutos, com perda de massa de 17%, que

equivale ao padrão de torra para classificação de grãos de café baseado no número Agtron (SCCA # 55), torra média.

Para a medição da temperatura da amostra, foi utilizado termômetro infravermelho portátil, marca Mult-Temp, para leituras entre -50 e 500 °C, com tempo de resposta de 1 segundo, precisão de 2 °C, resolução de 0,1 °C.



Figura 1: Torrefador de quatro cilindros rotativos com queima de gás direto.

1.2.3. Moagem

Depois de torrado o café, foram estabelecidos quatro níveis granulométricos: grão inteiro, grossa, média e fina, tendo sido os três últimos níveis obtidos pela moagem do produto em moinho da marca Mahlkönig, seguindo recomendações da ABIC (2004) (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação com base na percentagem de retenção em peneiras granulométricas números 12, 16, 20, 30 e fundo, em equipamento específico com agitação por 10 minutos e reostato na posição 5, ou similar

moagem	% de retenção			tolerância para o % que passa da peneira 30	
	peneiras 12 e 16	peneiras 20 e 30	fundo	mínimo	máximo
grossa	33	55	12	9	15
média	7	73	20	16	24
fina	0	90	30	25	40

Fonte: ABIC (2004).

1.2.4. Teor de água

O teor de água das amostras foi determinado empregando-se o método da estufa a 105 ± 3 °C até massa constante, segundo Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

1.2.5. Isotermas de sorção

Para obtenção do teor de água no equilíbrio das amostras de café torrado nos diferentes níveis granulométricos, pelo processo de sorção, foi utilizado o método dinâmico e estático.

Para o método dinâmico, foram utilizadas as seguintes combinações de temperatura e umidade relativa: 25 °C / 50 a 80% e 30 °C / 30 a 80%. E para o método estático, a temperatura de 25 °C e as umidades relativas de 33,2 e 43,8%.

As condições experimentais para realização dos testes pelo método dinâmico foram fornecidas por unidade condicionadora de atmosfera com controle de temperatura e umidade relativa, de fabricação da empresa Aminco, modelo Aminco-Aire. Para o método estático, foram utilizadas câmara tipo BOD mantida na temperatura de 25 °C e dessecador com soluções saturadas, preparadas de acordo com técnicas citadas por Hall (1980) e Palipane e Driscoll (1992), como apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Umidades relativas (%) estabelecidas no interior do dessecador para as soluções saturadas e temperatura da câmara

Composto Químico	Temperatura (°C)
	25
K ₂ CO ₃	43,8
MgCl ₂ .6H ₂ O	33,2

Para todos os testes, foram utilizadas amostras contendo aproximadamente 10 g de produto em cinco repetições. Durante o processo de sorção, elas foram pesadas periodicamente, até que a variação da massa, entre

três pesagens consecutivas, fosse igual ou inferior a 0,01 g, representando nesse momento o teor de água no equilíbrio higroscópico.

Aos dados observados do equilíbrio higroscópico obtidos para cada condição de temperatura e umidade relativa, foram ajustados modelos matemáticos comumente utilizados para descrição dos fenômenos de sorção em produtos agrícolas. Os modelos utilizados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Modelos matemáticos para representação das curvas de equilíbrio higroscópico

Designação do modelo	Modelo
Oswin modificado	$U_e = \frac{(a + b T)}{\left[\frac{(1 - a_w)}{a_w} \right]^{\frac{1}{c}}} \quad (1)$
Halsey	$U_e = \left[\frac{\exp(a - b T)}{-\ln a_w} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (2)$
Chung- Pfof	$U_e = a - b \ln[(c - T) \ln(a_w)] \quad (3)$
Sigma-Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(a_w)]\} \quad (4)$
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (ca_w)] \quad (5)$

em que:

U_e : teor de água no equilíbrio, $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$;

a_w : atividade de água, decimal;

a, b e c : parâmetros de ajuste dos modelos; e

T : temperatura, °C.

1.2.5.1. Propriedades termodinâmicas da sorção de água

O calor isostérico de sorção foi calculado pela Equação 6, conhecida como equação de Clausius-Clayperon (IGLESIAS e CHIRIFE, 1976).

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{R T_a^2} \quad (6)$$

em que:

T_a : temperatura, K;

Δh_{st} : calor isostérico líquido de sorção ou entalpia diferencial, kJ kg⁻¹; e

R : constante universal dos gases, 8,314 J mol⁻¹ K⁻¹.

Integrando a Equação 6 e assumindo que o calor isostérico líquido de sorção seja independente da temperatura, para cada teor de água no equilíbrio, obtém-se a Equação 8 (WANG e BRENNAN, 1991).

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta h_{st}}{R}\right) \frac{1}{T_a} + C_1 \quad (7)$$

em que:

C_1 : constante de integração, adimensional;

O calor isostérico integral de sorção foi obtido adicionando-se aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre, de acordo com a Equação 8:

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L = N \exp(-MU_e) + L \quad (8)$$

em que:

M e N : parâmetros de ajuste do modelo;

L : calor latente de vaporização da água livre, kJ kg⁻¹; e

Q_{st} : calor isostérico integral de sorção, kJ kg⁻¹.

O calor latente de vaporização da água livre, necessário ao cálculo do calor isostérico integral de sorção, foi obtido pela temperatura média (\bar{T}) na faixa em estudo, em °C, segundo apresentado na Equação 9:

$$L = 2502,2 - 2,39 \bar{T} \quad (9)$$

Mudanças na entropia diferencial de sorção foram calculadas pela Equação 10, conhecida como equação de Gibbs-Helmholtz (RIZVI, 1995):

$$\Delta S = \frac{\Delta h_{st} - \Delta G}{T_a} \quad (10)$$

em que:

ΔS : entropia diferencial de sorção, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$; e

ΔG : energia livre de Gibbs, $\text{kJ kg}^{-1} \text{mol}^{-1}$.

A energia livre de Gibbs foi calculada segundo a Equação 11:

$$\Delta G = -R T_a \ln(a_w) \quad (11)$$

O efeito de mudanças na sorção da água sobre a energia livre normalmente também é acompanhada por mudanças nos valores de entalpia e entropia. Assim, substituindo a Equação 10 na 11 e rearranjando, tem-se:

$$-\ln(a_w) = \frac{\Delta h_{st}}{R T_a} - \frac{\Delta S}{R} \quad (12)$$

Os valores de calor isostérico líquido de sorção e os valores de entropia foram calculados pela Equação 12, plotando os valores de atividade de água por T^{-1} para respectivos valores de teor de água no equilíbrio. Os valores de atividade de água, temperatura e teor de água no equilíbrio foram obtidos a partir da equação de melhor ajuste aos dados de teor de água no equilíbrio higroscópico do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos.

Os valores calculados de entalpia diferencial de sorção (Δh_{st}) e de entropia (ΔS) podem ser relacionados pela Equação 13 (BERISTAIN et al., 1996).

$$\Delta h_{st} = T_B (\Delta S) + \Delta G_B \quad (13)$$

em que:

T_B : temperatura isocinética, K; e

ΔG_B : energia livre de Gibbs à temperatura isocinética, $\text{kJ kg}^{-1} \text{mol}^{-1}$.

A temperatura isocinética representa a temperatura na qual todas as reações em série ocorrem em uma mesma taxa. Se a entalpia e a entropia forem altamente correlacionadas, assume-se que a teoria da compensação pode ser válida para a sorção (BERISTAIN et al., 1996). Para confirmar a existência da compensação, a temperatura isocinética será comparada com a média harmônica da temperatura, definida de acordo com a Equação 14 (KRUG et al., 1976a; 1976b).

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_a} \right)} \quad (14)$$

em que:

T_{hm} : média harmônica da temperatura, K; e

n : número de temperaturas utilizadas.

De acordo com Krug et al. (1976a; 1976b), a compensação química linear só existe se a temperatura isocinética (T_B) for diferente da média harmônica da temperatura (T_{hm}).

Um intervalo de confiança aproximado, $(1-\alpha)$ 100%, para a temperatura isocinética pode ser calculado pela seguinte equação:

$$T_B = \hat{T}_B \pm t_{\left(m-2, \frac{\alpha}{2}\right)} \sqrt{Var(T_B)} \quad (15)$$

em que:

$$\hat{T}_B = \frac{\sum (\Delta H - \Delta \bar{H})(\Delta S - \Delta \bar{S})}{\sum (\Delta S - \Delta \bar{S})^2} \quad (16)$$

e

$$Var(T_B) = \frac{\sum (\Delta H - \Delta \bar{G}_B - \hat{T}_B \Delta S)^2}{(m-2)(\Delta S - \Delta \bar{S})^2} \quad (17)$$

em que:

m : número de pares de dados de entalpia e entropia;

$\Delta \bar{H}$: entalpia média, kJ kg^{-1} ; e

$\Delta\bar{S}$: entropia média, $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$.

1.2.6. Análise estatística

Os dados experimentais do equilíbrio higroscópico do café torrado foram submetidos à análise de regressão não-linear e à seleção do modelo adequado para expressar a relação entre as variáveis estudadas. Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais, foi utilizado o programa Statistica 7.0[®].

Para análise do grau de ajuste de cada modelo, foram consideradas as magnitudes do coeficiente de determinação, do erro médio relativo e do erro médio estimado.

Os valores do erro médio relativo (P) e do erro médio estimado (SE) foram calculados de acordo com as Equações 19 e 20:

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{Y_i} \quad (18)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{GLR}} \quad (19)$$

em que:

Y_i : valor observado;

\hat{Y}_i : valor estimado;

n : número de dados observados; e

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

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 4, 5 e 6, estão apresentadas as estimativas dos parâmetros dos modelos ajustado aos dados de teor de água no equilíbrio higroscópico do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos, para diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar, assim como seus respectivos valores de coeficiente de determinação (R^2), erro médio estimado (SE) e erro médio relativo (P).

Para o nível granulométrico grão inteiro, nenhum dos modelos propostos na metodologia foi indicado para representar o teor de água no equilíbrio do café torrado, uma vez que eles apresentaram erro médio relativo superior a 10%.

Tabela 4: Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico do café torrado no nível granulométrico grossa, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erro médio estimado (SE) e erro médio relativo (P), para a faixa de temperatura de 25 a 30 °C

Modelos	Estimativa dos parâmetros	R^2	SE	P (%)
Oswin modificado	$a = 5,8873$	0,9827	0,4240	6,4795
	$b = -0,0303$			
	$c = 1,5667$			
Halsey	$a = 1,867229$	0,9759	0,5015	8,3584
	$b = 0,007790$			
	$c = 1,254017$			
Chung-Pfost	$a = 29,151566$	0,9768	0,4913	7,4570
	$b = 5,626332$			
	$c = -72,151984$			
Sigma-Copace	$a = -0,806716$	0,9804	0,4516	6,9751
	$b = 0,006236$			
	$c = 1,564013$			
Copace	$a = 0,318467$	0,9831	0,4195	5,8471
	$b = 0,006054$			
	$c = 2,919353$			

Tabela 5: Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico do café torrado no nível granulométrico média, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erro médio estimado (SE) e erro médio relativo (P), para a faixa de temperatura de 25 a 30 °C

Modelos	Estimativa dos parâmetros	R^2	SE	P (%)
Oswin modificado	$a = 6,699487$ $b = -0,067154$ $c = 1,602961$	0,9519	0,6747	9,3479
Halsey	$a = 2,142803$ $b = 0,018049$ $c = 1,282622$	0,9440	0,7278	10,8537
Chung-Pfost	$a = 23,488712$ $b = 5,263515$ $c = -20,135632$	0,9519	0,6745	10,1689
Sigma-Copace	$a = -0,571859$ $b = 0,014108$ $c = 1,528352$	0,9493	0,6922	9,8757
Copace	$a = 0,528014$ $b = 0,013907$ $c = 2,851597$	0,9536	0,6625	8,9968

Tabela 6: Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico do café torrado no nível granulométrico fina, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), erro médio estimado (SE) e erro médio relativo (P), para a faixa de temperatura de 25 a 30 °C

Modelos	Estimativa dos parâmetros	R^2	SE	P (%)
Oswin modificado	$a = 6,478538$ $b = -0,068150$ $c = 1,640494$	0,9643	0,5269	8,6437
Halsey	$a = 2,160087$ $b = 0,019662$ $c = 1,309824$	0,9592	0,5634	9,6629
Chung-Pfost	$a = 22,764704$ $b = 4,789825$ $c = -33,466363$	0,9532	0,6036	8,2759
Sigma-Copace	$a = -0,536938$ $b = 0,015194$ $c = 1,493566$	0,9613	0,5487	8,9871
Copace	$a = 0,544366$ $b = 0,015025$ $c = 2,777821$	0,9616	0,5464	8,3596

De acordo com as Tabelas 4, 5 e 6, observa-se que o modelo de Copace foi o mais indicado para descrever o fenômeno de sorção para o café torrado, uma vez que ele apresentou satisfatórios coeficientes de determinação (R^2), superiores a 95%, e valores reduzidos do erro médio estimado (SE) e do erro médio relativo (P). Conforme Draper e Smith (1998), a capacidade do modelo para descrever fielmente um processo físico é inversamente proporcional aos valores de SE . Além disso, Özdemir e Devres (1999) afirmam que os modelos que tem valores de P superiores a 10% não são bons para prever o fenômeno.

Corrêa et al. (2002), estudando a higroscopicidade para ovo integral processado em *spray dryer*, concluíram que os modelos de Henderson modificado e Oswin representaram melhor as isotermas de adsorção deste produto.

