

GABRIEL HENRIQUE HORTA DE OLIVEIRA

**PROPRIEDADES FÍSICAS E TERMODINÂMICAS DA SORÇÃO DO CAFÉ
TORRADO, INTEIRO E MOÍDO, DURANTE O ARMAZENAMENTO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

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

T

O48p
2013

Oliveira, Gabriel Henrique Horta de, 1982-
Propriedades físicas e termodinâmicas da sorção do café
torrado, inteiro e moído, durante o armazenamento / Gabriel
Henrique Horta de Oliveira. – Viçosa, MG, 2013.
xi, 165 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

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

1. Café - Fisiologia pós-colheita. 2. Café - Armazenamento.
3. *Coffea arabica*. 4. *Coffea canephora*. 5. Partículas (Física,
química, etc.). 6. Escoamento . I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22.ed. 633.7368

GABRIEL HENRIQUE HORTA DE OLIVEIRA

**PROPRIEDADES FÍSICAS E TERMODINÂMICAS DA SORÇÃO DO CAFÉ
TORRADO, INTEIRO E MOÍDO, DURANTE O ARMAZENAMENTO**

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

APROVADA: 12 de dezembro de 2013.

Prof. Fábio Lúcio Santos
(Coorientador)

Prof. Jadir Nogueira da Silva

Prof^a. Jane Selia dos Reis Coimbra

Dr. Sérgio Maurício Lopes Donzeles

Prof. Paulo Cesar Corrêa
(Orientador)

Aos meus pais Afonso e Gislene, e aos meus irmãos Gustavo e Tatiana por dividirem as alegrias e tristezas da vida, com amor, carinho, confiança, bondade e dedicação irrestritas.

DEDICO

À minha amada esposa, Ana Paula Lelis Rodrigues de Oliveira, pela paciência, companheirismo, incentivo, conselhos, carinho e amor incondicional.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua presença ininterrupta em minha vida.

A meus pais, irmão, cunhada e sobrinhos por me apoiarem sempre, mesmo por estar tanto tempo distante.

À minha esposa Ana, pelo amor, incentivo e ajuda, essenciais para a conclusão deste trabalho.

À família de minha esposa, pelo incentivo e votos de sucesso e felicidades.

Ao meu sogro Laudelino, pelo apoio e auxílio na obtenção do café.

Aos meus avós, tios e primos pela amizade e apoio.

Ao professor Paulo Cesar Corrêa, pela orientação, amizade, conselhos, ensinamentos, oportunidade e confiança.

Ao professor Fábio Lúcio Santos, pelo auxílio e sugestões.

Ao professor Carlito Calil Júnior e ao técnico de laboratório Silvio, pelo auxílio durante os testes realizados na USP de São Carlos.

Ao professor Wander Luiz Vasconcelos e ao Dr. Eduardo Henrique Martins Nunes, pelo auxílio e sugestões durante os testes realizados na UFMG de Belo Horizonte.

Ao professor Tetuo Hara, pelos conselhos, amizade e incentivos imprescindíveis para minha formação pessoal e profissional.

Aos amigos Fernando, Sílvia, Jonathas, Jofran e Rômulo, pela amizade sincera.

Aos amigos de pós-graduação Fernanda, Mayra e Guillermo, pela amizade, incentivo, companheirismo e ajuda durante a condução do trabalho.

Aos amigos de Brasília (DF) Kever e Marley, pela receptividade e amizade.

Aos amigos do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), pela amizade, incentivo e apoio constantes.

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

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

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do curso.

MUITO OBRIGADO!

BIOGRAFIA

GABRIEL HENRIQUE HORTA DE OLIVEIRA, filho de Afonso Ligório de Oliveira e Gislene Fátima Horta de Oliveira, nasceu na cidade de Mogi das Cruzes, Estado de São Paulo, em 26 de agosto de 1982.

Em maio de 2002 iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa (MG), graduando-se em dezembro de 2007. No período de julho de 2006 a janeiro de 2007, foi bolsista do programa CAPES/FIPSE para a realização de um semestre de estudos na Iowa State University – ISU, Ames, EUA.

Em março de 2008 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, obtendo o título de *Magister Scientiae* em fevereiro de 2010.

Em março de 2010 ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado, em Engenharia Agrícola da UFV, na área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de tese, requisito indispensável para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*, em dezembro de 2013.

Desde janeiro de 2011 é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Brasília – *Campus* Gama, na área de Agronegócio.

SUMÁRIO

RESUMO	VIII
ABSTRACT	X
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	6
<i>CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DE CAFÉ APÓS TORREFAÇÃO E MOAGEM</i>	10
1.1 INTRODUÇÃO	10
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	13
1.2.1 <i>Matéria-prima</i>	13
1.2.2 <i>Preparo das amostras</i>	13
1.2.3 <i>Propriedades físicas</i>	15
1.2.3.1 Teor de água.....	15
1.2.3.2 Atividade de água	15
1.2.3.3 Ângulo de repouso	16
1.2.3.4 Massa específica unitária e aparente.....	16
1.2.3.5 Porosidade.....	17
1.2.3.6 Cor	17
1.2.3.7 Granulometria a laser.....	17
1.2.3.8 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)	18
1.2.4 <i>Delineamento experimental</i>	18
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
1.3.1 <i>Teor de água</i>	19
1.3.2 <i>Atividade de água</i>	20
1.3.3 <i>Ângulo de repouso</i>	21
1.3.5 <i>Massa específica unitária, aparente e porosidade</i>	23
1.3.6 <i>Cor</i>	27
1.3.7 <i>Granulometria a laser</i>	32
1.3.8 <i>Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)</i>	33
1.4 CONCLUSÕES	35
1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
<i>CAPÍTULO 2 - CONSERVAÇÃO DE CAFÉ TORRADO E MOÍDO DURANTE O ARMAZENAMENTO</i>	41
2.1 INTRODUÇÃO	41
2.2 MATERIAL E MÉTODOS	44
2.2.1 <i>Matéria-prima</i>	44
2.2.2 <i>Preparo das amostras</i>	44
2.2.3 <i>Propriedades físicas</i>	46
2.2.3.1 Teor de água.....	46

2.2.3.2	Ângulo de repouso	46
2.2.3.3	Massa específica unitária e aparente.....	47
2.2.3.4	Porosidade.....	47
2.2.3.5	Cor	48
2.2.4	<i>Delineamento experimental</i>	48
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
2.3.1	<i>Teor de água</i>	49
2.3.2	<i>Ângulo de repouso</i>	53
2.3.3	<i>Massa específica unitária, aparente e porosidade</i>	57
2.3.4	<i>Cor</i>	63
2.3.4.1	<i>Evolução da coordenada L*</i>	63
2.3.4.2	<i>Evolução da coordenada a*</i>	67
2.3.4.3	<i>Evolução da coordenada b*</i>	72
2.3.4.4	<i>Índices colorimétricos ângulo hue e croma</i>	76
2.4	CONCLUSÕES	79
2.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
CAPÍTULO 3 - EFEITO DA GRANULOMETRIA E TORREFAÇÃO NA SORÇÃO DE ÁGUA EM CAFÉ DURANTE O ARMAZENAMENTO		83
3.1	INTRODUÇÃO	83
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	86
3.2.1	<i>Matéria-prima</i>	86
3.2.2	<i>Preparo das amostras</i>	86
3.2.3	<i>Atividade de água</i>	88
3.2.4	<i>Isotermas de adsorção</i>	88
3.2.5	<i>Propriedades termodinâmicas de sorção de água</i>	90
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	95
3.3.1	<i>Atividade de água</i>	95
3.3.2	<i>Modelagem matemática da adsorção dos grãos de café</i>	99
3.3.3	<i>Entalpia diferencial de adsorção</i>	113
3.3.4	<i>Entropia diferencial de adsorção</i>	117
3.3.5	<i>Energia Livre de Gibbs</i>	120
3.3.6	<i>Compensação entalpia-entropia</i>	125
3.4	CONCLUSÕES	127
3.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
CAPÍTULO 4 - PROPRIEDADES DE FLUXO DE CAFÉ TORRADO EM DIFERENTES GRANULOMETRIAS DURANTE O ARMAZENAMENTO.....		132
4.1	INTRODUÇÃO	132
4.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	136
4.2.1	<i>Matéria-prima</i>	136
4.2.2	<i>Preparo das amostras</i>	136
4.2.3	<i>Ensaio de cisalhamento</i>	138
4.2.4	<i>Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)</i>	142

4.2.5	<i>Ângulo de atrito com a parede</i>	142
4.2.6	<i>Coefficientes de atrito interno e externo</i>	143
4.2.7	<i>Função fluxo</i>	143
4.2.8	<i>Coefficiente K</i>	144
4.2.9	<i>Análise estatística</i>	144
4.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	146
4.3.1	<i>Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)</i>	146
4.3.2	<i>Ângulo de atrito com a parede</i>	152
4.3.3	<i>Coefficientes de atrito interno e externo</i>	155
4.3.4	<i>Função fluxo</i>	156
4.3.5	<i>Coefficiente K</i>	157
4.4	CONCLUSÕES	161
4.5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
	CONCLUSÕES GERAIS	164

RESUMO

OLIVEIRA, Gabriel Henrique Horta de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2013. **Propriedades físicas e termodinâmicas da sorção do café torrado, inteiro e moído, durante o armazenamento.** Orientador: Paulo Cesar Corrêa. Coorientadores: Fábio Lúcio Santos e Wander Luiz Vasconcelos.

O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nas propriedades físicas e de fluxo de café decorrentes do efeito da torrefação, da moagem, do tipo de material em contato com o produto e do armazenamento em duas temperaturas (10 e 30 °C) durante 180 dias. Foram utilizados grãos de café cru (*Coffea canephora* e *Coffea arabica*), descascados e secos, com teor de água médio inicial de 12,61 % (b.s.), adquiridos de comércio regional da Zona da Mata de Minas Gerais. Os grãos foram torrados em dois níveis: média clara (MC) e moderadamente escura (ME), utilizando um torrefador de queima direta de gás GLP, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm. Após o processo de torrefação, os grãos foram processados em moinho Mahlkönig, em três granulometrias diferentes: fina (0,59 mm), média (0,84 mm) e grossa (1,19 mm), além de mantido o lote de café inteiro. As amostras preparadas foram então armazenadas em sacos de polipropileno e mantidas em câmaras tipo B.O.D. em duas temperaturas de armazenamento (10 e 30 °C). Essas foram analisadas durante seis meses, em cinco tempos distintos (0, 30, 60, 120 e 180 dias) quanto às diferentes propriedades físicas e de fluxo: teor de água, atividade de água, ângulo de repouso, massa específica unitária e aparente, porosidade, cor, ângulo de atrito interno e ângulo de atrito efetivo, ângulo de atrito com a parede, coeficientes de atrito interno e externo, função fluxo e coeficiente K. Ademais, o método de análise granulométrica a laser foi avaliado, bem como a modelagem matemática e a obtenção das propriedades termodinâmicas do processo de adsorção de umidade pelo café foram realizadas. De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que: (a) a técnica de granulometria a laser não é adequada para a análise granulométrica de café torrado e moído; (b) a granulometria não afetou significativamente o teor de água de café, independentemente da espécie e nível de torrefação; (c) o nível de torrefação apresentou relação indireta significativa com o teor de água de café, em que quanto maior o grau de torra, menores são os valores desta propriedade física. O teor de água variou entre 1,47 e 4,30 % (b.s.); (d) os valores de ângulo de repouso de café torrado, inteiro e moído, variaram entre 20,5 e 47,2°, bem