O fenômeno de adsorção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel foi estudado por Corrêa et al. (2000a). As equações de Sigma-Copace e Henderson modificada apresentaram ajuste satisfatório nas faixas de temperatura de 10 a 40 °C e atividade de água de 0,32 a 0,98. Além disso, o fenômeno de higroscopicidade do café solúvel comportou-se de forma similar à maioria dos produtos agrícolas já estudados.

Na Figura 2, estão contidos os valores observados e as isotermas de sorção, estimadas pelo modelo de Copace, para os diferentes níveis granulométricos, nas temperaturas de 25 e 30 °C.

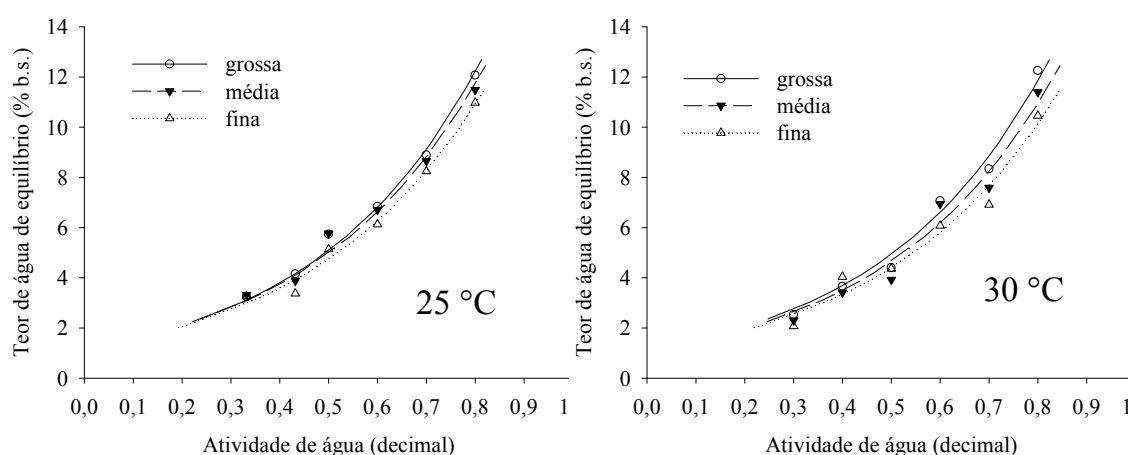


Figura 2: Valores observados e as isotermas de sorção, estimadas pelo modelo de Copace, para os diferentes níveis granulométricos do café torrado, nas temperaturas de 25 e 30 °C.

Verifica-se, na Figura 2, o efeito da temperatura sobre as isotermas de sorção do café torrado. Com o aumento da temperatura, para um valor constante de atividade de água, ocorre redução do teor de água no equilíbrio. Segundo Palipene e Driscoll (1992), com o aumento da temperatura, as moléculas de água atingem níveis de energia, tornando-se termodinamicamente menos estáveis, favorecendo a quebra da ligação entre a água e os sítios de sorção, reduzindo o teor de água no produto. Com a variação da temperatura, a excitação das moléculas, bem como a distância e, por conseguinte, a atração entre as moléculas, também variam. Desta forma, a

quantidade de água sorvida muda com a variação na temperatura a uma dada umidade relativa (MOHSENIN, 1986).

As isotermas de sorção do café torrado apresentaram em sua porção final, correspondente às atividades de água mais elevadas, uma ascensão mais pronunciada da curva (Figura 2). O mesmo fenômeno foi observado por Corrêa et al. (2000a) e Anese et al. (2006), que indicaram esse mesmo comportamento para a maioria dos produtos de origem vegetal.

O teor de água para o café torrado e moído estabelecido pela legislação brasileira não pode ultrapassar 5,26% (b.s.). Se considerar este valor como o teor de água no equilíbrio, observa-se na Figura 2, que a partir de 0,5 de atividade de água, tanto para a temperatura de 25 como para a de 30 °C, este limite é ultrapassado, comprometendo assim a estabilidade física, química e biológica do alimento.

Os valores observados e estimados do calor isostérico integral de sorção, em função do teor de água no equilíbrio, para as amostras de café torrado, nos níveis granulométricos, estão apresentados na Figura 3.

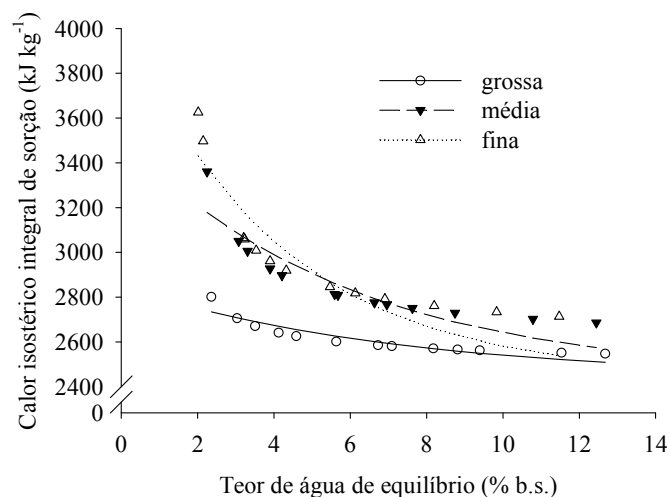


Figura 3: Valores observados e estimados do calor isostérico integral de sorção do café torrado, nos níveis granulométricos.

Com a redução do teor de água de equilíbrio, ocorre aumento da energia liberada pela sorção da água no produto, explicado pelas diferenças nas forças de ligação da água com a superfície sorvente de um determinado

produto. Em estágios iniciais de sorção (baixos teores de água), existem sítios polares de sorção altamente ativos, de elevada energia de interação, na superfície sorvente, os quais são cobertos com moléculas de água, formando uma camada monomolecular (AL-MUHTASEB et al., 2004). Conforme as moléculas de água se ligam quimicamente aos sítios de sorção altamente ativos, a sorção passa a ocorrer em locais menos ativos (elevados teores de água), com menos energia de interação e, conseqüentemente, menor calor isostérico de sorção (WANG e BRENAN, 1991).

Os valores do calor isostérico integral de sorção para todos os níveis granulométricos são maiores que o calor latente de vaporização da água no produto ($2442,45 \text{ kJ kg}^{-1}$) (Figura 3). Isso ocorre pelo fato de a energia de ligação entre as moléculas de água aos sítios de sorção ser maior do que a energia de ligação das moléculas de água entre si na fase líquida (MASUZAWA e STERLING, 1968). Além disso, com a elevação do teor de água do produto, os valores do calor isostérico integral de sorção tendem a se aproximar do valor do calor latente de vaporização da água livre.

As equações ajustadas do calor isostérico integral de sorção, em função do teor de água no equilíbrio para o café torrado, nos diferentes níveis granulométricos com seus respectivos coeficientes de determinação, estão apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Equações ajustadas do calor isostérico integral de sorção, em função do teor de água no equilíbrio para o café torrado, nos diferentes níveis granulométricos, com seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R ²
grossa	$Q_{st} = 409,4990 \times \exp(0,1427 \times U_e) + 2442,45$	0,8464
média	$Q_{st} = 1074,766 \times \exp(0,169 \times U_e) + 2442,45$	0,8232
fina	$Q_{st} = 1627,729 \times \exp(0,247 \times U_e) + 2442,45$	0,8221

Na Figura 4, estão os valores observados e estimados da entropia diferencial de sorção do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos, em função do teor de água no equilíbrio.

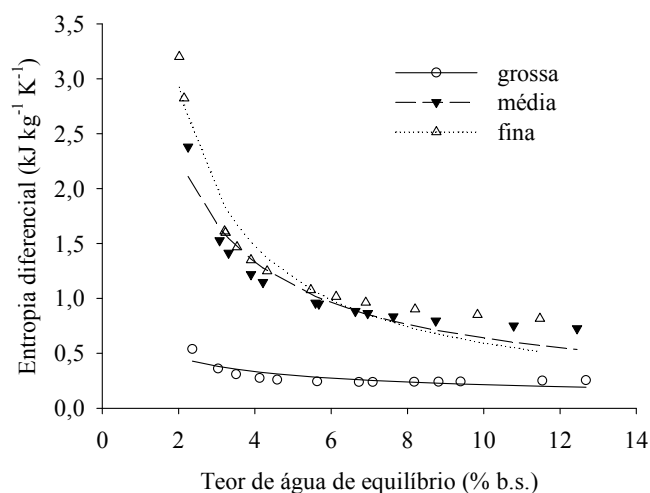


Figura 4: Valores observados e estimados da entropia diferencial de sorção, do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos.

O comportamento da curva da entropia diferencial de sorção em função do teor de água no equilíbrio apresentou tendência similar à observada para os valores de calor isostérico integral de sorção. Resultado semelhante foi observado por Al-Muhtaseb et al. (2004), trabalhando com amido em pó.

A entropia diferencial de um produto é proporcional ao número de sítios de sorção disponíveis em um nível específico de energia (MADAMBÁ et al., 1996), indicando o estado de mobilidade das moléculas de água no produto. Isto pode ser confirmado ao se observar a Figura 4. O café no nível granulométrico fina tem maior valor de entropia diferencial comparado ao café nos níveis granulométricos média e grossa, respectivamente. A moagem em partículas menores proporciona aumento da superfície específica do material e promove o aumento do número de sítios de sorção.

Com a elevação do teor de água do café torrado, ocorre redução nos valores de entropia diferencial, com tendência a se manterem constantes para elevados teores de água. Segundo Madamba et al. (1996), até certo ponto de teor de água, os processos de sorção podem ser reversíveis.

Na Tabela 8, estão as equações ajustadas da entropia diferencial de sorção, em função do teor de água no equilíbrio para o café torrado, nos diferentes níveis granulométricos, com seus respectivos coeficientes de determinação.

Apenas a equação ajustada para o café torrado no nível granulométrico grossa apresentou coeficiente de determinação baixo. Para os outros dois níveis, ele foi elevado, indicando boa correspondência entre os valores experimentais e os estimados.

Tabela 8: Equações ajustadas da entropia diferencial de sorção, em função do teor de água no equilíbrio para o café torrado, nos diferentes níveis granulométricos, com seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R ²
grossa	$\Delta S = 0,6505 \times U_e^{-0,4808}$	0,6838
média	$\Delta S = 4,0446 \times U_e^{-0,8019}$	0,9146
fina	$\Delta S = 5,8901 \times U_e^{-0,9976}$	0,9296

Na Figura 5, são apresentados os valores de entalpia diferencial em função dos valores de entropia diferencial de sorção do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos.

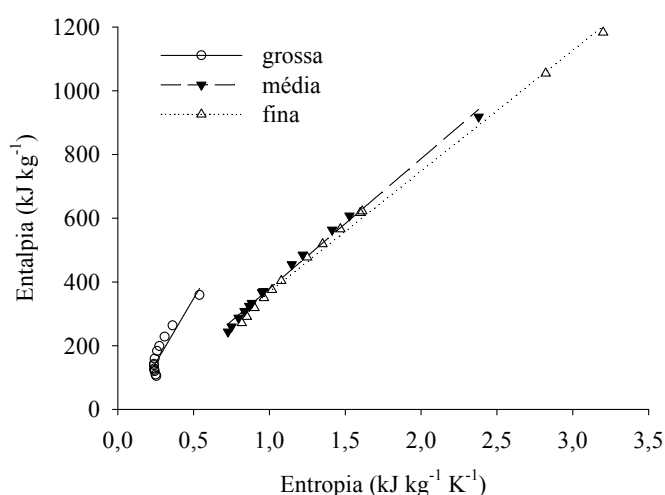


Figura 5: Relação linear entre a entalpia e a entropia para a sorção da água no café torrado, nos diferentes níveis granulométricos.

Foram exibidas relações lineares para o processo de sorção das amostras de café torrado, nos diferentes níveis granulométricos (Figura 5). Assumindo então que existe um alto grau de linearidade entre os valores de entalpia diferencial e entropia diferencial de sorção, pode-se considerar válida a teoria da compensação entalpia-entropia ou teoria isocinética para o fenômeno de sorção da água no café torrado. Então, a temperatura isocinética (T_B) e a energia livre de Gibbs (ΔG_B) foram determinadas (Tabela 9).

Tabela 9: Parâmetros característicos obtidos pela relação entalpia-entropia para o café torrado, nos diferentes níveis granulométricos

níveis granulométricos	T_B (K)	ΔG_B (kJ kg ⁻¹)
grossa	809,60 ± 209,95	-56,94
média	407,56 ± 21,07	-28,36
fina	378,97 ± 15,33	-9,68

A fim de se validar a teoria da compensação entalpia-entropia, a temperatura isocinética foi comparada com a média harmônica (T_{hm}) da faixa de temperatura utilizada para determinação das isotermas de sorção, calculada a partir da Equação 15. Segundo Krug et al. (1976a; 1976b), a compensação química linear só existe se a temperatura isocinética (T_B) for diferente da média harmônica da temperatura (T_{hm}). A média harmônica da temperatura calculada foi de 296,03 K, valor significativamente distinto de todos os valores de temperatura isocinética apresentados na Tabela 9, confirmando a adequação do fenômeno da teoria isocinética ou compensação entalpia-entropia para a sorção da água no café torrado.

De acordo com Liu e Guo (2001), a temperatura isocinética é aquela na qual todas as reações em série no produto devem acontecer ao mesmo tempo, ou seja, quando o produto se encontra em equilíbrio. O processo de sorção de água em produtos agrícolas pode ser controlado pela entalpia ou pela entropia. Segundo Leffler (1955), o processo é controlado pela entalpia se $T_B > T_{hm}$, e é controlado pela entropia se $T_B < T_{hm}$. De acordo com os dados obtidos neste

trabalho, podemos verificar que o mecanismo de sorção da água no café torrado pode ser considerado controlado pela entalpia.

1.4. CONCLUSÕES

- O modelo de Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos.
- O teor de água de equilíbrio do café torrado é diretamente proporcional à umidade relativa do ar ambiente e decresce com o aumento de temperatura para um valor de umidade relativa.
- Com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia liberada pela sorção da água no produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de sorção.
- Com a redução do teor de água, ocorre aumento dos valores da entropia diferencial de sorção, sendo que, para um mesmo teor de água, a entropia diferencial do café torrado no nível granulométrico fina foi maior que do no nível média e grossa, respectivamente, devido à maior superfície específica.
- A teoria da compensação entalpia-entropia pode ser satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção, sendo controlado pela entalpia.

1.5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. **Norma de Qualidade Recomendável e Boas Práticas de Fabricação de Cafés Torrados em Grão e Cafés Torrados e Moídos. 2004.** 18 de fevereiro de 2010. Disponível em: http://www.abic.com.br/arquivos/pqc_norma_qualidade_fev10.pdf. Acesso em: 29 de novembro de 2010.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v. 62, p. 135-142, 2004.

ANESE, M.; MANZOCCO, L.; NICOLI, M. C. Modeling the secondary shelf life of ground roasted coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v. 54, p. 5571-5576, 2006.

BABBITT, J. D. On the adsorption of water vapour by cellulose. **Canadian Journal of Research**, v. 20, p. 143-172, 1942.

BERISTAIN, C. I.; GARCIA, H. S.; AZUARA, E. Enthalpy-entropy compensation in food vapor adsorption. **Journal of Food Engineering**, v. 30, p. 405-415, 1996.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. H. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450p.

CORRÊA, P. C.; MOURE, J. Higroscopicidad y propiedades térmicas de semillas de sorgo. **Alimentación Equipos y Tecnología**, Madrid, v.29, n.1, p.149-153, 2000.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; STRINGHETA, P. C. Estudo do fenômeno de adsorção de água e seleção de modelos matemáticos para representar a higroscopicidade do café solúvel. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.2, n.1, p.19-25, 2000a.

CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; STRINGHETA, P. C.; CARDOSO, J. B. Equilíbrio higroscópico e atividade de água para ovo integral processado por “spray dryer”. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n.1, p.15-22, 2002.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. Weley series in probability and mathematical statistics. New York: John Wiley & Sons, 1998. 736 p.

FASINA, O. O. Thermodynamic properties of sweetpotato. **Journal of Food Engineering**, v. 75, p. 149–155, 2006.

GHODAKE, H. M.; GOSWAMI, T. K.; CHAKRAVERTY, A. Moisture sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 827-935, 2007.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980. 381p.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: **Métodos Químicos - Físicos para Análise de Alimentos**, 1^a edição digital. São Paulo. p. 812, 2008.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, v. 11, p. 109-116, 1976.

KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 1 - Some fundamental statistical problems associated with the analysis of Van't Hoff and Arrhenius data. **Journal of Physical Chemistry**, v. 80, p. 2335-2341, 1976a.

KRUG, R. R.; HUNTER, W. G.; GRIEGER, R. A. Enthalpy-entropy compensation. 2 - Separation of the chemical from the statistical effect. **Journal of Physical Chemistry**, v. 80, p. 2341-2351, 1976b.

LEFFLER, J. E. The enthalpy-entropy relationship and its implications for organic chemistry. **The Journal of Organic Chemistry**, v. 101, p. 1202-1231, 1955.

LIU, L.; GUO, Q. X. Isokinetic relationship, isoequilibrium relationship, and enthalpy-entropy compensation. **Chemical Reviews**, v. 101, p. 673–695, 2001.

MACMINN, W. A. M.; AL-MUHTASED, A. H.; MAGEE, T. R. A.. Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials. **Journal of Food Engineering**, v. 38, p.505-510, 2005.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 109-119, 1996.

MASUZAWA, M.; STERLING, C. Gel-water relationships in hydrophilic polymers: thermodynamics of sorption of water vapour. *Journal of Polymer Science*, v. 12, p. 20-23, 1968.

MAZZA, G.; LEMAGUER, M. Water sorption properties of yellow globe onion. **Canadian Institute of Food Science and Technology**, v. 11, p. 189–193, 1978.

MOREIRA, R.; CHENLO, F.; TORRES, M.D.; VALLEJO, N.. Thermodynamic analysis of experimental sorption isotherms of loquat and quince fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 88, p. 514–521, 2008.

MOHSENI, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986, 841 p.

MULET, A.; GARCIA-PASCUAL, P.; SANJUÁN, N.; GARCIA-REVERTER, J. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, v. 53, p. 75-81, 2002.

ÖZDEMİR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, p. 225–233, 1999.

PALIPANE, K.B.; DRISCOLL, R.H. Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. **Journal of Food Engineering**, London, v.18, n.1, p.63-76,1992.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão, **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, p. 373–378, 2007.

RIZVI, S. S. H.; BENADO, L. A. Thermodynamic properties of dehydrated foods. **Food Technology**, v. 38, p. 83 – 92, 1984.

RIZVI, S. S. H. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Academic Press, p. 223-309, 1995.

VAN DEN BERG, C. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. In: **Engineering and Food** (edited by B. M. McKenna). p. 311-321. New York: Elsevier Applied Science. 1984.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 14, p. 269-287, 1991.

CAPÍTULO 2

Avaliação das propriedades físicas e sensoriais do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens durante o armazenamento

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho avaliar as propriedades físicas e sensoriais do café torrado, em diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens durante o armazenamento. Foram utilizados grãos de café arábica com teor de água inicial de $0,1234 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$, torrados no ponto de torra médio, com perda de massa de 17%, tendo sido estabelecido quatro níveis granulométricos: grão inteiro, grossa, média e fina. Em seguida, foram acondicionados em embalagens de dois diferentes tipos de filmes: PEBD/PP (embalagem 1) e PET/BOPP metalizado (embalagem 2) e armazenados em câmara tipo BOD a $25 \text{ }^\circ\text{C}$. A cada 30 dias eram feitas as seguintes análises: teor de água, atividade de água, massa específica unitária, avaliação da cor e análise sensorial. Os tipos de filmes utilizado na composição do material das embalagens não afetaram a qualidade final do café torrado nos diferentes níveis granulométricos; o teor de água do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos e os dois tipos de embalagens não ultrapassaram os limites estabelecidos pela legislação brasileira; a atividade de água do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos, aumentou ao longo do armazenamento na embalagem 1, e na embalagem 2 ela diminuiu por causada presença de válvula; a massa específica unitária não foi sensível ao aumento do teor de água do café torrado; o café torrado escureceu ao longo do armazenamento; o café torrado e moído, nos diferentes níveis granulométricos e armazenado em dois tipos de embalagens, enquadra-se na categoria *gourmet*, mantendo as características positivas de acidez, doçura e corpo.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the physical and sensorial properties of roasted coffee in different granulometric levels and two types of packaging during the storage. Arabica coffee grains were utilized with an initial water content of $0.1234 \text{ kg}_w \text{ kg}_{dm}^{-1}$, roasted until the medium roast point, with a weight loss of 17%, in which four granulometric levels were established: whole grains and thick, medium and thin granulometries. Then, it was packaged with two different types of films: LDPE/PP (Package 1) and PET/metalized BOPP (Package 2), and stored in a BOD chamber at 25 °C. In each 30 days, the following analyses were realized: moisture content, water activity, unitary density, color evaluation and sensorial analysis. The types of films used in the composition of packaging material did not affect the final quality of roasted coffee for all granulometric levels; the moisture content of roasted coffee did not exceed the limits established by Brazilian legislation for all granulometric levels and both types of packaging; the water activity for roasted coffee in all granulometric levels increased during storage in package 1, and in the package 2 it decreased due to the presence of a valve; the unitary density was not sensitive to the increase in roasted coffee moisture content; the roasted coffee became darker during storage; the roasted and ground coffee stored in two types of packaging with different granulometries fits into gourmet category, keeping the positive characteristics of acidity, sweetness and body.

2.1. INTRODUÇÃO

O café torrado e moído é susceptível à perda de qualidade pela exposição ao oxigênio, à luz, à umidade e a temperaturas elevadas. A oxidação das substâncias responsáveis pelo aroma e sabor e a oxidação de lipídios contidos no café levam à perda do sabor e odor característicos e ao desenvolvimento do sabor de ranço (ALVES et al., 2003). A qualidade do café torrado e moído também é função do grau de torrefação, da granulometria, da porosidade e das características do grão tais como variedade, número de defeitos, maturação etc.

O efeito da temperatura, da atividade de água e da pressão parcial de oxigênio foi estudado por Cardelli e Labuza (2001), na determinação da vida de prateleira de café torrado e moído. Entre estes fatores, o oxigênio teve papel crítico, acelerando em cerca de 20 vezes a deterioração com o aumento da pressão parcial deste gás de 0,5 para 21,3 kPa. O segundo efeito mais importante foi a atividade de água, reduzindo a vida útil do café em aproximadamente 60% para cada 0,1 de seu aumento. Essa redução foi atribuída ao escurecimento não enzimático, seguido pela temperatura, sendo que a cada 10 °C de aumento observou-se redução de 20% na vida de prateleira do café torrado e moído.

A composição química do café torrado e moído durante 210 dias de armazenamento foi avaliada por Fernandes et al. (2003). O café armazenado a 5 °C apresentou os menores valores de teor de água comparados aos armazenados a 25 °C. Em ambos os casos, eles não ultrapassaram os valores estabelecidos pela legislação vigente.

Diferentes filmes e sistemas de armazenagem para o café torrado e moído foram avaliados por Ramos e Castaño (2000). O produto armazenado por 180 dias em embalagem com o filme PET/Al/PE a 251 mbar ($\pm 0,05$) de vácuo e com gás carbônico, assim como com o PET/PE a 251 mbar ($\pm 0,05$) de vácuo, apresentaram os menores valores para o teor de água. Além disso, o

café escureceu com o decorrer do tempo, para os diferentes tratamentos, devido às reações de oxidação e à luz.

A torrefação do café é necessária para a formação de compostos que conferem as características do sabor, do aroma e da cor. Diferenças são observadas nas propriedades físicas e químicas do grão, dependendo do ponto de torra, determinado pelo binômio tempo-temperatura empregado no processo. Vargas (2010), ao estudar as propriedades físicas e a qualidade do café em diferentes condições de torrefação, observou que os pontos de torra médio claro e médio propiciaram ao café as melhores características de acidez, doçura e corpo, para as temperaturas de 255, 284, 305 e 335 °C.

O principal objetivo da moagem é aumentar a superfície específica de extração, ou seja, aumentar a extensão da interface entre a água e o sólido a fim de facilitar a transferência de substâncias solúveis e emulsão para a bebida (ILLY e VIANI 1995). Todavia, segundo Pádua et al. (2002), este é um fator de complicação para a preservação da qualidade, pois com a ruptura das células ocorre exposição do conteúdo celular às diversidades do ambiente de armazenamento, favorecendo as reações químicas.

O controle da umidade relativa, da temperatura ambiente, da presença de luz e oxigênio tem possibilitado evitar perdas significativas da qualidade do café torrado, inteiro e moído. Este controle tem sido alcançado principalmente pelo uso de embalagens adequadas durante o envase.

No mercado de embalagens para café torrado, inteiro e moído, existem alguns sistemas de embalagens e grande variedade de filmes plásticos de múltiplas camadas, ou seja, composto por mais de dois plásticos diferentes. Isto porque geralmente, cada polímero tem uma propriedade específica, como barreira ao vapor de água, aos gases oxigênio e carbônico, a luz.

O polietileno de baixa densidade (PEBD) é produzido pela da polimerização aleatória do etileno, resultando em um polímero ramificado, que é uma mistura de longas moléculas com cadeia principal de diferentes tamanhos, ramificações de comprimentos variados e ramificações secundárias

(SARANTOPÓULOS et al., 2002; COUTINHO et al., 2003). Segundo esses mesmos autores, o PEBD tem inúmeras aplicações, tanto em filmes simples como multicamadas, especialmente devido à barreira ao vapor de água, às suas propriedades de selagem e ao equilíbrio em propriedades mecânicas e ao seu baixo custo.

O polipropileno (PP) é a poliolefina obtida pela polimerização do propileno. É um polímero linear, com quase nenhuma insaturação. As propriedades determinantes para a aplicação do PP em embalagens flexíveis são transparência, rigidez, resistência a óleos e gorduras e baixa permeabilidade ao vapor de água (SARANTOPÓULOS et al., 2002). O PP é usado na fabricação de brinquedos, copos plásticos, filmes orientados, recipientes para alimentos, remédios e outros.

O polipropileno biorientado (BOPP) é obtido pela orientação das cadeias moleculares do PP, permitindo a obtenção de filmes muito finos com propriedades adequadas à conversão e ao manuseio. Isso promove aumento na resistência à tração e na rigidez do material, melhora a transparência, o brilho e a lisura, além disso, reduz a permeabilidade a gases e ao vapor de água (SARANTOPÓULOS et al., 2002).