como decrescem com o aumento da granulometria e com um menor nível de torrefação; (e) as propriedades massa específica unitária, massa específica aparente e porosidade têm comportamento direto com o incremento do grau de moagem de café, menor nível de torrefação e menor tempo de armazenamento. Os valores encontrados estão na faixa de 662,76 a 1232,40 kg m⁻³; 296,30 a 410,31 kg m⁻³; 46,3 a 74,9 %, respectivamente para a massa específica unitária, a massa específica aparente e a porosidade; (f) a partir dos 120 dias de armazenamento, ocorreu perda de coloração do café, visualizada pelas coordenadas L*, a* e b*, bem como pelos índices colorimétricos ângulo hue e croma; (g) a atividade de água de café torrado, independentemente da espécie avaliada, do nível de torrefação e da granulometria, incrementou ao longo do armazenamento. Esta propriedade oscilou entre 0,1493 e 0,4577; (h) o modelo de Sigma-Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café torrado; (i) com a redução do teor de água, ocorre aumento da entalpia e entropia diferencial de sorção, bem como da energia livre de Gibbs. Estes parâmetros se encontram entre 2178,07 e 3004,38 kJ kg⁻¹; -0,93 e 1,63 kJ kg⁻¹ K⁻¹; 96,20 e 300,25 kJ kg⁻¹, respectivamente para entalpia e entropia diferencial de sorção e energia livre de Gibbs; (j) a teoria da compensação entalpia-entropia pode ser satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção, sendo controlado pela entropia; (k) o ângulo de atrito interno e ângulo de atrito efetivo variaram significativamente devido à granulometria e ao nível de torrefação, não apresentando comportamento definido ao longo do armazenamento; (l) o nível de torrefação e a granulometria influenciaram diretamente no ângulo de atrito com a parede, em que torras mais intensas e com menor granulometria levam a maiores valores desta propriedade. Seus valores se encontram na faixa de 8,1 a 23,0°; 18,3 e 30°; 15,0 e 29,1°; 11,2 e 27,8°; respectivamente para o café inteiro, moído fino, médio e grosso; (n) a madeira foi o material de parede que possibilitou maiores valores de ângulo de atrito com a parede, seguida do concreto e do aço; (o) as amostras de café inteiras foram caracterizadas como de fluxo livre, sendo que quanto maior o grau de moagem, mais o produto se aproxima de fluxo de produto coesivo; e (p) as amostras de café torradas média clara, inteiras e armazenadas a 30 °C foram as que necessitam de estruturas de armazenagem que suportem maiores pressões, relatadas pelos valores do coeficiente K.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Gabriel Henrique Horta de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2013. **Physical and thermodynamic properties of roasted coffee sorption, whole and grinded, during storage.** Adviser: Paulo Cesar Corrêa. Co-advisers: Fábio Lúcio Santos and Wander Luiz Vasconcelos.

The aim of this work was to evaluate alterations on the physical and flow properties of coffee due to the effect of roast, grind, material type in contact with the product and storage in two temperatures (10 and 30 °C) during 180 days. Crude grain coffee (*Coffea canephora* and *Coffea arabica*) with average initial moisture content of 12.61 %, acquired at commerce from Zona da Mata region of Minas Gerais state, was used. Grain was roasted at two levels: medium light (MC) and medium-dark brown (ME), using a roaster of direct burning from GLP gas, with a rotating roaster cylinder at 45 rpm. Afterwards, grain was processed at a Mahlkönig milling, in three different particle sizes: thin (0.59 mm), medium (0.84 mm) and thick (1.19 mm), besides the whole coffee lot. Samples prepared were then stored at polypropylene bags and kept at B.O.D. type chambers in two storage temperatures (10 and 30 °C). These were analyzed during six months, at five distinct times (0, 30, 60, 120 and 180 days) regarding its different physical and flow properties: moisture content, water activity, repose angle, real and bulk densities, porosity, color, angle of internal friction and effective angle of friction, angle of friction with wall material, internal and external friction coefficients, flow function and K coefficient. Furthermore, particle size by laser method was evaluated, with addition of mathematical modeling and thermodynamic properties acquisition of the coffee moisture adsorption process were accomplished. According to the obtained results, it was concluded that: (a) particle size by laser technique is not suitable for analysis of particle size of roasted and grounded coffee; (b) particle size did not significantly affect moisture content of coffee, independently of species and roast level; (c) roast level presented significantly indirect relationship with moisture content of coffee, in which as higher roasting degree, lower are the values of this physical property. Moisture content varied between 1.47 and 4.30 % (d.b.); (d) values of repose angle of roasted coffee, whole and grinded, varied between 20.5 and 47.2°, decreasing with particle size increase and at a lower level of roast process; (e) real and bulk densities and porosity have direct behavior along with grinding level increment, lower

roasting degree and lower storage period. Values encountered are at the range of 662.76 to 1232.40 kg m⁻³, 296.30 to 410.31 kg m⁻³, 46.3 to 74.9 %, respectively to real density, bulk density and porosity; (f) from 120 days of storage, a loss of coffee color occurred, stated by L*, a* and b* coordinates, also by the colorimetric index hue angle and chroma; (g) water activity of roasted coffee, independently of species evaluated, roasting degree and particle size, increased throughout storage. This property oscillated between 0.1493 and 0.4577; (h) Sigma-Copace model best represented hygroscopic equilibrium for sorption of roasted coffee; (i) with moisture content reduction, an increase of differential enthalpy and entropy of sorption and Gibbs free energy occurs. These parameters are found between 2178.07 and 3004.38 kJ kg⁻¹, -0.93 and 1.63 kJ kg⁻¹ K⁻¹, 96.20 and 300.25 kJ kg⁻¹, respectively for differential enthalpy and entropy of sorption and Gibbs free energy; (j) enthalpy-entropy compensation theory can be applied satisfactory to the sorption phenomena, being entropy controlled; (k) angle of internal friction and effective angle of friction varied significantly due to particle size and roasting degree, not presenting a defined behavior throughout storage; (l) roasting and particle size degree influenced directly at angle of friction with wall material, in which intense roasting and lower particle size lead to higher values of this property. Its values are found within the range of 8.1 to 23.0°, 18.3 to 30°, 15.0 to 29.1°, 11.2 to 27.8°, respectively for whole coffee, thin, medium and thick grinding; (n) wood was the wall material that permitted higher values of angle of friction with wall, followed by concrete and steel; (o) whole coffee samples were characterized as free flow, being that at higher grinding, the product approaches cohesive flow; and (p) coffee samples roasted at medium light degree, stored at 30 °C are the ones that requires storage structures that supports higher pressures, reported by the K coefficient values.

INTRODUÇÃO GERAL

O café é um dos produtos agrícolas de maior importância no Brasil, tanto pela receita gerada pela exportação e industrialização, quanto pelo número de empregos diretos e indiretos relacionados ao seu agronegócio. Segundo a Conab (2012), a produção nacional de café beneficiado em 2012 foi de 50,82 milhões de sacas de sessenta quilos. Destas sacas, 26,94 milhões de sacas foram produzidas no estado de Minas Gerais, sendo 26,36 % desse montante pertinente às regiões da Zona da Mata, Jequitinhonha, Mucuri, Rio Doce, Central e Norte.

A comercialização do café verde, solúvel, torrado e moído, dentre outros (extratos, essências e concentrados) representa 9,2 % dos produtos exportados pelo país ocupando, desta forma, o quinto lugar no agronegócio nacional. Em 2011 foram exportados cerca de 71 mil sacas de café torrado em grão e 60 mil sacas de café torrado e moído (ABIC, 2011a).

No Brasil, a espécie *Coffea arabica* (café arábica) é tradicionalmente a mais explorada comercialmente, correspondendo a cerca de 75 % do total produzido no país, cujo maior produtor é o estado de Minas Gerais, com 68 % do total (ABIC, 2011b). Este fato se deve a maior aceitação da bebida produzida por esta espécie, além de uma maior valorização em relação à espécie *Coffea canephora* (café conilon) (FERNANDES *et al.*, 2003). Entretanto, o café conilon nos últimos anos vem aumentando sua participação no mercado interno, por apresentar maior produtividade, menor susceptibilidade a doenças e por ser adequado a regiões de baixa altitude (até 400 m) e de temperaturas mais elevadas (entre 22 e 26 °C) (PARTELLI *et al.*, 2006). Ademais, o conilon produz uma bebida mais “encorpada”, muito utilizada em misturas (*blends*) com o café arábica, no momento da industrialização dos cafés moídos e solúveis (ILLY & VIANI, 1996).

Segundo Farias *et al.* (2000), a comercialização do café industrializado, ou seja, o grão torrado e moído, encontra-se em ascensão. Entretanto, a comercialização

internacional do café industrializado originária de empresas brasileiras é recente e, ainda, em quantidades reduzidas. Nesta forma, o café pode ser diferenciado de acordo com os *blends* e apresentar diferentes preços, considerando-se também, a qualidade e especificidades da torração e moagem do grão.

De forma a atender o mercado com produtos de qualidade, a indústria cafeeira vem sofrendo constantes modificações no modo de processamento, de transporte e de armazenamento deste produto com o uso de novos procedimentos e equipamentos, com o intuito de viabilizar o transporte e o manuseio de forma adequada sem depreciar a qualidade do produto.

Estes equipamentos são necessários dentro da linha de processamento de café, já que a saída do produto final requer a movimentação de diferentes matérias-primas, nos diferentes níveis de processamento. A formulação de projetos inadequados de equipamentos pode ser resultado da falta de conhecimento das propriedades físicas e de fluxo dos materiais sólidos, entre eles, os sólidos agrícolas, podendo resultar no não escoamento dos mesmos (JENIKE, 1964; JENIKE & JOHONSON, 1979). A escoabilidade é uma característica dos produtos agrícolas a ser considerada por afetar a eficiência e a confiabilidade da operação e é muito influenciada pelas propriedades físicas do material biológico. Calil Junior (1990) relata que a coesão e vibração dos equipamentos exercem influência no tipo de fluxo por alterarem as propriedades do produto armazenado. Segundo Silva *et al.* (2008), é de extrema importância o conhecimento das propriedades físicas e de fluxo dos produtos armazenados, as quais exercem papel relevante no comportamento de pressões e fluxos nos equipamentos de movimentação. Knowlton *et al.* (1994) relatam que a determinação dessas propriedades é necessária por proporcionar conhecimento adequado às operações industriais como fluxo em tremonhas e silos, dosagem, transporte e empacotamento. Assim, obter informações quanto às características físicas e de fluxo dos sólidos agrícolas é imprescindível para o correto manuseio e processamento dos mesmos (SCHUBERT, 1987).

A torra, a moagem, o armazenamento, a temperatura de armazenagem e o material do qual o equipamento transportador ou silo é feito podem ser citados como processos e/ou condições realizadas durante a industrialização do café, com potencial de afetar as propriedades físicas e de fluxo do café.

O processo de torrefação é a etapa em que grãos crus são submetidos a altas temperaturas, entre 200 e 300 °C, dependendo do grau de torra desejado, sendo este

processo diretamente ligado ao teor de água do café. As reações induzidas pela torra tem afetam a composição química, nas propriedades físicas e estruturais do café. Estas alterações determinam a qualidade final do produto, como as características sensoriais e de textura do café torrado, afetando assim sua aceitabilidade e preço no mercado.