Esses mesmos autores afirmam que propriedades como lisura, estabilidade dimensional e redução da espessura tornam os filmes biorientados substratos adequados à metalização. Os filmes de BOPP metalizados são boas opções em materiais barreira para estruturas laminadas, especialmente em relação ao vapor de água e à luz. Muitos desenvolvimentos atualmente são voltados à obtenção de filmes de BOPP metalizados de alta barreira ao vapor de água e a gases, visando à melhor proteção dos produtos acondicionados (SARANTOPÓULOS et al., 2002).

O politereftalato de etileno (PET) é uma resina muito popular como material de embalagem, especialmente no segmento de embalagens rígidas (garrafas e frascos) e de filmes biorientados. Isso se deve à elevada resistência

mecânica, aparência nobre (brilho e transparência), barreira a gases, entre outras (SARANTOPÓULOS et al., 2002).

Entre os sistemas de embalagens para o acondicionamento do café torrado, inteiro e moído o sistema com atmosfera normal e o sistema controlado com válvulas desgaseificadoras foram usados neste trabalho.

As válvulas são acionadas por diferença de pressão criada pela desgaseificação do café. Elas são unidirecionais, ou seja, permitem a saída do dióxido de carbono e do oxigênio do interior da embalagem (RIÑÑO e JARAMILLO, 2000). No sistema com atmosfera normal, a barreira da embalagem não é crítica frente à perfuração, havendo contato do produto com o ar do ambiente de armazenamento, permitindo a exposição aos agentes externos indesejáveis, diminuindo a vida útil do produto.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar as propriedades físicas e sensoriais do café torrado em diferentes níveis granulométricos e dois tipos embalagens ao longo do armazenamento.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido nos Laboratórios de Análise de Qualidade Sensorial e de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (Centreinar), localizado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa – Minas Gerais (MG).

2.2.1. Matéria-Prima

Foram utilizados grãos de café beneficiados, com tamanho acima da peneira 16, da espécie arábica (*Coffea arabica L.*), variedade Catuaí Vermelho, com teor de água inicial de $0,1234 \text{ kg}_a \text{ kg}_{ms}^{-1}$ adquiridos de uma unidade beneficiadora de café localizada em Viçosa, MG.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos de polietileno e armazenadas em câmara tipo BOD a temperatura de $18 \text{ }^\circ\text{C}$, a fim de manter as características iniciais do produto até sua torrefação. Antes das operações de torrefação, as amostras foram expostas à temperatura ambiente por aproximadamente 12 horas, visando a atingir o equilíbrio térmico para minimizar as alterações relacionadas à temperatura.

2.2.2. Processo de torrefação

Para a torrefação dos grãos de café, foi utilizado torrefador com 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 mantida constante para garantir que a temperatura do torrefador permanecesse estável durante todo o processo. Antes de iniciar a torrefação, foi feito o pré-aquecimento do torrefador para estabilização da temperatura no interior do cilindro rotativo. A temperatura média de torrefação foi de $284 \text{ }^\circ\text{C}$. O ponto de torra foi estabelecido quando a temperatura da massa de grão atingiu cerca de $235 \text{ }^\circ\text{C}$ para um intervalo de tempo de aproximadamente 16 minutos, com perda de massa de 17%, que

equivale ao padrão de torra para classificação de grãos de café baseado no número Agtron (SCCA # 55), torra média.

Para a medição da temperatura da amostra, foi utilizado termômetro infravermelho portátil, marca Mult-Temp, para leituras entre -50 e 500 °C, com tempo de resposta de 1 segundo, precisão de 2 °C, resolução de 0,1 °C.

2.2.3. Moagem

Depois de torrado o café, foram estabelecidos quatro níveis granulométricos: grão inteiro, grossa, média e fina, tendo sido os três últimos níveis obtidos pela moagem do produto em moinho da marca Mahlkönig, seguindo recomendações da ABIC (2004) (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação com base na percentagem de retenção em peneiras granulométricas números 12, 16, 20, 30 e fundo, em equipamento específico com agitação por 10 minutos e reostato na posição 5, ou similar

moagem	% de retenção			tolerância para o % que passa da peneira 30	
	peneiras 12 e 16	peneiras 20 e 30	fundo	mínimo	máximo
grossa	33	55	12	9	15
média	7	73	20	16	24
fina	0	90	30	25	40

Fonte: ABIC (2004).

2.2.4. Embalagem e armazenagem

As embalagens utilizadas neste trabalho foram doadas por comerciantes de café torrado e moído da cidade de Viçosa, MG.

Após a moagem, cerca de 250 g de café foram acondicionados em embalagens do tipo almofada, estando o sistema e o material descritos na Tabela 2. Em seguida, os pacotes foram armazenados em câmara tipo BOD (Figura 1), sob temperatura de 25 °C e umidade relativa de 65%, durante 120 dias. A cada 30 dias foram retiradas amostras para as avaliações.

Tabela 2: Descrição dos sistemas de atmosfera e do material que compõe as embalagens

embalagem	sistema de atmosfera	material
1	normal	PEBD/PP
2	controlado, com válvula	PET/BOPP metalizado



1

2

Figura 1: Dois tipos embalagens contendo café torrado em diferentes níveis granulométricos, armazenados em câmara tipo BOD na temperatura de 25 °C por 120 dias.

2.2.5. Teor de água

O teor de água das amostras foi determinado empregando-se o método da estufa a 105 ± 3 °C até massa constante, segundo Métodos Físico-Químicos para Análise de Alimentos (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

2.2.6. Atividade de água

A determinação da atividade de água foi feita utilizando-se o aparelho Aqualab 4 TE, da Decagon Devices, que fornece leituras de atividade de água no intervalo de 0,050 a 1,000, com precisão de $\pm 0,003$ e resolução de 0,0001.

2.2.7. Massa específica unitária

A massa específica unitária do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e armazenados em dois tipos embalagens foi determinada,

pelo método de deslocamento de fluido em picnômetro Hubbard com junta esmerilada, segundo calibração prévia com água destilada (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008), num ambiente a 25 °C. O fluido utilizado foi óleo vegetal de girassol na mesma temperatura.

A Equação 1 foi empregada para a obtenção dos valores de massa específica unitária.

$$\rho_u = \frac{m_c}{m_{od}} \rho_o \quad (1)$$

em que:

ρ_u : massa específica unitária, kg m^{-3} ;

ρ_o : massa específica unitária do óleo, kg m^{-3} ;

m_c : massa aproximada de 25 grãos de café torrado, kg; e

m_{od} massa do óleo deslocado, kg.

2.2.8. Avaliação da cor

Para o acompanhamento da cor das amostras ao longo do armazenamento, foi utilizado o sistema CIE 1976, um sólido de cores definido por três coordenadas (Figura 2).

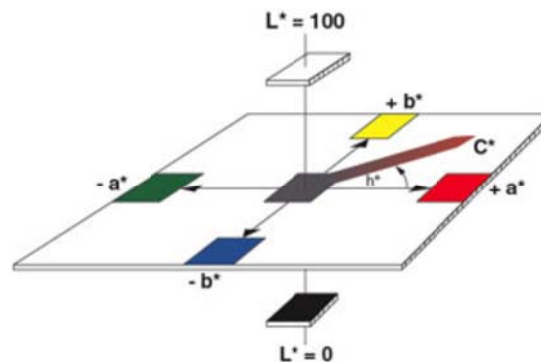


Figura 2: Sólido de cores do sistema CIE $L^* a^* b^*$.

As amostras foram submetidas à leitura em colorímetro tristímulo, para leitura direta de reflectância das coordenadas L^* (luminosidade) em uma escala de 0 (totalmente preto) a 100 (totalmente branco). Os valores intermediários compreendem uma escala de cinza. As coordenadas a^*

(tonalidades vermelha/verde) e b^* (tonalidades amarela/azul) também foram mensuradas, empregando a escala CIE, utilizando o iluminante 10°/D65.

A partir dos valores de L^* , a^* e b^* , foi calculado a diferença total de cor (ΔE), Equação 2, levando-se em consideração as condições iniciais de armazenamento.

$$\Delta E = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad (2)$$

2.2.9. Análise sensorial

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

As principais características analisadas foram acidez, adstringência, amargor, sabor, corpo e doçura da bebida, numa pontuação geral na escala de 100 pontos.



Figura 3: Mesa e profissionais para a avaliação sensorial de café torrado.

2.2.10. Análise estatística

O experimento foi montado segundo o esquema em parcela subdividida, tendo nas parcelas um esquema fatorial (2 embalagens x 4 níveis granulométricos), e nas subparcelas o tempo de armazenamento, no delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

Para a análise sensorial, foi montado o mesmo esquema sendo o delineamento em blocos casualizados.

Independentemente de a interação dos três fatores (embalagem, níveis granulométricos e tempo) ser significativa ou não, optou-se pelo seu desdobramento devido ao interesse em estudo.

Os dados foram analisados por meio de análise de variância e regressão. Os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade no coeficiente de determinação e no fenômeno biológico.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Teor de água

A determinação do teor de água é uma das medidas mais importantes e utilizadas na análise de alimentos, estando relacionada com sua estabilidade, qualidade e composição.

Na Tabela 3, estão as médias do teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Tabela 3: Médias do teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	0,0103 aA	0,0103 aA	0,0103 aA	0,0103 aA
	2	0,0103 aA	0,0103 aA	0,0103 aA	0,0103 aA
30	1	0,0087 aB	0,0152 aA	0,0081 bB	0,0125 aA
	2	0,0119 aA	0,0150 aA	0,0121 aA	0,0139 aA
60	1	0,0073 bB	0,0089 bB	0,0102 abB	0,0130 aA
	2	0,0148 aA	0,0152 aA	0,0128 aA	0,0131 aA
90	1	0,0187 bA	0,0210 abA	0,0241 aA	0,0243 aA
	2	0,0073 cB	0,0094 bcB	0,0113 bB	0,0150 aB
120	1	0,0243 aA	0,0256 aA	0,0274 aA	0,0273 aA
	2	0,0081 cB	0,0124 abB	0,0109 bcB	0,0148 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A partir do 30º dia de armazenamento, houve diferença significativa do teor de água do café torrado, tanto entre os níveis granulométricos quanto entre as embalagens. Além disso, observou-se que as maiores médias são para as granulometrias menores, uma vez que nestas condições há maior superfície específica.

Na Figura 4, estão os valores observados e curvas estimadas do teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

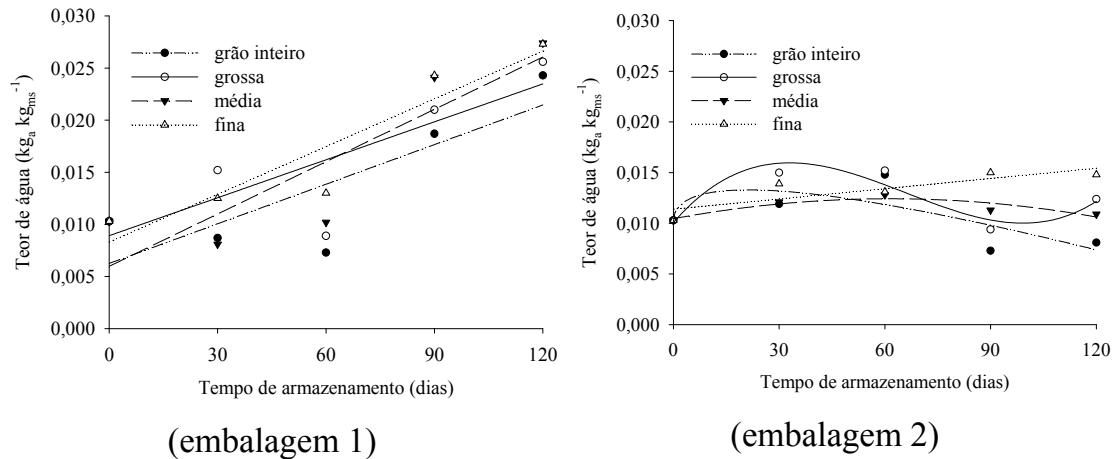


Figura 4: Valores observados e curvas estimadas do teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Nota-se que para a embalagem 1, o teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos aumentou ao longo do tempo de armazenamento, variando entre 0,0103 a 0,0274 $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$, assim como para a amostra de granulometria fina na embalagem 2. Já para os demais níveis granulométricos, na embalagem 2, o teor de água variou com o tempo de armazenamento de forma não esperada.

Os teores de água determinados estão de acordo com as normas vigentes de comercialização para o café torrado e para o café torrado e moído, de até 5% (b.u.), equivalente a 0,0526 $\text{kg}_a \text{kg}_{\text{ms}}^{-1}$ (BRASIL, 2010). E segundo Illy e Viani (1995), nesta condição, o teor de água retido no grão é considerado água de constituição.

A diferença observada do teor de água do café torrado entre as embalagens está na composição do material de que elas são feitas. O filme da embalagem 1 é composto por dois plásticos de boa barreira ao vapor de água, mas não tanto como o filme da embalagem 2 que tem baixa permeabilidade ao vapor de água e a gases, sendo esta uma das possíveis explicações. A outra justificativa seria a presença de válvula na embalagem 2, que tem a função de promover a saída do gás carbônico e do oxigênio do interior das embalagens, mas que possivelmente tenha facilitado também a saída do vapor de água.