Molina *et al.* (1990) relataram que a massa específica do café depende não apenas do tamanho da partícula, mas também dos níveis de torra. Diferentes autores (DUARTE *et al.*, 2005; SIQUEIRA & ABREU, 2006; TOCI *et al.*, 2006; SANTOS *et al.*, 2007; RODARTE *et al.*, 2009; MORAIS *et al.*, 2009) estudaram as alterações na qualidade da bebida e na composição química de café torrado em diferentes níveis de torra, e concluíram que a torra altera estes parâmetros. Pittia; Dalla Rosa; Lericci (2001) relatam que a torrefação tem influência sobre as propriedades texturais de grãos de café torrado. Mwithiga e Jindal (2003) observaram significativas alterações nas propriedades físicas durante a torra de grãos de café. Silva *et al.* (2006) reportaram os ângulos de atrito interno e de repouso dos grãos de café com pergaminho em diferentes teores de água. Silva *et al.* (2008) relataram o comportamento dos coeficientes de atrito estático e dinâmico dos grãos de café (arábica e conilon) com pergaminho em diferentes teores de água. Entretanto, trabalhos que relacionem o nível de torra do café com as propriedades de fluxo são escassos ou inexistentes.

Além da torra, a granulometria do café moído também pode influenciar as propriedades físicas e a aceitabilidade pelos consumidores. A granulometria está relacionada a alterações da sua área superficial. Sabe-se que quanto menor a partícula em contato com o ambiente, maior será a taxa de absorção de água. Bell; Wetzel; Grand (1997) relataram alterações significativas no teor de cafeína de acordo com a granulometria do café. Schmidt; Miglioranza; Prudêncio (2008) estudaram o efeito de diferentes combinações de torra e granulometria sobre as características físico-químicas dos grãos de café, e concluíram que a bebida do café com torra média-escura e granulometria fina obteve o maior grau de aceitação. Geldart; Abdullah; Verlinden (2009) analisaram algumas propriedades físicas de um produto sintético pulverulento em duas diferentes granulometrias (6 e 60 μm), concluindo que há diferenças nas propriedades físicas devido à esta propriedade. Kheiripour Langroudi *et al.* (2010) relataram alterações das propriedades de fluxo de alguns materiais devido às diferentes granulometrias dos mesmos. No entanto, pesquisas envolvendo as alterações nas propriedades físicas e de fluxo de grãos de café moídos, em razão de diferentes granulometrias, não foram realizadas até o momento.

As propriedades físicas e de fluxo também são influenciadas pelo tempo de armazenamento, fato este observado em diferentes trabalhos, com diferentes produtos, tais como farinha de trigo, chá e soro de leite (TEUNOU & FITZPATRICK, 2000; IQBAL & FITZPATRICK, 2006), pó de laticínios (FITZPATRICK *et al.*, 2007) e ração avícola (NÓBREGA & NASCIMENTO, 2005; LOPES NETO; NASCIMENTO; SILVA, 2009). Entretanto, não foram encontradas na literatura pesquisas que avaliassem o efeito do tempo de armazenagem sobre as propriedades físicas e de fluxo de café torrado e moído.

Outras variáveis que podem influenciar as propriedades físicas e de fluxo do café são a temperatura e a umidade relativa. Este fato se deve as condições de armazenamento, uma vez que estas determinam a atividade de água do produto que, por ser higroscópico, realiza troca de água com o ambiente. Sendo assim, com a absorção de água, pode ocorrer a aglomeração do produto. O monitoramento da absorção de água pode ser realizado por meio da obtenção da atividade de água (a_w) e também das propriedades termodinâmicas de sorção.

O efeito da atividade de água foi estudado por Cardelli e Labuza (2001) para determinar a vida de prateleira de café torrado e moído. A atividade de água proporcionou diminuição da vida útil do café em aproximadamente 60 % para cada 0,1 de seu incremento, que foi atribuído ao escurecimento não enzimático, seguido pela temperatura, na qual a cada 10 °C de aumento desta variável, a vida de prateleira do café torrado e moído diminuiu em aproximadamente 20 %. De modo a averiguar o efeito da atividade de água e compreender as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos e o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos, o conhecimento das propriedades termodinâmicas de produtos agrícolas é importante fonte de informação (CORRÊA *et al.*, 2010).

O conhecimento das propriedades físicas e de fluxo do café em contato com determinado material é importante para o projeto de estruturas de armazenagem e de sistemas de transporte dos produtos. Autores vêm ao longo dos anos estudando as variações dessas propriedades em função do material em contato com os produtos (AKAAIMO & RAJI, 2006; MANIMEHALAI & VISWANATHAN, 2006; KIBAR & ÖZTÜRK, 2009; SINGH; MISHRA; SAHA, 2010). Especificamente para o café torrado e moído, trabalhos que verifiquem esta importante interação são escassos ou inexistentes.

O armazenamento de café torrado e moído não é indicado devido à moagem promover o rompimento das células e, portanto, possibilitar uma maior perda dos constituintes e da qualidade deste produto. Porém, o estudo das propriedades físicas e de fluxo do café torrado e moído se justifica em razão as possíveis dificuldades de mercado. Dentre estas, pode-se citar a necessidade de armazenar o produto já processado devido à falta de transporte, preços que inviabilizem a comercialização imediata e também a necessidade de formulação de *blends*.

Devido à importância crescente da industrialização do café brasileiro e a escassez de informações sobre as propriedades físicas e de fluxo deste produto, objetivou-se com este trabalho a obtenção das propriedades físicas e de fluxo de grãos de café torrado inteiro e moído, em função do nível de torra, de diferentes granulometrias, de diferentes temperaturas de armazenamento e do tipo de material em contato com o produto, durante o armazenamento, a fim de fornecer dados a serem utilizados para dimensionar equipamentos para a indústria cafeeira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIC. 2011a. Exportações. Disponível em:

<<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=49>>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

ABIC. 2011b. Produção Agrícola - Café Beneficiado - safra 2011 - Parque Cafeeiro, Produção e Produtividade. Disponível em:

<<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=48>>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

AKAAIMO, D. I.; RAJI, A. O. Some physical and engineering properties of prosopis africana seed. **Biosystems Engineering**, Filadélfia, v. 95, n. 2, p. 197-205, 2006.

BELL, L. N.; WETZEL, C. R.; GRAND, A. N. Caffeine content in coffee as influenced by grinding and brewing techniques. **Food Research International**, Filadélfia, v. 29, n. 8, p. 785-789, 1997.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos, USP, 1990. 198p.

CARDELLI, C.; LABUZA, T. P. Application of Weibull Hazard analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, n. 5, p. 273-278, 2001.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da Safra Brasileira de Café. Terceira estimativa, setembro 2012. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_09_06_10_10_21_boletim_cafe_-_setembro_2012.pdf>. Acesso em: 20 de setembro de 2012.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, n. 5, p. 595-601, 2010.

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

FARIAS, A. S. D.; VELARDES, F. A.; SILVA, F. A. C. A estrutura competitiva da indústria brasileira de café. **Revista Produção e Sociedade**, Paraíba, v. 5, p. 91-108, 2000.

FERNANDES, S. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; PINTO, N. A. V. D.; NERY, M. C.; PÁDUA, F. R. M. Constituintes químicos e teor de extrato aquoso de cafés arábica (*Coffea arabica* L.) e conilon (*Coffea canephora* Pierre) torrados. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 5, p. 1076-1081, 2003.

FITZPATRICK, J. J.; BARRY, K.; CERQUEIRA, P. S. M.; IQBAL, T.; O'NEILL, J.; ROOS, Y. H. Effect of composition and storage conditions on the flowability of dairy powders. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 17, n. 4, p. 328-392, 2007.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; VERLINDEN, A. Characterisation of dry powders. **Powder technology**, Filadélfia, v. 190, n. 1-2, p. 70-74, 2009.

ILLY, A.; VIANNI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. San Diego: Academic, 1996. 253 p.

IQBAL, T.; FITZPATRICK, J. J. Effect of storage conditions on the wall friction characteristics of three food powders. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 72, n. 3, p. 273-280, 2006.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of silos**. Bulletin of the Utah Engineering Experimental Station n. 123. Salt Lake: Utah, 1964. 197p.

JENIKE, A. W.; JOHONSON, J. **Flow factor Tester and consolidating bench operating instructions**. Jenike & Johonson, Inc, North Billerica, Massachusetts – USA, 1979. 40p.

KHEIRIPOUR LANGROUDI, M.; SUN, J.; SUNDARESAN, S.; TARDOS, G. I. Transmission of stresses in static and sheared granular beds: The influence of particle size, shearing rate, layer thickness and sensor size. **Powder technology**, Filadélfia, v. 203, n. 1, p. 23-32, 2010.

KIBAR, H.; ÖZTÜRK, T. The effect of moisture content on the physico-mechanical properties of some hazelnut varieties. **Journal of Stored Products Research**, Filadélfia, v. 45, p. 14–18, 2009.

KNOWLTON, T. M.; CARSON, J. W.; KLINZING, G. E.; YANG, W. C. The importance of storage, transfer and collection. **Chemical Engineering Progress**, Nova Iorque, v. 90, p. 44-54, 1994.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 518-527, 2009.

MANIMEHALAI, N.; VISWANATHAN, R. Physical properties of fuzzy cottonseeds. **Biosystems Engineering**, Filadélfia, v. 95, n. 2, p. 207-217, 2006.

MOLINA, M.; NUSSINOVITCH, A.; NORMAND, M. D.; PELEG, M. Selected physical characteristics of ground roasted coffees. **Journal of Food Processing and Preservation**, Malden, v. 14, n. 4, p. 325-333, 1990.

MORAIS, S. A. L.; AQUINO, F. J. T.; NASCIMENTO, P. M.; NASCIMENTO, E. A.; CHANG, R. Compostos bioativos e atividade antioxidante do café conilon submetido a diferentes graus de torra. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 327-331, 2009.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. K. Physical changes during coffee roasting in rotatory conduction-type heating units. **Journal of Food Process Engineering**, Malden, v. 26, n. 6, p. 543-558, 2003.

NÓBREGA, M. V.; NASCIMENTO, J. W. B. Fluxo de ração avícola em silos prismáticos com tremonha excêntrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 413-419, 2005.

PARTELLI, F. L.; VIEIRA, H. D.; SANTIAGO, A. R.; BARROSO, D. G. Produção e desenvolvimento radicular de plantas de café 'Conilon' propagadas por sementes e por estacas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 6, p. 949-954, 2006.

PITTIA, P.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C.R. Textural changes of coffee beans as affected by roasting conditions. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

RODARTE, M. P.; ABRAHÃO, S. A.; PEREIRA, R. G. F. A.; MALTA, M. R. Compostos não voláteis em cafés da região sul de minas submetidos a diferentes pontos de torração. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1366-1371, 2009.

SANTOS, M. H.; BATISTA, B. L.; DUARTE, S. M. S.; ABREU, C. M. P.; GOUVÊA, C. M. C. P. Influência do processamento e da torrefação sobre a atividade antioxidante do café (*Coffea arabica*). **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 3, p. 604-610, 2007.

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

SCHUBERT, H. Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 6, n. 1, p. 1-32, 1987.

SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; CALIL-JÚNIOR, C.; GOMES, F. C. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2006.

SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; CALIL-JÚNIOR, C.; GOMES, F. C. Comparação de diferentes equipamentos e metodologias para determinação dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n. 10, p. 58-65, 2008.

SINGH, K. P.; MISHRA, H. N.; SAHA, S. Moisture-dependent properties of barnyard millet grain and kernel. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 96, p. 598-606, 2010.

SIQUEIRA, H. H.; ABREU, C. M. P. Composição físico-química e qualidade do café submetido a dois tipos de torração e com diferentes formas de processamento. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 1, p. 112-117, 2006.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J. Effect of storage time and consolidation on food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 43, n. 2, p. 97-101, 2000.

TOCI, A.; FARAH, A.; TRUGO, L. C. Efeito do processo de descafeinação com diclorometano sobre a composição química dos cafés arábica e robusta antes e após a torração. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 5, p. 965-971, 2006.

CAPÍTULO 1

Caracterização física de café após a torrefação e a moagem

1.1 INTRODUÇÃO

A demanda crescente de cafés pelos mercados importadores, tanto quantitativamente como qualitativamente, bem como a concorrência de outros países produtores acabam por incentivar a indústria nacional cafeeira a melhorar seus produtos e processos. Nestes, há o constante manuseio do café, tanto o inteiro quanto o moído.

O manuseio de materiais é um importante fator na operação de qualquer indústria alimentícia e pode afetar consideravelmente a qualidade do produto, influenciando diretamente o custo da operação e o lucro da empresa (ROBBERTS, 2002). A cada movimentação dos produtos, o custo final sofre adições, além de aumentar o risco de danos aos produtos e de acidentes. Este custo da movimentação e manuseio dos produtos pode alcançar até 50 % do valor total da manufatura do produto final (ROBBERTS, 2002).

No caso de café industrializado, a escoabilidade é uma importante característica do manuseio para a eficiência e a confiabilidade da operação e é muito influenciada pelas propriedades físicas do produto. De acordo com Corrêa e Silva (2008), projetos de máquinas para o processamento, classificação e dimensionamento de outros equipamentos destinados à pós-colheita de produtos agrícolas requerem dados relativos às propriedades físicas. Assim, obter informações quanto às características destes produtos é importante para o correto manuseio e processamento dos mesmos (Schubert, 1987), diminuindo assim os custos. O estudo das propriedades físicas ainda possibilita a

predição do comportamento dos produtos agrícolas relativo às respostas de tratamento físicos e químicos, de forma a permitir a manutenção da qualidade e segurança dos alimentos processados (WILHELM; SUTER; BRUSEWITZ, 2004), garantindo assim a comercialização do produto com menor depreciação da qualidade.

Segundo Robberts (2002), o adequado manuseio e transporte de materiais proporcionam: diminuição do custo operacional por meio do correto uso da força de trabalho, equipamentos e espaço; diminuição do tempo de processamento; movimentação ininterrupta dos materiais; prevenção de injúrias e acidentes devido ao manuseio incorreto dos produtos; produto de melhor qualidade, e; redução da perda dos produtos. Sendo assim, informações que visem aperfeiçoar e/ou desenvolver novos equipamentos e métodos para o manuseio de produtos possibilitam a diminuição do trabalho, das perdas e, por conseguinte, do custo do material final do produto em menor tempo e com máxima eficiência e segurança. Dessa forma, o estudo das propriedades físicas de café é necessário para a indústria cafeeira brasileira.

O conhecimento da massa específica, de acordo com Fellows (2000), é imprescindível para processos de separação de materiais e de redução de tamanho. Além disso, a mistura de produtos com diferentes valores de massa específica ocorre com maior dificuldade, acarretando em maior tempo e custo de processamento, fato este que ocorre na indústria cafeeira na formulação dos *blends* (mistura entre café arábica e conilon).

Mohsenin (1986) reporta que as massas específicas unitária e aparente servem de parâmetro para cálculos na difusividade térmica dos produtos agrícolas, além de cálculos de maquinários pneumáticos para manusear os produtos. O mesmo autor afirma que este conhecimento ajuda na predição da estrutura física e na composição química dos produtos agrícolas. Trabalhos ao longo dos anos (SINGH *et al.*, 1997; COUTO *et al.*, 1999; RIBEIRO *et al.*, 2001; MENDONÇA; FRANCA; OLIVEIRA, 2009; CORRÊA *et al.*, 2010; VARGAS-ELÍAS, 2011; TORRES; HERRERA; TASCÓN, 2012) vincularam a necessidade do conhecimento da massa específica para os processos de secagem e armazenamento, projetos de silos e equipamentos pós-colheita, além de afetar a estabilidade e ser indicador da maturação de produtos agrícolas.

A porosidade dos produtos agrícolas é necessária em estudos de transferência de calor e massa, bem como em fluxo de ar (MOHSEININ, 1986). Este conhecimento leva

ao aperfeiçoamento dos processos de aeração, refrigeração e aquecimento, ao passo que estes afetam diretamente o custo total do produto.

As propriedades físicas porosidade, massa específica unitária e aparente de café foram avaliadas em função de diferentes parâmetros, tais como teor de água (RIBEIRO *et al.*, 2001; PITTIA; NICOLI; SACCHETTI, 2007; CORRÊA *et al.*, 2010), estágio de maturação (CHANDRASEKAR & VISWANATHAN, 1999; COUTO *et al.*, 1999; TORRE; HERRERA; TASCÓN, 2012), nível de torra (PITTIA; DALLA ROSA; LERICI, 2001; MWITHIGA & JINDAL, 2003; PIMENTA *et al.*, 2009), presença de defeitos (FRANCA *et al.*, 2005; MENDONÇA; FRANCA; OLIVEIRA, 2009) e diferentes qualidades de bebida (FRANCA; MENDONÇA; OLIVEIRA, 2005). No entanto, a avaliação destas propriedades para café torrado inteiro e moído em diferentes níveis nunca foi realizada.

A cor é uma das propriedades físicas mais comum e largamente avaliada para diferentes produtos em diversas condições. Ela afeta diretamente a aceitação do produto pelo consumidor, uma vez que é uma das características que despertam mais atenção na comercialização, sendo um dos parâmetros de decisão para o preço final do produto.

A *Specialty Coffee Association of America* formulou o chamado sistema SCAA-Agron, no qual classifica os grãos de café torrado pela sua cor. Neste sistema, há cinco possibilidades de classificação pela coloração dos grãos: muito escura, escura, média, clara e muito clara. Este sistema é utilizado na comercialização do café em que, subsidiada por estudos prévios correlacionando a pontuação da bebida com a coloração do grão torrado e moído (SCHMIDT; MIGLIORANZA; PRUDÊNCIO, 2008; VARGAS-ELÍAS, 2011), fornece um método rápido, eficaz e não-destrutivo para a tomada de decisão de preços dos cafés. Pesquisadores avaliaram esta propriedade em grãos de café (PITTIA; DALLA ROSA; LERICI, 2001; BORGES *et al.*, 2002; MWITHIGA & JINDAL, 2003; FRANCA *et al.*, 2005; SCHMIDT; MIGLIORANZA; PRUDÊNCIO, 2008; TORRES; HERRERA; TASCÓN, 2012). Entretanto, a avaliação deste parâmetro em níveis distintos de torras e granulometrias durante o armazenamento não foi realizada até o presente momento.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar e determinar algumas propriedades físicas (ângulo de repouso, massa específica unitária e aparente, porosidade e as coordenadas de cor, além da análise da granulometria e do teor de água) do café, bem como avaliar a influência de diferentes níveis de torra e granulometria sobre essas propriedades.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, MG; no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte-MG; e no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos-SP.

1.2.1 *Matéria-prima*

Foram utilizados grãos de café cru (*Coffea canephora* e *Coffea arabica*), descascados e secos, adquiridos de comércio regional da Zona da Mata de Minas Gerais.

Os grãos foram submetidos a uma triagem para eliminar os grãos deteriorados, danificados e brocados, a fim de se obter uma matéria-prima homogênea e com o mínimo de defeitos. Grãos provenientes de frutos de bica corrida foram utilizados.

O teor de água médio inicial dos grãos foi de 12,61 % (b.s.), tendo sido determinado pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h (BRASIL, 2009).

1.2.2 *Preparo das amostras*

Os grãos de café de ambas as espécies, após a triagem, foram encaminhados para o processo de torrefação, no qual foi utilizado um torrefador de queima direta de gás GLP, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com pré-aquecimento e capacidade de 350 g de café cru (Figura 1.1).



Figura 1.1. Torrefador de quatro cilindros rotativos com queima de gás direto.

O nível de cada torrefação dos grãos de café foi identificado por meio do acompanhamento e comparação da cor das amostras com o número padrão de cor Agrtron, assessorado por um profissional treinado. Dois níveis de torra foram obtidos: média clara (MC) e moderadamente escura (ME), cujos números Agrtron correspondentes são, respectivamente, SCAA#65 e SCAA#45 (Figura 1.2).



Figura 1.2. Níveis de torra empregados: média clara (A) e moderadamente escura (B).

Para garantir a uniformidade das torras, foi utilizado o parâmetro perda de massa, em que, para a temperatura empregada de 285 °C, os grãos perderam, em média, 15,85 e 18,74 gramas de massa, respectivamente para as torras MC e ME (VARGAS-ELÍAS, 2011). Para se atingir estas perdas de massa, foram realizados testes com a temperatura do torrefador e o tempo de torrefação. Ao atingir os dois níveis de torra mencionados, o produto foi retirado do torrefador e imediatamente esfriado utilizando-se ar ambiente.

Após o processo de torrefação, os grãos foram processados em moinho Mahlkönig (Alemanha, modelo K32 S30LAB), em três granulometrias diferentes: fina (0,59 mm), média (0,84 mm) e grossa (1,19 mm), além de mantido o lote de café inteiro.

As amostras preparadas foram analisadas quanto às diferentes propriedades físicas, descritas a seguir.

1.2.3 Propriedades físicas

1.2.3.1 Teor de água

O teor de água do café torrado, inteiro e moído, foi determinado empregando-se o método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h (BRASIL, 2009). Cada amostra foi avaliada em triplicata e a média das três determinações foi utilizada.

1.2.3.2 Atividade de água

O aparelho Aqualab 4 TE (Decagon Devices, EUA), foi utilizado para a determinação da atividade de água (a_w) de café torrado inteiro e moído. Este equipamento fornece leituras de atividade de água no intervalo de 0,050 a 1,000 (decimal), com precisão de $\pm 0,003$ e resolução de 0,0001. Cada amostra foi avaliada em triplicata e a média das três determinações foi utilizada.

1.2.3.3 Ângulo de repouso

A metodologia para a obtenção do ângulo de repouso seguiu a proposta por Silva *et al.* (2006), em que utilizou-se uma plataforma cilíndrica circular de 15 cm de diâmetro, contendo, em seu centro, uma haste graduada onde o produto foi depositado, proveniente de um funil de recepção de amostra de grãos a uma altura de 0,60 m. Em seguida, mediu-se a altura do talude formado pelo produto e a plataforma. De posse destas informações, o ângulo de repouso foi obtido por meio do arco tangente de um triângulo formado pela base do produto e a altura do talude. Cada amostra foi avaliada em triplicata e a média das três determinações foi utilizada.

1.2.3.4 Massa específica unitária e aparente

A massa específica unitária (ρ_u) ou real foi determinada com o uso de um picnômetro a hélio, a partir das Equações 1.1 e 1.2, em cinco repetições.

$$P_1(V_a - V_s) = P_2(V_a - V_s + V_e) \quad (1.1)$$

$$\rho_u = \frac{m_g}{V_s} \quad (1.2)$$

em que,

P_1 = pressão inicial, Pa;

P_2 = pressão final, Pa;

V_a = volume da câmara da amostra, m^3 ;

V_s = volume do sólido (café), m^3 ;

V_e = volume da câmara de expansão, m^3 ;

ρ_u = massa específica unitária, $kg\ m^{-3}$; e

m_g = massa de café torrado, kg.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi determinada com uma balança de peso hectolitro com capacidade de 1 L, em cinco repetições.