No decorrer do experimento, observou-se nos primeiros dias de armazenamento que algumas amostras inflaram as embalagens pela liberação do gás carbônico produzido pela torrefação dos grãos. Contudo, ao longo do armazenamento, todas as embalagens 1 voltaram mais rapidamente à forma inicial em comparação com as formas da embalagem 2. Isto confirma a alta permeabilidade do polipropileno (PP) a gases e que possivelmente tenha havido perda do aroma do café.

Na Tabela 4, estão as equações ajustadas do teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação.

Tabela 4: Equações ajustadas do teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R ² /r ²
embalagem 1		
grão inteiro	$\hat{U} = 6,2856 \times 10^{-3} + 1,260 \times 10^{-4*} \times t$	0,6702
grossa	$\hat{U} = 8,908 \times 10^{-3} + 1,217 \times 10^{-4*} \times t$	0,6602
média	$\hat{U} = 5,982 \times 10^{-2} + 1,670 \times 10^{-4*} \times t$	0,7764
fina	$\hat{U} = 8,325 \times 10^{-3} + 1,527 \times 10^{-4**} \times t$	0,8745
embalagem 2		
grão inteiro	$\hat{U} = 0,0106 + 0,0004 \times \sqrt{t} - 0,0028^* \times t$	0,8968
grossa	$\hat{U} = 1,008 \times 10^{-2} + 4,032 \times 10^{-4***} \times t - 8,164 \times 10^{-6***} \times t^2 + 4,121 \times 10^{-8***} \times t^3$	0,8642
média	$\hat{U} = 1,047 \times 10^{-1} + 6,226 \times 10^{-5*} \times t - 5,09210^{-7*} \times t^2$	0,7928
fina	$\hat{U} = 1,142 \times 10^{-2} + 3,342 \times 10^{-5*} \times t$	0,6982

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.2. Atividade de água

Na Tabela 5, estão as médias da atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Tabela 5: Médias da atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	0,2736 aA	0,2375 bA	0,2422 aA	0,2032 bA
	2	0,2736 aA	0,2375 bA	0,2422 aA	0,2032 bA
30	1	0,3196 aA	0,3389 aA	0,2362 bA	0,2639 bA
	2	0,3425 aA	0,2249 bB	0,2559 bA	0,2561 bA
60	1	0,3494 aA	0,3463 aA	0,2939 bA	0,3001 bA
	2	0,3208 aA	0,2731 bB	0,2501 bB	0,2559 bB
90	1	0,3847 aA	0,3306 bA	0,3321 bA	0,3200 bA
	2	0,1962 aB	0,1157 bB	0,1177 bB	0,1453 bB
120	1	0,4154 aA	0,3610 bA	0,3580 bA	0,2990 cA
	2	0,1747 aB	0,1360 bB	0,1068 bB	0,1284 bB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Assim como o teor de água, a partir do 30º dia de armazenamento houve diferença significativa para a atividade de água entre as embalagens e entre os diferentes níveis granulométricos. Para as amostras de grão inteiro, esta variável resposta apresentou valores maiores em comparação com os demais níveis granulométricos estudados.

Na Figura 5, estão os valores observados e curvas estimadas da atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

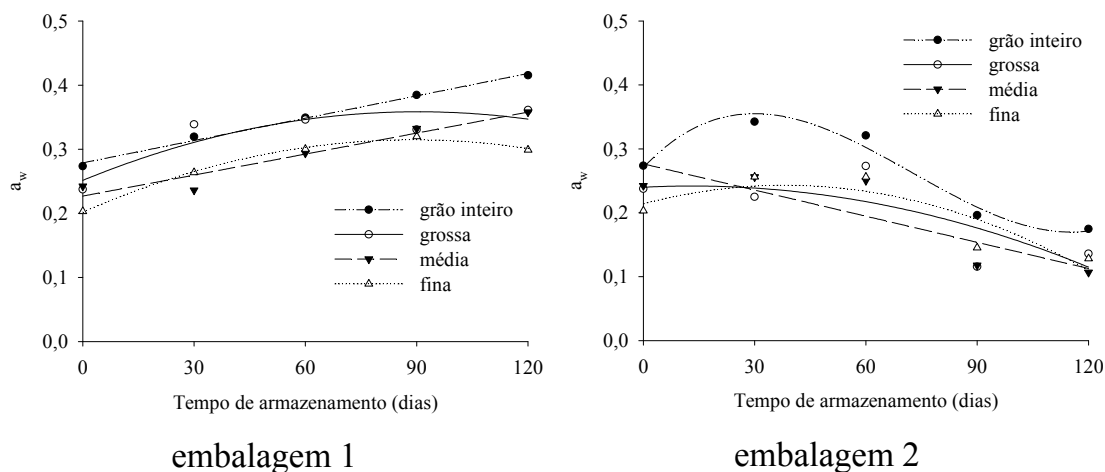


Figura 4: Valores observados e as curvas estimadas da atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Observa-se que para a embalagem 1, a atividade de água aumentou ao longo do tempo de armazenamento, variando entre 0,2032 a 0,4154. Para a embalagem 2, ela variou de 0,1068 a 0,3494, diminuindo com o tempo de armazenamento. As propriedades do material de que é composto cada filme plástico, como permeabilidade ao vapor de água e a gases, e a presença de válvula foram, possivelmente, fatores determinantes para os valores da atividade de água.

De acordo com Illy e Viani (1995), nesta faixa de atividade de água o *status* de agregação da água à estrutura do café torrado é de monocamada, e a atividade de água é caracterizada como baixa. Além disso, esses mesmos pesquisadores afirmam que a oxidação lipídica deve ser a reação mais importante de deterioração do café torrado, e a atividade enzimática se inicia quando a atividade de água é de 0,3.

Cardelli e Labuza (2001), ao estudarem a vida de prateleira de café torrado e moído, constataram que a atividade de água proporcionou diminuição da vida útil do café em aproximadamente 60% para cada 0,1 de seu aumento, atribuindo isto ao escurecimento não enzimático. Neste contexto, a embalagem 2 foi melhor comparada a 1 pois reduziu com o tempo.

Observa-se, na Tabela 6, que as equações estabelecidas para a atividade de água apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação e significância dos coeficientes de regressão, indicando que elas são aptas para representar o fenômeno.

Tabela 6: Equações ajustadas da atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R ² /r ²
embalagem 1		
grão inteiro	$\hat{a}_w = 2,788 \times 10^{-1} + 1,162 \times 10^{-3**} \times t$	0,9941
grossa	$\hat{a}_w = 2,515 \times 10^{-1} + 2,369 \times 10^{-3***} \times t - 1,311 \times 10^{-5***} \times t^2$	0,7957
média	$\hat{a}_w = 2,269 \times 10^{-1} + 1,092 \times 10^{-3**} \times t$	0,9278
fina	$\hat{a}_w = 2,020 \times 10^{-1} + 2,536 \times 10^{-3**} \times t - 1,425 \times 10^{-5**} \times t^2$	0,9950
embalagem 2		
grão inteiro	$\hat{a}_w = 2,705 \times 10^{-1} - 6,2 \times 10^{-3***} \times t - 1 \times 10^{-1***} \times t^2 + 5,978 \times 10^{-7***} \times t^3$	0,9691
grossa	$\hat{a}_w = 2,399 \times 10^{-1} + 2,911 \times 10^{-4***} \times t - 1,110 \times 10^{-5***} \times t^2$	0,6013
média	$\hat{a}_w = 2,763 \times 10^{-1} - 1,363 \times 10^{-3*} \times t$	0,7358
fina	$\hat{a}_w = 2,1413 \times 10^{-1} + 1,5137 \times 10^{-3***} \times t - 1,9844 \times 10^{-5***} \times t^2$	0,7824

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.3. Massa específica unitária

A Figura 6 representa de forma ilustrativa como foi a determinação da massa específica unitária do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos.

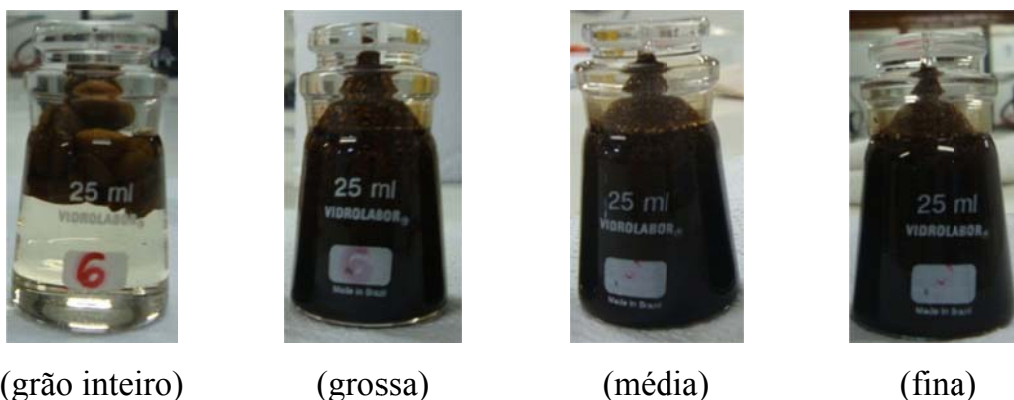


Figura 6: Picnômetros na determinação da massa específica unitária do café torrado nos diferentes níveis granulométricos.

Diferença significativa da massa específica unitária, entre as embalagens foi verificada apenas no tempo de armazenamento de 120 dias (Tabela 6). Entre os diferentes níveis granulométricos, quando o tipo de embalagem é estabelecido a partir do tempo zero, também se observou diferença estatística, com maiores valores para os grãos inteiros.

Tabela 6: Médias da massa específica unitária do café torrado nos diferentes níveis de granulometria e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	328,77 aA	308,35 bA	303,28 bcA	289,62 bA
	2	328,77 aA	308,35 bA	303,28 bcA	289,62 bA
30	1	330,55 aA	304,55 bA	306,62 bA	290,79 bA
	2	328,86 aA	306,06 bA	295,14 bcA	287,76 cA
60	1	324,14 aA	303,29 bA	297,21 bA	292,44 bA
	2	327,30 aA	302,13 bA	294,44 bA	294,12 bA
90	1	325,95 aA	309,09 bA	294,61 bcA	290,31 cA
	2	327,98 aA	303,77 bA	294,26 bA	292,24 bA
120	1	270,96aB	246,99 bB	271,02 aB	287,16 aA
	2	326,58 aA	302,35 bA	296,14 bA	294,15 bA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Figura 7, estão os valores observados e as equações ajustadas da massa específica unitária do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

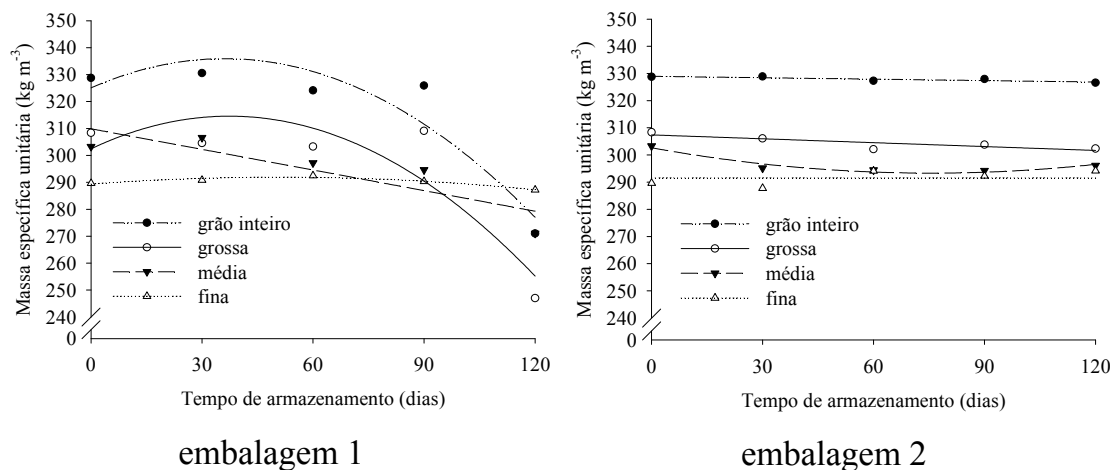


Figura 7: Valores observados e as curvas estimadas da massa específica unitária do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Tanto para a embalagem 1 quanto para a 2, a massa específica unitária permaneceu praticamente constante ao longo do tempo de armazenamento. Apenas aos 120 dias, para a embalagem 1, nos níveis granulométricos grão inteiro, grossa e média ocorreu diminuição. Esta propriedade física variou entre $246,99$ e $330,55 \text{ kg m}^{-3}$. Apesar de o teor de água das amostras da embalagem 1 aumentar com o tempo de armazenamento (Figura 4), ela não foi sensível a ponto de verificarmos alguma alteração na massa específica unitária.

Constata-se que as equações ajustadas para a massa específica unitária, Tabela 7, apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação e significância dos coeficientes de regressão, sendo aptas para descrever o fenômeno.

Tabela 7: Equações ajustadas da massa específica unitária do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R ² /r ²
embalagem 1		
grão inteiro	$\hat{\rho}_u = 3,250 \times 10^{+2} + 6,022 \times 10^{-1***} \times t - 8,358 \times 10^{-3***} \times t^2$	0,8711
grossa	$\hat{\rho}_u = 3,024 \times 10^{+2} + 6,495 \times 10^{-1***} \times t - 8,695 \times 10^{-3***} \times t^2$	0,7935
média	$\hat{\rho}_u = 3,098 \times 10^{-2} - 2,551 \times 10^{-1*} \times t$	0,7484
fina	$\hat{\rho}_u = 2,894 \times 10^{+2} + 1,004 \times 10^{-1*} \times t - 9,865 \times 10^{-4*} \times t^2$	0,9374
embalagem 2		
grão inteiro	$\hat{\rho}_u = 3,289 \times 10^{+2} - 1,751 \times 10^{-2*} \times t$	0,7326
grossa	$\hat{\rho}_u = 3,074 \times 10^{+2} - 4,764 \times 10^{-2*} \times t$	0,7280
média	$\hat{\rho}_u = 3,026 \times 10^{+2} - 2,525 \times 10^{-1*} \times t + 1,683 \times 10^{-3*} \times t^2$	0,9401
fina	$\hat{\rho}_u = 291,578$	

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.4. Avaliação da cor

2.3.4.1. Evolução da coordenada L*

Na Tabela 8, estão as médias da coordenada L* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Tabela 8: Médias da coordenada L* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	19,78 aA	19,32 cA	19,62 bA	19,71 abA
	2	19,78 aA	19,32 cA	19,62 bA	19,71 abA
30	1	21,21 aA	19,73 bA	19,06 cB	19,18 cA
	2	20,12 aB	19,49 bB	19,28 cA	19,07 dB
60	1	20,74 aA	19,68 bA	19,21 cA	19,08 cA
	2	20,45 aB	19,31 bB	19,22 bA	18,96 cB
90	1	20,72 aA	19,55 bA	19,04 cA	18,89 dA
	2	20,34 aB	19,25 bB	18,72 cB	18,86 dA
120	1	20,25 aA	19,09 bA	19,15 bA	19,15 bA
	2	19,80 aB	18,34 cB	18,42 bcB	18,50 bB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A partir do 30º dia de armazenamento, houve diferença significativa da coordenada L* entre as embalagens. Para a embalagem 2, as médias sempre foram menores por causa da metalização do filme, que reflete a luz proporcionando barreira. Além disso, diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade foi observada entre os níveis granulométricos.

A Figura 8 contém os valores observados e as equações ajustadas do comportamento da coordenada L* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

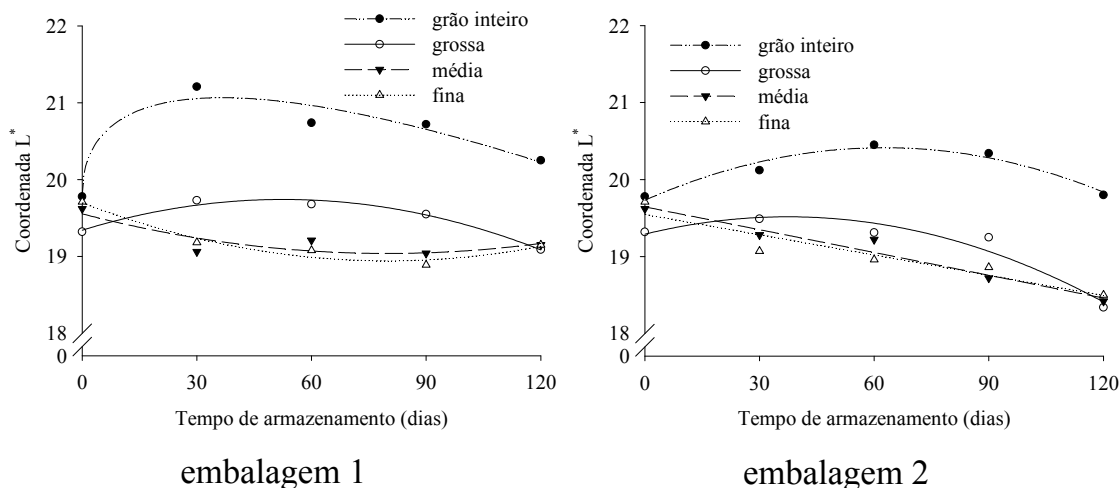


Figura 8: Valores observados e as curvas estimadas da coordenada L^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Atenta-se que para todos os níveis granulométricos na embalagem 2 e para os níveis grão inteiro e grossa na embalagem 1, houve comportamento decrescente da coordenada L^* ao longo do armazenamento, indicando escurecimento do produto. Para os demais níveis granulométricos na embalagem 1, o comportamento foi crescente, no entanto, os valores observados para essa variável resposta aos 120 dias de armazenamento foram menores do que no tempo inicial.

A análise de cor é um parâmetro importante para se avaliar a qualidade do café torrado durante o armazenamento. A luminosidade relaciona-se ao grau de escurecimento do produto, variando de 0 a 100. Os valores desta obtidos neste trabalho foram baixos.

A parte interna dos grãos não torra na mesma intensidade que a externa, permanecendo mais clara. Esse fator foi importante para se observarem valores da coordenada L^* maiores no nível granulométrico grão inteiro em comparação com os demais. Além disso, nestas amostras, algumas gotículas de óleo na superfície dos grãos pode ser verificada visualmente, interferindo possivelmente na leitura da cor.

Observa-se, na Tabela 9, que as equações que relacionam a evolução da coordenada L^* com o tempo do armazenamento apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação, além da significância dos coeficientes de regressão, indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas.

Tabela 9: Equações ajustadas da coordenada L^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R^2/r^2
embalagem 1		
grão inteiro	$\hat{L}^* = 19,7965 + 4,2169 \times 10^{-1*} \times \sqrt{t} - 3,4921 \times 10^{-2*} \times t$	0,9341
grossa	$\hat{L}^* = 19,3430 + 1,5135 \times 10^{-2*} \times t - 1,4416 \times 10^{-4**} \times t^2$	0,9749
média	$\hat{L}^* = 19,5564 - 1,3066 \times 10^{-2***} \times t + 8,2221 \times 10^{-5***} \times t$	0,7458
fina	$\hat{L}^* = 19,6936 - 1,8726 \times 10^{-2*} \times t + 1,1735 \times 10^{-2*} \times t^2$	0,9566
embalagem 2		
grão inteiro	$\hat{L}^* = 19,7275 + 2,2026 \times 10^{-2*} \times t - 1,7629 \times 10^{-4*} \times t^2$	0,9457
grossa	$\hat{L}^* = 19,2930 + 1,2062 \times 10^{-2} \times t - 1,6153 \times 10^{-4*} \times t^2$	0,9375
média	$\hat{L}^* = 19,6447 - 9,8711 \times 10^{-3**} \times t$	0,9607
fina	$\hat{L}^* = 19,5459 - 8,7800 \times 10^{-3**} \times t$	0,8935

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.4.2. Evolução da coordenada a^*

As médias da coordenada a^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento estão apresentados na Tabela 10. Para o nível de granulometria fina, foram observados os maiores índices de a^* em todos os tempos analisados. Ao longo do armazenamento, a intensidade de a^* praticamente não alterou entre as embalagens estudadas.

Tabela 10: Valores médios da coordenada a^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	8,99 cA	10,00 bA	10,09 bA	10,85 aA
	2	8,99 cA	10,00 bA	10,09 bA	10,85 aA
30	1	8,94 dA	9,94 cB	10,27 bA	11,04 aA
	2	8,60 dB	10,13 cA	10,33 bA	11,08 aA
60	1	8,63 cA	10,01 bA	10,19 bA	11,09 aA
	2	8,30 cB	10,03 bA	10,05 bA	11,09 aA
90	1	8,72 dA	9,99 cA	10,43 bA	11,16 aA
	2	8,31 dB	9,74 cB	10,16 bB	11,00 aA
120	1	8,69 dA	10,04 cA	10,41 bA	11,14 aA
	2	8,55 dA	10,02 cA	10,27 bB	10,95 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Figura 9 contém os valores observados e as equações ajustadas do comportamento da coordenada a^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

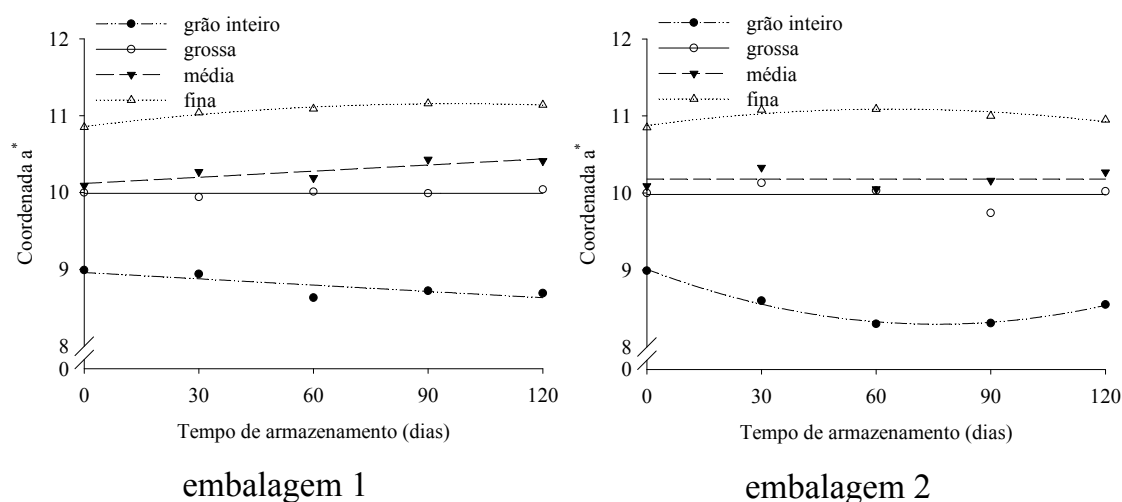


Figura 9: Valores observados e as curvas estimadas da coordenada a^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Analisando a Figura 9, verifica-se que tanto para a embalagem 1 quanto para a embalagem 2, existe uma ordem na coordenada a^* entre os níveis granulométricos. As amostras de tamanho de partícula menores apresentaram

os maiores valores e assim sucessivamente. Todavia, os valores da coordenada a^* variaram somente entre 8,30 e 11,16, indicando a cor como pouco vermelha. Além disso, a determinação do ponto de torra pela cor não pode ser parâmetro único, é preciso também informações do tempo e da temperatura de torrefação, como observado no tempo inicial de armazenamento.

As equações ajustadas da coordenada a^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11: Equações ajustadas da coordenada a^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R^2/r^2
embalagem 1		
grão inteiro	$\hat{a}^* = 8,9548 - 2,7066 \times 10^{-3*} \times t$	0,6508
grossa	$\hat{a}^* = 9,99$	
média	$\hat{a}^* = 1,0117 + 2,6533 \times 10^{-3*} \times t$	0,7672
fina	$\hat{a}^* = 10,8547 + 6,2575 \times 10^{-3**} \times t - 3,2646 \times 10^{-5*} \times t^2$	0,9823
embalagem 2		
grão inteiro	$\hat{a}^* = 9,0059 - 1,8670 \times 10^{-2**} \times t + 1,2306 \times 10^{-4**} \times t^2$	0,9879
grossa	$\hat{a}^* = 9,98$	
média	$\hat{a}^* = 10,18$	
fina	$\hat{a}^* = 10,8728 + 6,8685 \times 10^{-3**} \times t - 5,3757 \times 10^{-5*} \times t^2$	0,8290

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.4.3. Evolução da coordenada b*

Na Tabela 12 estão os resultados médios obtidos para a coordenada b* fornecidos pelo colorímetro.

Tabela 12: Valores médios da coordenada b* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	7,46 cA	7,65 bcA	7,82 bA	8,30 aA
	2	7,46 cA	7,65 bcA	7,82 bA	8,30 aA
30	1	6,53 dA	7,25 cB	7,62 bA	8,50 aA
	2	6,44 cA	7,62 bA	7,71 bA	8,43 aA
60	1	6,47 cA	7,47 bA	7,60 bB	8,51 aA
	2	6,40 dA	7,57 cA	7,86 bA	8,52 aA
90	1	6,63 dA	7,63 cA	7,94 bA	8,59 aA
	2	6,36 cB	7,70 bA	7,95 bA	8,72 aA
120	1	6,44 dA	7,49 cB	7,96 bA	8,78 aA
	2	6,53dA	7,73 cA	8,04 bA	8,53 aB

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O comportamento desta variável foi semelhante ao observado para a coordenada a*. Manteve uma ordem entre as amostras(Figura 10), tendo seus valores variaram entre 8,78 e 6,36, indicando o café como pouco amarelo.