1.2.3.5 Porosidade

A porosidade (ε) foi determinada indiretamente de acordo com a Equação 1.3 (MOHSENIN, 1986), tradicionalmente utilizada para produtos agrícolas.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u} \right) 100 \quad (1.3)$$

em que,

ε = porosidade, %; e

ρ_{ap} = massa específica aparente, kg m^{-3} .

1.2.3.6 Cor

A coloração foi realizada com auxílio de um colorímetro tristímulo, em três repetições, com leitura direta de reflectância das coordenadas L^* (luminosidade), a^* (tonalidades vermelha/verde) e b^* (tonalidades amarela/azul), empregando a escala Hunter-Lab e utilizando o iluminante $10^\circ/\text{D60}$.

A partir dos valores de L^* , a^* e b^* , foram obtidos os índices colorimétricos croma (C^*), que definem a intensidade e a pureza de uma cor (Equação 1.4) e o ângulo hue (h^*), que define a tonalidade da cor (Equação 1.5): 0° (vermelho), 90° (amarelo), 180° (verde) e 270° (azul).

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (1.4)$$

$$h^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (1.5)$$

1.2.3.7 Granulometria a laser

A análise granulométrica consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem as amostras de café torrados e moídos. Os grãos de café inteiro não foram avaliados, uma vez que as medidas são realizadas em solução líquida com água destilada, realizando-se a análise com o sólido em suspensão.

A granulometria foi avaliada com o uso de granulômetro Cilas, modelo 1064, em três repetições. Este equipamento fornece a distribuição granulométrica na faixa entre 0,04 a 500 μm .

1.2.3.8 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e ângulo de atrito efetivo (ϕ_e)

A determinação destas propriedades foi realizada utilizando-se um equipamento de cisalhamento modelo TSG 70-140 (Alemanha), construído com base no aparelho de cisalhamento de Jenike. A metodologia empregada foi a proposta por Milani (1993), sendo que, para a execução do ensaio, foram utilizadas as recomendações da norma inglesa – BMHB (1985), Jenike e Johanson (1979) e o Manual de Operação da Máquina TSG 70-140.

1.2.4 Delineamento experimental

O trabalho foi realizado em dois experimentos: um tendo como matéria-prima grãos de café da espécie *Coffea arabica* L. e o outro utilizando grãos de café da espécie *Coffea canephora* Pierre. Cada experimento foi instalado em um esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas o tempo de armazenamento e nas subparcelas um fatorial $2 \times 4 \times 2$ (dois níveis de torrefação, quatro níveis de granulometria e duas temperaturas de armazenamento), com o número de repetições diferente para cada variável resposta analisada.

Os dados experimentais das propriedades físicas analisadas em cada tempo de armazenamento foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey adotando-se um nível de 5 % de probabilidade. Para o tempo de armazenamento os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t”, adotando-se o nível de 1, 5 e 10 %, no coeficiente de determinação, R^2 (obtido pela relação entre a soma de quadrado da regressão e a soma de quadrado do tratamento) e no comportamento em estudo.

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.3.1 Teor de água

O comportamento da interação entre o nível de torra e a granulometria sobre o teor de água nas duas espécies avaliadas pode ser observado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1. Valores médios de teor de água (% b.s.) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		Torra	
Café	Granulometria	MC	ME
Arábica	0	2,67 A a ± 0,24	1,92 A b ± 0,26
	1	1,94 A a ± 0,32	1,91 A a ± 0,26
	2	2,56 A a ± 0,22	1,78 A b ± 0,17
	3	2,65 A a ± 0,59	1,47 A b ± 0,29
Conilon	0	2,28 A a ± 0,09	1,73 A a ± 0,19
	1	2,19 A a ± 0,28	1,97 A a ± 0,38
	2	2,52 A a ± 0,21	1,74 A b ± 0,23
	3	2,31 A a ± 0,79	1,74 A a ± 0,28

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café analisada, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Para um dado nível de torrefação, independentemente da espécie de café, a granulometria não influenciou nos valores de teor de água. Este comportamento é explicado devido ao baixo tempo de exposição do produto ao ambiente, já que os resultados expostos referem-se às análises realizadas imediatamente após o preparo das amostras.

Entre os níveis de torra, pode-se observar que, para o café arábica, ocorreu diferenças no teor de água para as granulometrias inteira, fina e grossa, sendo que para a granulometria média não houve diferença significativa entre os dois níveis de torra utilizados. Já para o café conilon, a única amostra que apresentou alterações significativas entre as torras foi a granulometria grossa.

Nota-se também que a torra moderadamente escura apresentou menores valores de teor de água quando comparada com a torra média clara. Este fato é esperado, uma vez que um maior tempo no processo de torrefação para se obter um nível de torra mais acentuado acarreta em maior perda de umidade do produto, confirmada pela perda de massa (4,53 % e 5,36 % de perda de massa média, respectivamente para nível de torrefação MC e ME). Trabalhos anteriores reportaram esta tendência (BAGGENSTOSS *et al.*, 2008; SCHMIDT; MIGLIORANZA; PRUDÊNCIO, 2008; BICHO *et al.*, 2012).

O teor de água variou entre 1,47 e 2,67 (b.s.). Nesta faixa de teor de água, entre 1,00 e 3,70 (b.s.), a agregação da água à estrutura do café torrado é ao nível de monocamada, ou seja, as moléculas de água estão fortemente adsorvidas em locais específicos do produto e a atividade de água é caracterizada como baixa (ILLY & VIANI, 1995), conforme será observado adiante.

1.3.2 Atividade de água

A Tabela 1.2 apresenta os valores de atividade de água dos grãos de café arábica e conilon, preparados em diferentes condições de torra e granulometria.

Tabela 1.2. Valores médios de atividade de água dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		Torra	
Café	Granulometria	MC	ME
Arábica	0	0,2693 B a ± 0,0116	0,1864 B b ± 0,0088
	1	0,2230 C a ± 0,0060	0,2250 C a ± 0,0076
	2	0,2638 B a ± 0,0086	0,2518 D a ± 0,0038
	3	0,3354 A a ± 0,0039	0,3168 A a ± 0,0226
Conilon	0	0,2304 B a ± 0,0052	0,1493 B b ± 0,0035
	1	0,2168 B a ± 0,0094	0,1868 C b ± 0,0043
	2	0,2532 A a ± 0,0067	0,1925 C b ± 0,0086
	3	0,2640 A a ± 0,0025	0,2620 A a ± 0,0089

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café analisada, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Para a atividade de água, a interação entre nível de torrefação e granulometria incorre em diferenças significativas entre as amostras avaliadas. Tal como observado no parâmetro teor de água, as amostras de café média clara apresentaram maiores valores de atividade de água comparativamente com as amostras moderadamente escura.

Como a atividade de água influencia na estabilidade dos produtos, ditando diretamente tanto a taxa de atividade microbiana como as reações químicas (LABUZA; KAAANANE; CHEN, 1985), as amostras de café MC possuem maior probabilidade de ocorrência de microorganismos e oxidação (ILLY & VIANI, 1995; GONELI *et al.*, 2013) e, possivelmente, menor vida de prateleira (CARDELLI & LABUZA, 2001).

De acordo com Silva *et al.* (2013), granulometrias menores levam a valores maiores de atividade de água devido à sua maior área específica. Entretanto, de modo geral, no presente trabalho, os valores da atividade de água do café torrado e moído decresceram com a diminuição do tamanho das partículas (granulometria), sendo que os grãos inteiros exibiram maiores valores desta propriedade. Estes resultados podem ser explicados em razão do momento das análises, no qual as mesmas foram realizadas em seguida ao preparo das amostras, não permitindo tempo suficiente de interação do produto com o ambiente. Ademais, durante a torrefação ocorrem reações de pirólise, resultando na produção de CO₂, água e substâncias voláteis (PIMENTA *et al.*, 2009), que são facilmente liberadas após a moagem, resultando na baixa atividade de água para menores granulometrias.

Os valores de atividade de água variaram entre 0,1493 e 0,3354. Segundo Illy e Viani (1995), a atividade enzimática se inicia quando a atividade de água é 0,3. Portanto, para café torrado, valores abaixo de 0,3 de atividade de água são preferíveis. Em estudo acerca da vida de prateleira de café torrado e moído, Cardelli e Labuza (2001), reportaram que um incremento de 0,1 na atividade de água do café proporciona uma diminuição da vida útil do café em aproximadamente 60 %.

1.3.3 Ângulo de repouso

Na Tabela 1.3 são apresentados os valores observados do ângulo de repouso dos grãos de *C. canephora* e *C. arabica* para diferentes condições. Observa-se que a interação entre os fatores granulometria e torra ($p < 0,01$) permitiu diferenças significativas entre as amostras avaliadas.

Tabela 1.3. Valores médios observados do ângulo de repouso (em graus) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		Torra	
Café	Granulometria	MC	ME
Arábica	0	45,4 B a ± 0,2	43,0 B b ± 0,2
	1	39,1 C a ± 0,3	37,2 C b ± 0,2
	2	36,7 D a ± 0,3	36,6 C a ± 0,3
	3	28,9 A a ± 0,5	34,2 A b ± 0,7
Conilon	0	45,0 B a ± 0,2	44,2 B a ± 0,2
	1	35,2 C a ± 0,3	38,7 C b ± 0,3
	2	37,4 C a ± 0,4	36,7 C a ± 0,3
	3	31,0 A a ± 0,4	32,1 A a ± 0,6

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café analisada, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Os valores de ângulo de repouso dos grãos de café, em geral, decrescem com o aumento do tamanho das partículas. Este fato é esperado, uma vez que menores partículas permitem o incremento do número total de partículas na massa do produto, aumentando as forças de coesão entre produto/produto (GELDART; ABDULLAH; VERLINDEN, 2009), fornecendo assim maior estabilidade para a massa de grãos, culminando na formação de maiores taludes do produto.

Em trabalho apresentado por Jong; Hoffmann; Finkers (1999), foi concluído que a escoabilidade de um produto qualquer é inversamente proporcional ao ângulo de repouso; em outras palavras, quanto maior for o ângulo de repouso de uma partícula, maior será a dificuldade do produto em escoar. Esta tendência corrobora com os resultados deste trabalho, em que há um decréscimo dos valores de ângulo de repouso com o aumento da granulometria de café, independentemente do nível de torra ou espécie de café.

A escoabilidade de produtos agrícolas foi também classificada segundo o ângulo de repouso ao passar dos anos (KONSTANCE; ONWULATA; HOLSINGER, 1995; BHANDARI *et al.*, 1998; SHITTU & LAWAL, 2007). A última classificação denota que sólidos particulados com até 35° de ângulo de repouso possuem boa fluidez, os de

35 a 45° possuem coesividade fraca, os de 45 a 55° apresentam coesividade e os acima de 55° são muito coesivos. Portanto, o café pode ser dividido em categorias: grãos de café torrados e inteiros (boa fluidez) e café torrado e moído (coesividade fraca), com os cafés torrados e moído à granulometria fina tendendo a se alterar para a categoria de coesividade (α entre 45 e 55°). Pelos dados apresentados na Tabela 1.3, nota-se que a granulometria “2” ou média é equivalente à granulometria “3” ou grossa, em termos de ângulo de repouso, na maioria dos casos, independentemente no nível de torra e espécie de café, corroborando com a classificação anterior.