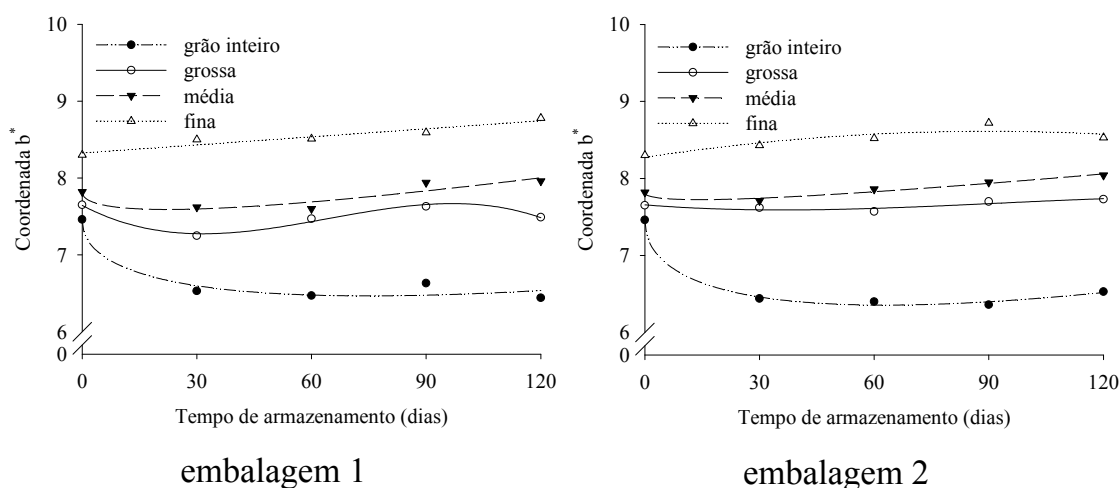


Figura 10: Valores observados e as curvas estimadas da coordenada b* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Observa-se na Tabela 13 um bom ajuste das equações para a coordenada b^* em função do tempo de armazenamento, uma vez que elas apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação e significância de até 10% para os coeficientes de regressão, sendo então aptas a descrever o fenômeno.

Tabela 13: Equações ajustadas da coordenada b^* do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R^2/r^2
embalagem 1		
grão inteiro	$\hat{b}^* = 7,4499 - 2,2771 \times 10^{-1*} \times \sqrt{t} + 1,3121 \times 10^{-2*} \times t$	0,9499
grossa	$\hat{b}^* = 7,6417 - 2,5936 \times 10^{-2***} \times t + 5,4227 \times 10^{-4***} \times t^2 - 2,8065 \times 10^{-6***} \times t^3$	0,9726
média	$\hat{b}^* = 7,8205 - 9,8951 \times 10^{-2} \times \sqrt{t} + 1,0586 \times 10^{-2*} \times t$	0,8095
fina	$\hat{b}^* = 8,3253 + 3,5066 \times 10^{-3**} \times t$	0,9114
embalagem 2		
grão inteiro	$\hat{b}^* = 7,4621 - 2,8133 \times 10^{-1*} \times \sqrt{t} + 1,7850 \times 10^{-2*} \times t$	0,9953
grossa	$\hat{b}^* = 9,9897 + 1,6767 \times 10^{-2***} \times t - 4,3433 \times 10^{-3***} \times t^2 + 2,4671 \times 10^{-6***} \times t^3$	0,9124
média	$\hat{b}^* = 7,8148 - 5,0015 \times 10^{-2*} \times \sqrt{t} + 6,6210 \times 10^{-3*} \times t$	0,9599
fina	$\hat{b}^* = 8,2708 + 7,5076 \times 10^{-3***} \times t - 4,1322 \times 10^{-5***} \times t^2$	0,8106

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.4.4. Diferença total de cor

As médias da diferença total de cor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos embalagens ao longo do armazenamento estão apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14: Médias da diferença total de cor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	0,00 aA	0,00 aA	0,00 aA	0,00 aA
	2	0,00 aA	0,00 aA	0,00 aA	0,00 aA
30	1	4,11 aA	0,81 bA	0,68 bA	0,57 bA
	2	3,95 aA	0,35 bA	0,38 bA	0,65 bA
60	1	2,99 aA	0,63 bA	0,57 bA	0,70 bA
	2	3,29 aA	0,57 bA	0,51 bA	0,69 bA
90	1	2,42 aB	0,41 bA	0,71 bA	1,01 bA
	2	3,36 aA	0,51 bA	1,16 bA	1,16 bA
120	1	1,88 aA	0,51 bB	0,65 bB	0,75 bB
	2	2,34 aA	1,35 bA	1,78 abA	1,68 abA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Pode-se observar que houve diferença significativa a partir do 90° dia de armazenamento entre as embalagens estudadas. E que de forma geral, o nível granulométrico grão inteiro apresentou maiores médias.

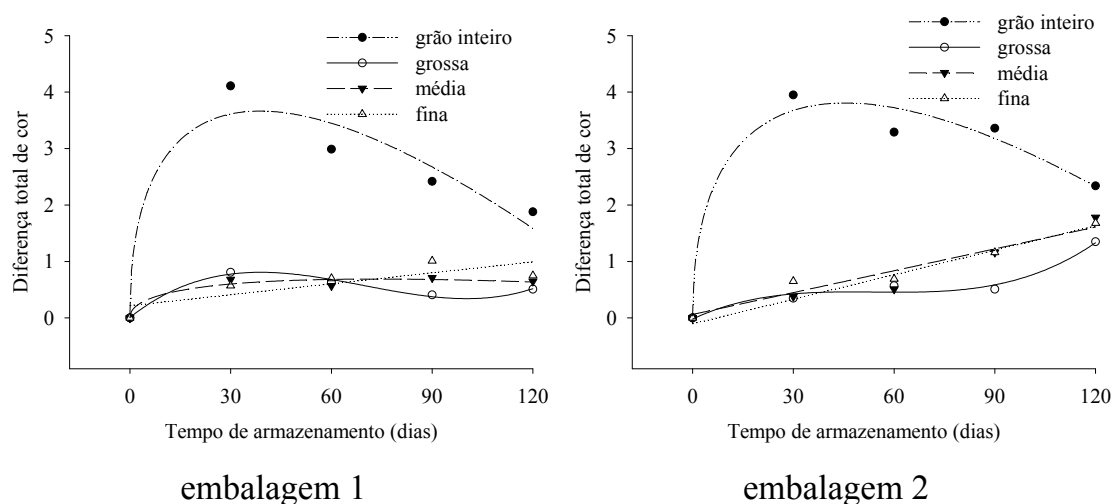


Figura 11: Valores observados e as curvas estimadas da diferença total de cor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

A diferença total de cor aumentou ao longo de tempo de armazenamento (Figura 11), variando entre 0,00 e 4,11. A sensível diferença observada entre o nível granulométrico grão inteiro e os demais, nos primeiros meses de armazenamento, se deve à coordenada L*.

Observa-se, na Tabela 15, que as equações que relacionam a diferença total de cor com o tempo do armazenamento apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação, além da significância dos coeficientes de regressão, indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas.

Tabela 15: Equações ajustadas da diferença total de cor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento, bem como seus respectivos coeficientes de determinação

níveis granulométricos	Equações ajustadas	R ² /r ²
embalagem 1		
grão inteiro	$\Delta\hat{E}^* = 8,0633 \times 10^{-2} + 1,1544^{**} \times \sqrt{t} - 9,2869 \times 10^{-2**} \times t$	0,8940
grossa	$\Delta\hat{E}^* = 8,7001 \times 10^{-3} + 4,7083 \times 10^{-2**} \times t - 8,3966 \times 10^{-4**} \times t^2 + 4,0224 \times 10^{-6**} \times t^3$	0,7207
média	$\Delta\hat{E}^* = 1,0782 \times 10^{-2} + 1,5797^* \times \sqrt{t} - 9,1944 \times 10^{-3**} \times t$	0,7563
fina	$\Delta\hat{E}^* = 2,1800 \times 10^{-1} + 6,501 \times 10^{-3***} \times t$	0,6705
embalagem 2		
grão inteiro	$\Delta\hat{E}^* = 3,4871 \times 10^{-2} + 1,1191^{**} \times \sqrt{t} - 8,3065 \times 10^{-2**} \times t$	0,8845
grossa	$\Delta\hat{E}^* = -1,8746 \times 10^{-2} + 2,7751 \times 10^{-2*} \times t - 5,2187 \times 10^{-4} \times t^2 + 3,2041 \times 10^{-6*} \times t^3$	0,7143
média	$\Delta\hat{E}^* = -1,0461 \times 10^{-1} + 1,4495 \times 10^{-2**} \times t$	0,8959
fina	$\Delta\hat{E}^* = 6,4505 \times 10^{-2} + 1,2907 \times 10^{-2**} \times t$	0,7106

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

*** Significativo a 10% de probabilidade pelo teste t.

2.3.5. Análise sensorial

Observa-se, pela Tabela 16, que não houve diferença estatística entre as amostras estudadas para o atributo acidez. Este variou de 1,44 a 4,33.

De acordo com Brasil (2010), a acidez é a percepção causada por substâncias como ácido clorogênico, cítrico, málico e tartárico produzindo gosto ácido. No entanto, ela pode ser agradável ou não, dependendo da natureza do ácido predominante na bebida. Uma acidez agradável contribui com o aumento da percepção de doçura e confere característica de fruta fresca à bebida (SCAA, 2009).

De acordo com Illy e Viani (1995), os cafés brasileiros são caracterizados pela menor percepção da acidez do que os da América Central, que também se sobrepõem quanto à intensidade do aroma.

Tabela 16: Médias da acidez do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	3,33 aA	4,33 aA	4,00 aA	3,67 aA
	2	3,33 aA	4,33 aA	4,00 aA	3,67 aA
30	1	3,44 aA	3,33 aA	3,11 aA	3,33 aA
	2	3,44 aA	3,67 aA	3,56 aA	3,78 aA
60	1	3,33 aA	2,67 aA	2,67 aA	3,11 aA
	2	2,89 aA	3,11 aA	2,89 aA	3,00 aA
90	1	1,89 aA	2,33 aA	2,00 aA	1,44 aA
	2	2,00 aA	1,67 aA	1,89 aA	1,78 aA
120	1	2,00 aA	1,78 aA	1,67 aA	1,89 aA
	2	1,56 aA	1,56 aA	1,78 aA	2,33 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Na Tabela 17 se encontram as médias do atributo amargor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento.

Diferença significativa para o amargor do café torrado entre as embalagens não foi constatada. Entre os níveis granulométricos no tempo zero, são observados maiores valores para a fina.

O amargor é um atributo de pontuação negativa, e conforme Brasil (2010) é causado por substâncias como cafeína, trigonelina, ácidos cafêico e quínico e outros compostos fenólicos que produzem gosto amargo.

Tabela 17: Médias do amargor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	0,00 bA	0,00 bA	0,67 abA	2,33 aA
	2	0,00 bA	0,00 bA	0,67 abA	2,33 aA
30	1	1,00 aA	2,11 aA	1,67 aA	1,22 aA
	2	2,22 aA	1,11 aA	1,22 aA	1,89 aA
60	1	1,44 aA	1,22 aA	0,78 aA	1,22 aA
	2	1,00 aA	1,22 aA	0,89 aA	1,11 aA
90	1	2,78 aA	2,00 abA	1,89 abA	0,78 bA
	2	2,11 aA	2,00 abA	2,00 aA	1,22 aA
120	1	1,44 aA	2,00 aA	1,22 aA	1,33 aA
	2	1,44 aA	1,56 aA	1,44 aA	1,89 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As médias da adstringência do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento estão apresentadas na Tabela 18. Não houve diferença estatística entre as amostras para este atributo, que variou de 0,00 a 1,78.

Assim como o amargor, a adstringência é um atributo de pontuação negativa. Segundo Brasil (2010), ele é identificado como a sensação de secura na boca deixada após a ingestão da bebida.

Tabela 18: Médias da adstringência do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	0,33 aA	0,00 aA	0,33 aA	1,00 aA
	2	0,33 aA	0,00 aA	0,33 aA	1,00 aA
30	1	0,78 aA	0,78 aA	0,89 aA	0,78 aA
	2	0,78 aA	0,56 aA	0,89 aA	1,67 aA
60	1	1,78 aA	1,56 aA	1,22 aA	1,56 aA
	2	1,11 aA	1,44 aA	1,11 aA	1,56 aA
90	1	0,67 aA	0,67 aA	0,67 aA	1,33 aA
	2	1,33 aA	1,11 aA	1,11 aA	1,22 aA
120	1	1,11 aA	0,67 aA	0,67 aA	1,33 aA
	2	0,78 aA	0,78 aA	0,89 aA	1,11 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As médias do atributo sabor das amostras de café estão apresentadas na Tabela 19. Observa-se diferença estatística apenas entre os níveis granulométricos no tempo zero de armazenamento. O grão inteiro apresentou as maiores médias. Possivelmente isso deve ao fato de a moagem neste nível granulométrico ser a de uso habitual pelos provadores, compreendida entre o nível grossa e média, e realizada no momento da prova da xícara, preservando a sensação da bebida causada pelos compostos químicos do café na boca.

Tabela 19: Médias do sabor do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	6,67 aA	5,67 abA	5,33 bcA	4,33 cA
	2	6,67 aA	5,67 abA	5,33 bcA	4,33 cA
30	1	5,56 aA	5,00 aA	5,44 aA	5,22 aA
	2	6,00 aA	5,67 aA	5,67 aA	5,22 aA
60	1	5,78 aA	5,67 aA	5,33 aA	5,56 aA
	2	5,44 aA	5,33 aA	5,89 aA	5,44 aA
90	1	5,33 aA	5,89 aA	5,33 aA	6,33 aA
	2	5,78 aA	5,67 aA	6,11 aA	6,22 aA
120	1	5,78 aA	5,78 aA	5,11 aA	5,11 aA
	2	5,33 aA	5,89 aA	5,67 aA	5,67 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A Tabela 20 contém as médias do corpo do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento. Diferença estatística foi observada entre os níveis granulométricos no tempo zero de armazenamento sendo a sensação tátil de oleosidade e viscosidade com menores valores para a fina.

Tabela 20: Médias do corpo do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	6,67 aA	6,33 aA	6,00 aA	4,67 bA
	2	6,67 aA	6,33 aA	6,00 aA	4,67 bA
30	1	5,67 aA	5,33 aA	6,00 aA	5,78 aA
	2	5,89 aA	5,33 aA	5,56 aA	5,56 aA
60	1	5,67 aA	5,89 aA	5,44 aA	5,78 aA
	2	5,67 aA	5,22 aA	6,00 aA	5,44 aA
90	1	5,78 aA	6,00 aA	5,67 aA	5,44 aA
	2	6,33 aA	5,56 aA	6,00 aA	5,78 aA
120	1	5,56 aA	5,44 aA	5,89 aA	5,33 aA
	2	5,44 aA	5,33 aA	5,56 aA	5,78 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As médias da doçura do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento estão apresentadas na Tabela 21. Houve diferença estatística entre os níveis granulométricos no tempo zero de armazenamento tendo as amostras com maiores superfícies específicas apresentado maiores valores.

A doçura assim como o corpo, o sabor e a acidez são características de pontuação positiva. E segundo SCAA (2009), a doçura refere-se ao agradável sabor doce, sendo sua percepção resultado da presença de determinados carboidratos.

Tabela 21: Médias da doçura do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	níveis granulométricos			
		grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	6,17 abA	7,00 aA	6,00 abA	4,83 bA
	2	6,17 abA	7,00 aA	6,00 abA	4,83 bA
30	1	5,67 aA	5,33 aA	5,44 aA	5,22 aA
	2	5,67 aA	5,56 aA	5,78 aA	4,89 aA
60	1	5,88 aA	5,22 aA	5,33 aA	5,00 aA
	2	5,33 aA	5,56 aA	5,67 aA	5,00 aA
90	1	6,33 aA	6,11 aA	5,56 aA	5,11 aA
	2	6,00 aA	5,44 aA	5,56 aA	5,67 aA
120	1	5,22 aA	5,44 aA	5,33 aA	5,44 aA
	2	5,78 aA	5,78 aA	5,44 aA	5,22 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Analisando-se a Tabela 22, constata-se que houve diferença estatística pra a qualidade global da bebida entre os níveis granulométricos no tempo zero de armazenamento.

Ainda na Tabela 22, observa-se que o café inicialmente classificado como estritamente mole apresentou qualidade global da bebida entre 75,22 e 83,33 sendo então enquadrado na categoria *gourmet*.

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 (COB – Classificação Oficial Brasileira), com ausência de defeitos pretos, verdes e ardidos e preto-verdes fermentados.

Pádua et al. (2002) afirmam que a moagem é fator de complicação para a preservação das características originais do café torrado, pois com a ruptura das células ocorre exposição do conteúdo celular às diversidades do ambiente de armazenamento, favorecendo as reações químicas. No entanto, observa-se que ela não interferiu na qualidade global da bebida ao longo de 120 dias de armazenamento.

Tabela 22: Médias da qualidade global da bebida do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens ao longo do armazenamento

tempo	embalagem	grão inteiro	grossa	média	fina
0	1	82,50 abA	83,33 aA	80,33 bA	74,17 cA
	2	82,50 abA	83,33 aA	80,33 bA	74,17 cA
30	1	78,56 aA	76,11 aB	77,44 aA	77,55 aA
	2	78,00 aA	78,56 aA	78,44 aA	75,89 aA
60	1	77,44 aA	76,67 aA	77,78 aA	76,67 aA
	2	77,22 aA	76,55 aA	78,44 aA	76,22 aA
90	1	75,89 aA	77,67 aA	76,00 aA	75,00 aA
	2	76,67 aA	75,22 aB	76,44 aA	76,44 aA
120	1	76,00 aA	75,78 aA	77,33 aA	75,11 aA
	2	75,89 aA	76,22 aA	76,67 aA	76,00 aA

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem, estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

2.4. CONCLUSÕES

- Os tipos de filmes utilizado na composição do material das embalagens não afetaram a qualidade final do café torrado nos diferentes níveis granulométricos.
- O teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens não ultrapassou os limites estabelecidos pela legislação brasileira.
- A atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos aumentou ao longo do armazenamento na embalagem 1, e na embalagem 2, ela diminuiu pela presença de válvula.
- A massa específica unitária não foi sensível ao aumento do teor de água do café torrado.
- O café torrado escureceu ao longo do armazenamento.
- O café torrado e moído nos diferentes níveis granulométricos e armazenado em dois tipos de embalagens enquadra-se na categoria *gourmet*, mantendo as características positivas de acidez, doçura e corpo.

2.5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABIC - Associação Brasileira da Indústria de Café. **Norma de Qualidade Recomendável e Boas Práticas de Fabricação de Cafés Torrados em Grão e Cafés Torrados e Moídos**. 18 de fevereiro de 2010. Disponível em: http://www.abic.com.br/arquivos/pqc_norma_qualidade_fev10.pdf. Acesso em: 29 de novembro de 2010.

ALVES, R. M. V.; MORI, E. E.; MILANEZ, C. R.; PADULA, M. Café torrado e moído em embalagens inertizadas. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. Campinas. v.23, p. 22-27, 2003.

BRASIL – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA). Instrução Normativa nº 16 de 24 de maio de 2010. **Diário Oficial da União**. Nº 98, terça-feira, 25 de maio de 2010. Disponível em: http://www.agricultura.gov.br/pls/portal/docs/PAGE/MAPA/LEGISLACAO/PUBLICACOES_DOU/PUBLICACOES_DOU_2010/MAIO_2010/DO1_25-05_0.PDF. Acesso em: 26 de novembro de 2010.

CARDELLI, C.; LABUZA, T. P.. Application of Weibull Hazard analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. **Lebensm.-Wiss. u.-Technol.**, v. 34, n. 5, p. 273-278, 2001.

COUTINHO, F. M. B.; MELLO, I. L.; MARIA, L. C. S. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

FERNADES, S. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; MELO, W. C.; MENDONÇA, L. M. V. L.; NERY, F. C. Avaliação da composição química do café torrado e moído durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Armazenagem, EspecialCafé- Viçosa-MG**, nº 7, p. 114-121,2003.

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

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz: **Métodos Químicos - Físicos para Análise de Alimentos**, 1ª edição digital. São Paulo. p. 812, 2008.

PÁDUA, F. R. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; LOPES, L. M. V.; MELO, W. C.; MORAIS, A. R. Avaliação sensorial e da composição química, durante o

armazenamento, do café torrado e moído. **Revista Brasileira de Armazenagem, Especial Café**–Viçosa–MG, n° 5, p. 15-21, 2002.

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.

RAMOS A., M. M.; CASTAÑO C.; J. J. Empaque y almacenamiento de café tostado y molido al vacío y em atmosferas de nitrógeno y gas carbónico. **Cenicafé**, v. 51 (2), p. 114-135, 2000.

RIANO L, C. E.; JARAMILLO C., B. Uso de válvulas degasificadoras para el empaque y almacenamiento de café tostado. **Cenicafé**, v. 51 (1), p. 66-77, 2000.

SCAA – Specialty Coffee Association of America. **Protocols | Cupping Specialty Coffee**. Revised: November 21, 2009. p1-7. Disponível em: <http://www.scaa.org/PDF/PR%20-%20CUPPING%20PROTOCOLS%20V.21NOV2009A.pdf>. Acesso em: 25 de junho de 2011.

SARANTOPÓULOS, C. I. G. L.; OLIVEIRA, L. M.; PADULA, M.; COLTRO, L.; ALVES, R. M. V.; GARCIA, E. E. C. **Embalagens plásticas flexíveis: principais polímeros e avaliação de propriedades**. Campinas: CETEA, 2002, v. 1, 267 p.

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

CONCLUSÃO GERAL

- O modelo de Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café torrado, nos diferentes níveis granulométricos;
- O teor de água de equilíbrio do café torrado é diretamente proporcional à umidade relativa do ar ambiente e decresce com o aumento de temperatura para um valor de umidade relativa;
- Com a redução do teor de água, ocorre aumento da energia liberada pela sorção da água no produto, representada pelos valores do calor isostérico integral de sorção;
- Com a redução do teor de água, ocorre aumento dos valores da entropia diferencial de sorção, sendo que, para um mesmo teor de água, a entropia diferencial do café torrado no nível granulométrico fina foi maior que do no nível média e grossa, respectivamente, devido à maior superfície específica;
- A teoria da compensação entalpia-entropia pode ser satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção, sendo controlado pela entalpia.
- Os tipos de filmes utilizado na composição do material das embalagens não afetaram a qualidade final do café torrado nos diferentes níveis granulométricos.
- O teor de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos e dois tipos de embalagens não ultrapassou os limites estabelecidos pela legislação brasileira.
- A atividade de água do café torrado nos diferentes níveis granulométricos aumentou ao longo do armazenamento na embalagem 1, e na embalagem 2, ela diminuiu pela presença de válvula.
- A massa específica unitária não foi sensível ao aumento do teor de água do café torrado.
- O café torrado escureceu ao longo do armazenamento.

- O café torrado e moído nos diferentes níveis granulométricos e armazenado em dois tipos de embalagens enquadra-se na categoria *gourmet*, mantendo as características positivas de acidez, doçura e corpo.

ANEXO

Resumo da análise de variância das variáveis teor de água (U), atividade de água (a_w), massa específica unitária (ρ_u), coordenadas L^* , a^* , b^* , diferença total de cor (DE), acidez, adstringência, amargor, sabor, corpo, doçura e qualidade global da bebida em função da embalagem (EMB), dos níveis de granulometria (NG) e do tempo de armazenamento(t).

Tabela A: Resumo da análise de variância das variáveis teor de água (U), atividade de água (a_w), massa específica unitária (ρ_u), coordenadas L^* , a^* , b^* , diferença total de cor (ΔE), em função da embalagem (EMB), dos níveis granulométricos (NG) e do tempo de armazenamento(t).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios						
		U	a_w	ρ_u	L^*	a^*	b^*	ΔE
EMB	1	0,000464**	0,284846**	1220,6877**	2,354801**	0,316213**	0,034003 ^{ns}	1,405986**
NG	3	0,000056**	0,027984**	5713,156**	9,877029**	28,65211**	17,43796**	24,70178**
EMB x NG	3	0,000002 ^{ns}	0,003043**	213,0937**	0,128784 ^{ns}	0,073412**	0,083132**	0,063500 ^{ns}
Resíduo (a)	16	0,000003	0,000511	37,50667	0,050465	0,005528	0,012593	0,071925
t	4	0,000302**	0,016596**	1737,187**	1,257525**	0,057740**	0,341850**	8,846670**
t x EMB	4	0,000428**	0,065482**	1635,137**	0,329366**	0,071199**	0,009908 ^{ns}	1,029722**
t x NG	12	0,000014**	0,000982**	277,8532**	0,602638**	0,127257**	0,382239**	2,803299**
t x EMB x NG	12	0,000007**	0,001551**	180,7926**	0,111425**	0,016273*	0,031326**	0,099451 ^{ns}
Resíduo (b)	64	0,000002	0,000262	65,47318	0,034874	0,008563	0,017775	0,118330
CV (%) parcela		13,10	8,64	2,03	1,15	0,74	1,47	24,86
CV (%) subparcela		10,90	6,18	2,68	0,96	0,93	1,74	31,88

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tabela B: Resumo da análise de variância das variáveis acidez, amargor, adstringência, sabor, corpo, doçura e qualidade global da bebida (QGB) em função da embalagem (EMB), dos níveis de granulometria (NG) e do tempo de armazenamento(t).

Fonte de variação	GL	Quadrados Médios						
		acidez	amargor	adstringência	sabor	corpo	doçura	QGB
Bloco	2	45,51204**	12,52315**	9,292593**	7,923148**	5,334259**	5,377778**	0,367592 ^{ns}
EMB	1	0,059259 ^{ns}	0,0037037 ^{ns}	0,075000 ^{ns}	0,578703 ^{ns}	0,003703 ^{ns}	0,033333 ^{ns}	0,625925 ^{ns}
NG	3	0,135802 ^{ns}	0,450617 ^{ns}	1,514506*	2,512037**	1,380247**	3,375309**	37,33580**
EMB x NG	3	0,209876 ^{ns}	0,450617 ^{ns}	0,052777 ^{ns}	0,121913 ^{ns}	0,198765 ^{ns}	0,065432 ^{ns}	0,406172 ^{ns}
Resíduo (a)	14	0,158597	0,515740	0,396296	0,330555	0,187169	0,368254	2,610979
t	4	20,05648**	4,456019**	3,055556**	0,320370 ^{ns}	0,558796 ^{ns}	1,618981*	63,21065**
t x EMB	4	0,137963 ^{ns}	0,047685 ^{ns}	0,297222 ^{ns}	0,254629 ^{ns}	0,093981 ^{ns}	0,072685 ^{ns}	0,091203 ^{ns}
t x NG	12	0,399691 ^{ns}	2,378858**	0,142592 ^{ns}	1,130864**	0,946450**	0,763425 ^{ns}	18,29645**
t x EMB x NG	12	0,146604 ^{ns}	0,442129 ^{ns}	0,179321 ^{ns}	0,202160 ^{ns}	0,196450 ^{ns}	0,225154 ^{ns}	18,29645 ^{ns}
Resíduo (b)	64	0,570833	0,839583	0,590509	0,3502315	0,314351	0,462037	1,670833
CV (%) parcela		14,27	52,76	67,65	10,30	7,57	10,83	2,09
CV (%) subparcela		26,92	73,47	68,01	9,70	9,92	11,46	1,35

** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

* Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

^{ns} Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.