Em grande parte dos produtos agrícolas, espera-se um aumento do ângulo de repouso com o incremento do teor de água do produto devido à aglomeração (no caso de materiais moídos) e ao aumento da área de contato produto/produto (no caso de produtos inteiros). Este comportamento foi observado neste trabalho, em que as amostras MC (maior teor de água), de modo geral, apresentaram valores maiores comparativamente às amostras ME (Tabela 1.3). Pesquisas com frutos de café (CHANDRASEKAR & VISWANATHAN, 1999) e café em pergaminho (SILVA *et al.*, 2006) descreveram a mesma tendência.

Observa-se ainda que os valores de ângulo de repouso de grãos de café inteiros e com torra branca (MC) foram menores que os valores para os grãos de café inteiros com torra ME. Este fato pode ser explicado pelo aumento da friabilidade das partículas das amostras devido ao maior grau de torrefação, ou seja, são grãos mais susceptíveis de se esfarelarem (MEDEIROS & LANNES, 2010), formando assim partículas menores.

1.3.5 Massa específica unitária, aparente e porosidade

Os valores de massa específica unitária e aparente, bem como os valores de porosidade, estão inseridos na Tabela 1.4.

Tabela 1.4. Valores médios observados de massa específica unitária (ρ_u), aparente (ρ_{ap}) e porosidade (ε) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		ρ_u (kg m ⁻³)		ρ_{ap} (kg m ⁻³)		ε (%)	
Café	Granulometria	MC	ME	MC	ME	MC	ME
Arábica	0	1096,47 B a \pm 0,0341	1178,04 B b \pm 0,0276	315,04 B C a \pm 5,79	321,38 B b \pm 7,20	71,3 B a \pm 0,37	72,7 B b \pm 0,06
	1	952,95 C a \pm 0,0166	939,59 C b \pm 0,0222	312,92 B a \pm 1,11	316,34 B a \pm 1,66	67,2 C a \pm 0,08	66,3 C b \pm 0,16
	2	868,64 D a \pm 0,0190	831,59 D b \pm 0,0193	319,91 C a \pm 1,37	308,68 C b \pm 2,08	63,2 D a \pm 0,18	62,9 D a \pm 0,21
	3	705,17 A a \pm 0,0432	680,69 A b \pm 0,0361	359,04 A a \pm 3,57	342,26 A b \pm 1,94	49,1 A a \pm 0,10	49,7 A b \pm 0,18
Conilon	0	1221,53 B a \pm 0,0929	1178,45 B b \pm 0,0501	362,05 B a \pm 2,92	314,02 B b \pm 4,95	70,4 B a \pm 0,14	73,4 B b \pm 0,43
	1	1017,85 C a \pm 0,0889	910,62 C b \pm 0,0233	361,54 B a \pm 1,71	324,15 C b \pm 2,93	64,5 C a \pm 0,13	64,4 C a \pm 0,21
	2	947,95 D a \pm 0,0370	805,96 D b \pm 0,0523	359,31 B a \pm 0,74	311,23 B b \pm 1,26	62,1 D a \pm 0,03	61,4 D b \pm 0,09
	3	872,47 A a \pm 0,0351	761,75 A b \pm 0,0266	406,88 A a \pm 2,91	349,66 A b \pm 1,33	53,4 A a \pm 0,03	54,1 A b \pm 0,18

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café e propriedade analisada, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

A massa específica unitária ou real representa a relação entre a massa de sólido e o volume ocupado pelo produto, excluindo-se os poros abertos e os fechados, assim como os demais espaços vazios (BRITO *et al.*, 2012). Os fatores nível de torrefação e granulometria afetaram significativamente a massa específica unitária.

De acordo com a Tabela 1.4, a massa específica unitária máxima e a mínima foi, respectivamente, 1221,53 e 680,69 kg m⁻³, associadas às torrefações média clara e moderadamente escura. Em geral, os valores de ρ_u foram maiores para o nível de torra média clara, independentemente da espécie de café. Este fato é explicado pela variação de massa durante a torrefação: nível de torra mais brando leva a uma menor perda de massa, obtendo-se assim maiores valores de massa específica unitária. Singh *et al.* (1997), em seu trabalho com café mexicano e colombiano, também concluíram que níveis de torrefação maiores acarretam em decréscimo nos valores de massa específica unitária. Vargas-Elías (2011) reportou a diminuição da massa específica unitária em café com nível de torra mais acentuado devido à maior perda de massa do produto.

Outro fato a ser considerado com relação ao nível de torrefação está no nível celular. Segundo Licciardi *et al.* (2005), os triglicerídeos (óleos) do grão do café são pouco afetados pela torrefação, sofrendo apenas pequena hidrólise e decomposição, com liberação de ácidos graxos e formação de produtos voláteis. No entanto, nas torrações mais escuras, muitas células sofrem rompimento e o óleo pode migrar para a superfície do produto (FRANÇA *et al.*, 2001), ocorrendo assim, maior perda de massa, resultando na diminuição dos valores de massa específica. Variações no comportamento da massa específica em função do teor de gordura do leite em pó também foram observados por Fitzpatrick *et al.* (2004).

Observa-se na Tabela 1.4 que os valores de massa específica unitária decresceram com o aumento do tamanho das partículas (granulometria). Em um dado volume constante, os cafés com moagem mais fina se aglomeram mais intensamente, resultando numa massa maior para aquele volume, ao passo que para partículas maiores há uma menor aglomeração, culminando em menor massa e, conseqüentemente, menores valores de massa específica unitária. Singh *et al.* (1997) relataram comportamento similar ao longo do processo de torrefação de café.

A massa específica aparente é a razão entre a massa do sólido e o volume do sólido contendo poros. Os valores de massa específica aparente foram influenciados pela interação entre o nível de torrefação e a granulometria, variando entre 311,23 e

406,88 kg m⁻³. Estes valores estão na faixa de 300 a 450 kg m⁻³ reportada por Illy e Viani (1995) para café torrado.

Essa propriedade, tal como ocorreu com a massa específica unitária, foi maior para o produto torrado em nível média clara. Este fato está associado à menor perda de massa devido ao menor tempo de torrefação. Borges *et al.* (2004) explicam que a alteração no volume está relacionado com o aumento da pressão interna das estruturas das células que ocorre durante a transferência de calor e nas reações do processo de pirólise, no qual são mais intensas em torrefação prolongada (ME). Ademais, a massa do produto também influencia na diminuição dessa propriedade, em que maior tempo de torrefação acaba por ocorrer maior perda de massa. Diferentes trabalhos com café relataram esta tendência (ILLY & VIANI, 1995; SINGH *et al.*, 1997; PITTIA; DALLA ROSA; LERICI, 2001; MWITHIGA & JINDAL, 2003; MENDONÇA; FRANCA; OLIVEIRA, 2009; VARGAS-ELÍAS, 2011).

Nas diferentes granulometrias estudadas, nota-se que os grãos de café inteiros obtiveram maiores valores de massa específica aparente. Esta ocorrência está diretamente relacionada ao conteúdo de componentes voláteis que por sua vez está relacionada à massa total do produto. Grãos inteiros liberam CO₂ lentamente, sendo necessários cerca de 30 dias para sua total liberação, resultando em maiores valores de massa, ao passo que 70 % de CO₂ são imediatamente liberados após a moagem (ILLY & VIANI, 1995).

Para os cafés torrados e moídos, percebe-se, em termos gerais, que a massa específica aparente decresce com o aumento do tamanho das partículas. Yan e Barbosa-Canovas (1997), estudando a compressibilidade de alimentos pulverulentos, relataram esta mesma relação entre granulometria e massa específica aparente. Estes autores explicam que o aumento do tamanho das partículas leva à diminuição do volume ocupado pelo produto; em outras palavras, há maior quantidade de poros, ou seja, menor massa de produto em dado volume constante, resultando em menores valores de massa específica aparente.

A interação entre o nível de torrefação e a granulometria do café foi significativa para os resultados de porosidade. Entre os níveis de torra, não foi possível definir um comportamento característico.

A porosidade variou de modo evidente entre os diferentes níveis de granulometria, independentemente do nível de torrefação, sendo o café torrado e moído fino o que obteve os maiores valores de porosidade, decrescendo ao passo que a

granulometria aumenta até atingir os menores valores para os grãos de café inteiro e torrado. Esta tendência não era esperada, uma vez que pesquisas anteriores relataram um comportamento diretamente proporcional entre granulometria e porosidade (GRELLIER; RIVIERE; RENAULT, 1999; PITTIA; DALLA ROSA; LERICI, 2001). No entanto, o comportamento observado pode ser em razão da aglomeração do produto. Schubert (1987) relata que a porosidade aumenta com o decréscimo do tamanho das partículas devido à adesão entre partículas permitir uma estrutura desprendida da massa. Pegg e Shahidi (2007) complementam este trabalho explicando que produtos com menor granulometria tendem a se aglomerar, formando agregados maiores que o próprio grão, resultando em porosidade elevada, conforme constatado neste trabalho.

Para os grãos de café torrado e inteiro, os valores de porosidade variaram entre 49,1 e 54,1 %. Encontram-se, assim, na faixa de valores observada para a maioria dos grãos, sendo também compatível com prévios estudos com café (COUTO *et al.*, 1999; CHANDRASEKAR & VISWANATHAM, 1999; CORRÊA *et al.*, 2010; VARGAS-ELÍAS, 2011).

1.3.6 Cor

Por meio da análise de variância constatou-se que a interação entre a granulometria e o nível de torrefação foi significativa ($p < 0,01$) para as coordenadas L^* , a^* e b^* . Os valores destas coordenadas colorimétricas estão apresentados na Tabela 1.5, para cada espécie de café, nível de torrefação e granulometria empregadas.

Tabela 1.5. Valores médios das coordenadas colorimétricas, L*, a* e b* dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		L*		a*		b*	
Café	Granulometria	MC	ME	MC	ME	MC	ME
Arábica	0	17,40 ± 0,17 B a	16,94 ± 0,13 B a	6,58 ± 0,08 B a	6,18 ± 0,03 B b	4,34 ± 0,05 B a	4,27 ± 0,47 B a
	1	17,17 ± 0,10 BC a	17,65 ± 0,25 BC a	5,99 ± 0,01 C a	5,87 ± 0,03 C a	4,33 ± 0,07 B a	4,55 ± 0,16 BC a
	2	17,52 ± 0,03 BC a	18,46 ± 0,49 C b	5,67 ± 0,07 D a	5,89 ± 0,20 C b	4,26 ± 0,11 B a	5,08 ± 0,41 C b
	3	13,56 ± 0,23 A a	12,77 ± 0,94 A b	5,30 ± 0,20 A a	4,99 ± 0,11 A b	2,93 ± 0,22 A a	2,23 ± 0,32 A b
Conilon	0	22,35 ± 0,40 B a	18,37 ± 0,26 B b	7,88 ± 0,12 B a	6,05 ± 0,57 B b	7,88 ± 0,23 B a	4,41 ± 0,57 B b
	1	20,40 ± 0,22 C a	18,78 ± 0,65 B b	7,12 ± 0,15 C a	5,98 ± 0,20 BC b	6,60 ± 0,19 C a	5,33 ± 0,49 C b
	2	20,09 ± 0,12 CD a	17,77 ± 0,30 B b	6,51 ± 0,07 A a	5,44 ± 0,11 C b	5,97 ± 0,06 C a	4,43 ± 0,19 B b
	3	18,32 ± 0,89 A a	13,17 ± 0,83 A b	6,03 ± 0,15 A a	4,99 ± 0,28 A b	5,10 ± 0,23 A a	2,32 ± 0,39 A b

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café e coordenada colorimétrica, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Analisando a Tabela 1.5, verifica-se que em todas as amostras avaliadas houve diferenciação significativa quanto à cor entre o grão de café torrado inteiro e as amostras de café torrado e moído, independentemente da espécie, nível de torrefação e coordenada colorimétrica. Este comportamento se deve à maior torrefação da parte exterior dos grãos em comparação ao interior dos grãos (ILLY & VIANI, 1995). Em adição, após a moagem, a mistura das partículas mais torradas com as menos torradas resulta na diferenciação anteriormente citada. Borges *et al.* (2002) observaram este comportamento durante o estudo das coordenadas colorimétricas dos grãos de café torrados inteiros e moídos.

Entre os três níveis granulométricos utilizados (fino, médio e grosso), não foi identificado um comportamento das coordenadas colorimétricas. Todavia, nota-se pela Tabela 1.5 que a coordenada a^* foi a que mais se diferenciou entre as amostras, tanto ao nível granulométrico quanto ao nível de torrefação, seguida das coordenadas L^* e b^* .

Para as duas torrefações utilizadas, os valores da torra MC tendem a superar os dados da torra ME. Bicho *et al.* (2012) descreveram esta tendência das coordenadas colorimétricas para o *C. arabica* e o *C. canephora* processado em três níveis de torra diferentes, inteiros e moídos. Pittia; Nicoli; Sacchetti (2007) e Monteiro *et al.* (2002) também relataram o mesmo comportamento para as coordenadas L^* , a^* e b^* de café em distintos níveis de torrefação, indicando o escurecimento do produto.

Os valores da coordenada L^* variaram entre 12,77 e 22,35, corroborando com trabalho de Mwithiga e Jindal (2003), no qual os autores encontraram valores entre 13 e 21 para essa coordenada. Borges *et al.* (2002) explicaram a tendência de decréscimo da luminosidade de acordo com a intensidade de torra em função do escurecimento dos grãos devido à caramelização dos açúcares e reações de Maillard.

Os resultados obtidos para as coordenadas a^* e b^* estão na faixa de 4,99 a 7,88 e de 2,23 a 7,88, respectivamente. Sendo os valores positivos, conclui-se que os grãos de café torrado, inteiro e moído, estão posicionados no primeiro quadrante do sólido de cores do sistema CIE $L^*a^*b^*$, indicando mistura de cores vermelha e amarela. Em conjunto com os valores de L^* , essa mistura resulta em tons amarronzados para preto, característico de cafés torrados.

Apesar das três coordenadas colorimétricas indicarem a coloração do produto de forma satisfatória, Shewfelt (1993) explica que a percepção da coloração pelos seres humanos é obtida em termos de luminosidade, ângulo hue e croma. Desta forma, calcularam-se também os índices croma (C^*) e ângulo hue (h^*), inseridos na Tabela 1.6.

Tabela 1.6. Valores médios dos índices colorimétricos croma (C*) e ângulo hue (h*) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		C*		h*	
Café	Granulometria	MC	ME	MC	ME
Arábica	0	7,88 ± 0,09 B a	7,52 ± 0,25 B a	33,41 ± 0,18 B a	34,58 ± 3,00 B a
	1	7,39 ± 0,04 BC a	7,43 ± 0,12 B a	35,85 ± 0,41 B a	37,79 ± 0,87 BC a
	2	7,09 ± 0,12 C a	7,78 ± 0,42 B b	36,93 ± 0,41 B a	40,76 ± 1,36 C b
	3	6,06 ± 0,27 A a	5,47 ± 0,21 A b	28,90 ± 1,07 A a	24,00 ± 2,80 A b
Conilon	0	11,14 ± 0,24 B a	7,48 ± 0,79 BC b	44,98 ± 0,51 B a	36,03 ± 1,08 B b
	1	9,71 ± 0,24 C a	8,01 ± 0,48 B b	42,83 ± 0,20 AB a	41,66 ± 1,62 C a
	2	8,84 ± 0,08 C a	7,02 ± 0,21 C b	42,54 ± 0,18 AB a	39,14 ± 0,70 C b
	3	7,89 ± 0,23 A a	5,51 ± 0,42 A b	40,21 ± 1,08 A a	24,83 ± 2,36 A b

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café e índice colorimétrico, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Tal como ocorreu com os resultados das coordenadas colorimétricas, os índices colorimétricos croma e ângulo hue foram significativamente diferentes entre os grãos de café inteiros e moídos, com exceção das amostras de café conilon com torra MC e moídos ao nível médio e grosso. No entanto, entre as três granulometrias de café moído, não foi possível observar uma tendência clara de ângulo hue e croma, fato esperado, já que a mesma observação foi concluída para as coordenadas a* e b*, base de cálculo desses índices colorimétricos.

Entre os dois níveis de torrefação, houve comportamentos distintos em razão da espécie de café utilizada. *C. arabica* apresentou diferença significativa apenas para o café inteiro e o moído grosso, ao passo que para *C. canephora* essas diferenças ocorreram em 87,5 % das combinações granulometria e nível de torrefação. Bicho *et al.*

(2012) relataram comportamento desigual entre as duas espécies de café, tal como neste trabalho.

Para visualizar as diferenças colorimétricas entre as amostras, a Figura 1.3 foi elaborada de modo a permitir a representação dos pontos dos valores de ângulo hue em função dos valores de croma no espaço Hunter, localizando assim a exata posição das cores das diferentes amostras estudadas.

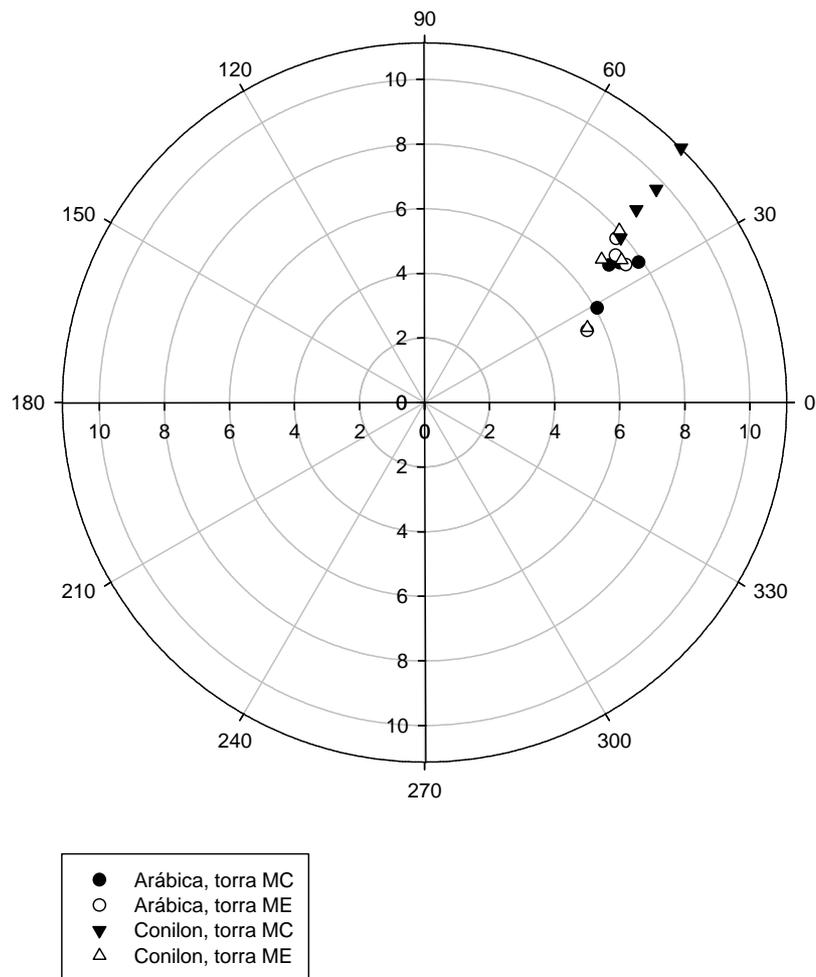


Figura 1.3. Localização das cores dos grãos de café torrados, inteiros e moídos, no espaço cromático de Hunter, utilizando as coordenadas croma e ângulo hue.

Observa-se na Figura 1.3 que a maior diferença visual é do café conilon na torra clara, seguido desta mesma espécie na torra escura. Já as amostras de café arábica se concentraram em uma parte do espaço cromático de Hunter, indicando a pouca diferenciação entre as torras e as granulometrias para esta espécie.

1.3.7 Granulometria a laser

Os diâmetros D_{10} , D_{50} e D_{90} , que equivalem, respectivamente, a 10, 50 e 90 % do total da massa do material analisado com diâmetro abaixo do valor encontrado estão apresentados na Tabela 1.7.

Tabela 1.7. Diâmetros das amostras dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em três granulometrias diferentes (0 - fina, 1 - média e 2 - grossa)

Amostra		D_{10} (μm)		D_{50} (μm)		D_{90} (μm)	
Café	Granulometria	MC	ME	MC	ME	MC	ME
Arábica	0	5,96	7,22	185,05	276,72	445,74	452,95
	1	3,87	3,39	42,80	38,18	349,43	339,50
	2	3,61	3,46	41,00	46,19	349,34	367,40
Conilon	0	10,64	12,23	157,28	287,05	442,32	454,49
	1	7,58	7,47	60,93	55,01	390,52	373,92
	2	7,07	6,32	64,35	72,23	384,25	402,05

Os resultados indicam que os cafés torrados e moídos nas granulometrias média e grossa são próximos em termos granulométricos, uma vez que a diferença entre estas amostras, independentemente da espécie de café, é baixa. Entretanto, o café torrado e moído na granulometria fina difere das amostras restantes, em todas as três faixas de diâmetros.

Os resultados na Tabela 1.7 relatam que as amostras de café nas granulometrias 2 e 3 são materiais mais finos que as amostras de café moídas na granulometria 1 ou fina, fato que difere do observado durante as análises. Este comportamento é explicado pela metodologia das análises, em que o pó de café era diluído com água destilada através de uma malha de tamanho 150 μm . Nas amostras com granulometrias 2 e 3 eram necessários maiores volumes de amostra, uma vez que grande parte do pó ficava retido, resultando na passagem apenas do material fino presente, mascarando assim os resultados da distribuição granulométrica. Dessa forma, a granulometria a laser não é indicada para a análise granulométrica de café torrado e moído.

1.3.8 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e ângulo de atrito efetivo (ϕ_e)

Os valores de ângulo de atrito interno e ângulo de atrito efetivo estão apresentados na Tabela 1.8.

Tabela 1.8. Valores médios de ângulo de atrito interno (ϕ_i) e ângulo de atrito efetivo (ϕ_e) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira)

Amostra		ϕ_i (°)		ϕ_e (°)	
Café	Granulometria	MC	ME	MC	ME
Arábica	0	28,3 B a	26,0 A a	34,9 B a	33,1 A a
	1	27,9 B a	27,0 A a	32,2 B a	32,0 A a
	2	30,8 B a	20,3 AB b	32,7 B a	31,3 A a
	3	41,2 A a	30,5 A b	41,2 A a	31,0 A b
Conilon	0	28,1 A a	28,1 A a	33,6 A a	33,2 A a
	1	25,1 A a	22,7 A a	31,2 A a	28,3 B a
	2	26,1 A a	21,5 A a	32,6 A a	27,8 B b
	3	34,2 A a	29,8 A a	34,2 A a	30,0 AB b

Médias seguidas por uma mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, para cada espécie de café e cada ângulo, não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

O ângulo de atrito interno (ϕ_i) é a força tangencial necessária para vencer o atrito entre dois corpos (GAGGERO; TREIN; IPPOLITI, 2002). Segundo estes mesmos autores, ele é proporcional à força normal sobre os grãos, sendo a força contrária constituída por uma mistura de pressões de escorregamento e de rolamento entre grãos. Nascimento (2008) relata que este ângulo está intimamente ligado às condições internas do produto armazenado, dependendo do nível médio de pressões aplicado a todos os grãos.

Os valores de ϕ_i variaram entre 20,3 e 41,2° para o café arábica e entre 21,5 e 34,2 para o café conilon. Especificamente para a primeira espécie, houve diferença entre as amostras com torra MC e a ME, nas amostras de café inteiro e com granulometria moído grossa, sendo a torra MC a que possibilitou maiores valores deste parâmetro. Esta tendência está intimamente ligada ao teor de água, em que produtos com maiores valores desta propriedade apresentam uma maior força de coesão entre as partículas (aumentando o atrito interno), podendo também ocorrer um aumento da rugosidade da

superfície do produto, incremento a resistência ao deslizamento entre partículas (SILVA *et al.*, 2006), resultando nos maiores valores de ϕ_i . Comportamento similar foi encontrado em trabalho com avelãs (KIBAR & ÖZTÜRK, 2009).

O comportamento de ϕ_i foi de diminuição com o aumento do tamanho das partículas (granulometria), para os casos das amostras de café torrado e moído. Uma explicação para este comportamento tem como fundamento o número global de pontos de contato entre as partículas de café. Uma moagem mais fina acarreta em maior quantidade de partículas, apesar de menores, que acabam por incrementar o número de pontos de contato entre as mesmas, levando a um maior valor de resistência de deslizamento entre as partículas, culminando nos maiores valores de ϕ_i encontrados no presente trabalho. Esta tendência também foi encontrada por Podczec e Miah (1996) trabalhando com oito diferentes pós com distintas granulometrias e formas.

Portanto, as amostras de café torradas MC apresentam, de modo geral, maior susceptibilidade em desenvolver coesão quando armazenados (LOPES NETO; NASCIMENTO; SILVA, 2009), maior resistência ao fluxo (CHEVANAN *et al.*, 2009) e maiores problemas com procedimentos pós-colheita que requeiram movimentação do produto, quando comparadas com as amostras de café torradas ME.

Segundo Naka (2010), para o cálculo da inclinação da tremonha, de modo a se evitar a formação de obstruções que venham a impedir o correto escoamento do produto armazenado, são necessários os valores de ϕ_i e do efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e). Este último é o ângulo formado pela reta que passa pela origem com o eixo das tensões normais.

A Tabela 1.8 reporta uma faixa de valores de ϕ_e entre 31,0 e 41,2° e entre 27,8 e 34,2° para as amostras de café das espécies arábica e conilon, respectivamente. Tal como ϕ_i , os valores de ϕ_e foram maiores para a torrefação mais branda (MC) e tendência de decréscimo com o aumento do tamanho das partículas. Este comportamento é explicado pelo teor de água e pelo número global de pontos de contato entre as partículas de café. Elevados teores de água leva o produto a apresentar maior força de coesão entre as partículas e a maior rugosidade da superfície do produto, aumentando-se assim a resistência ao deslizamento entre partículas. A moagem mais fina acarreta em maior quantidade de partículas, aumentando o número de pontos de contato entre as mesmas e conseqüentemente incrementando a resistência de deslizamento entre as partículas.

1.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições em que foi realizado o experimento, conclui-se que:

1. O teor de água, independentemente da espécie e nível de torrefação, não sofreu variações devido à granulometria do café;
2. O nível de torrefação do café influencia indiretamente o teor de água, em que quanto maior o grau de torrefação, menores são os valores desta propriedade física;
3. A atividade de água de café varia devido ao grau de torrefação e as diferentes granulometrias empregadas, em que amostras moídas de forma mais grossa combinada com torra mais branda obtém maior atividade de água;
4. Valores de ângulo de repouso, ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno de café torrado, inteiro e moído, decrescem com o aumento da granulometria;
5. As amostras de café torradas em nível média clara obtiveram maiores valores de ângulo de repouso, ângulo de atrito interno e o ângulo de atrito efetivo de café torrado, quando comparada com as amostras de café torradas em nível moderadamente escura;
6. A torrefação moderadamente escura fornece menores valores de massa específica unitária e aparente, ao passo que não há comportamento definido para a porosidade;
7. As propriedades massa específica unitária, massa específica aparente e porosidade tem comportamento direto com o incremento do grau de moagem de café;
8. A coloração de café torrado, inteiro e moído, pode ser relacionada com a coordenada colorimétrica a^* ;
9. A técnica de granulometria a laser não é adequada para a análise granulométrica de café torrado e moído.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGGENSTOSS, J.; POISSON, L.; KAEGI, R.; PERREN, R.; ESCHER, F. Roasting and aroma formation: effect of initial moisture content and steam treatment. **Journal of agricultural and food chemistry**, Washington, v. 56, n. 14, p. 5847-5851, 2008.

BHANDARI, B. R.; DATTA, N.; D'ARCY, B. R.; RINTOUL, G. B. Co-crystallization of honey with sucrose. **LWT – Food Science Technology**, Filadélfia, v. 31, n. 2, p. 198-142, 1998.

BICHO, N. C.; LEITÃO, A. E.; RAMALHO, J. C.; LIDON, F. C. Use of colour parameters for roasted coffee assessment. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 436-442, 2012.

BORGES, M. L. A.; FRANÇA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; CORRÊA, P. C.; GLÓRIA, M. B. A. Estudo da variação da coloração de café arábica durante a torra em diferentes condições de aquecimento. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 5, p. 3-8, 2002.

BORGES, M. L. A.; MENDONÇA, J. C. F.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; CORRÊA, P. C. Efeito da torração em parâmetros físicos de cafés de diferentes qualidades. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 8, p. 6-13, 2004.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.

BRITO, J. G.; SILVA, E. F. M.; COSTA, T. L.; ROCHA, A. P. T.; SILVA, O. S. Propriedades físicas do cominho em pó comercializado nas feiras livres da Paraíba. **Revista Verde**, Mossoró, v. 7, n. 1, p. 206–211, 2012.

BMHB - British Materials Handling Board. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Inglaterra, 1985. 101p.

CARDELLI, C.; LABUZA, T. P. Application of Weibull Hazard Analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, p. 273-278, 2001.

CHANDRASEKAR, V.; VISWANATHAN, R. Physical and Thermal Properties of Coffee. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Filadélfia, v. 73, n. 3, p. 227-234, 1999.

CHEVANAN, N.; WOMAC, A. R.; BITRA, V. S. P.; YODER, D. C.; SOKHANSANJ, S. Flowability parameters for chopped switchgrass, wheat straw and corn stover. **Powder Technology**, Filadélfia, v. 193, n. 1, p. 79–86, 2009.

COUTO, S. M.; MAGALHÃES, A. C.; QUEIROZ, D. M.; BASTOS, I. T. Massa específica aparente e real e porosidade de grãos de café em função do teor de umidade.

Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 61-68, 1999.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; RODRIGUES, A. P. L.; CAMPOS, S. C.; BOTELHO, F. M. Hygroscopic equilibrium and physical properties evaluation affected by parchment presence of coffee grain. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 8, n. 3, p. 694-702, 2010.

CORRÊA, P. C.; SILVA, J. S. Estrutura, composição e propriedades dos grãos. In: SILVA, J. S. (Org.). **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p. 19-36.

FELLOWS, P. **Food Processing Technology: principles and practice**. New York: CRC Press, 2000. p. 592.

FITZPATRICK, J. J.; IQBAL, T.; DELANEY, C.; TWOMEY, T.; KEOGH, M. K. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 64, p. 435-444, 2004.

FRANÇA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; BORGES, M. L. A.; VITORINO, M. D. Evolução da composição do extrato aquoso de café durante o processo de torrefação. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 2, p. 37-47, 2001.

FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; MENDONÇA, J. C. F.; SILVA, X. A. Physical and chemical attributes of defective crude and roasted coffee beans. **Food Chemistry**, Filadélfia, v. 90, n. 1-2, p. 89-94, 2005a.

FRANCA, A. S.; MENDONÇA, J. C. F.; OLIVEIRA, S. D. Composition of green and roasted coffees of different cup qualities. **LWT - Food Science and Technology**, v. 38, n. 7, p. 709-715, 2005b.

GAGGERO, M. R.; TREIN, C. R.; IPPOLITI, G. Influência de sistemas de preparo e pastejo nas características físicas do solo. **Revista do Programa de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 1, n. 1, p. 1-16, 2002.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; VERLINDEN, A. Characterisation of dry powders. **Powder technology**, Filadélfia, v. 190, n. 1-2, p. 70-74, 2009.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 50, p. 386-391, 2013.

GRELLIER, P.; RIVIERE, L. M.; RENAULT, P. Transfer and water-retention properties of seed-pelleting materials. **European Journal of Agronomy**, Filadélfia, v. 10, n. 1, p. 57-65, 1999.

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

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. **Flow factor Tester and consolidating bench operating instructions**. Jenike & Johanson, Inc, North Billerica, Massachusetts – USA, 1979. 40p.

JONG, J. A. H.; HOFFMANN, A. C.; FINKERS, H. J. Properly determine powder flowability to maximize plant output. **Chemical Engineering Progress**, Nova Iorque, v. 95, n. 4, p. 25-34, 1999.

KIBAR, H.; ÖZTÜRK, T. The effect of moisture content on the physico-mechanical properties of some hazelnut varieties. **Journal of Stored Products Research**, Filadélfia, v. 45, n. 1, p. 14–18, 2009.

KONSTANCE, R. P.; ONWULATA, C. I.; HOLSINGER, V. H. Flow properties of spray-dried encapsulated butteroil. **Journal of Food Science**, Malden, v. 60, n. 4, p. 841-844, 1995.

LABUZA, T. P.; KAAANANE, A.; CHEN, J. Y. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. **Journal of Food Science**, Malden, v. 50, n. 2, p. 385-391, 1985.

LICCIARDI, R.; PEREIRA, R. G. F. A.; MENDONÇA, L. M. V. L.; FURTADO, E. F. Avaliação físico-química de cafés torrados e moídos, de diferentes marcas comerciais, da região sul de minas gerais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 425-429, 2005.

LOPES NETO, J.P.; NASCIMENTO, J.W.B.; SILVA, V.R. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n. 4, p. 518-527, 2009.

MEDEIROS, M. L.; LANNES, S. C. S. Propriedades físicas de substitutos de cacau. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. supl. 1, p. 243-253, 2010.

MENDONÇA, J. C. F.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Physical characterization of non-defective and defective Arabica and Robusta coffees before and after roasting. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 92, n. 4, p. 474-479, 2009.

MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos**. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

MOHSEIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. p. 918.

MONTEIRO, M. A. M.; MINIM, V. P. R.; CHAVES, J. B. P.; STRINGHETA, P. C.; SILVA, P. H. A. Efeito do tipo de torra sobre o teor de compostos fenólicos e a cor dos grãos de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 5, p. 55-59, 2002.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. K. Physical Changes During Coffee Roasting in Rotary Conduction-Type Heating Units. **Journal of Food Process Engineering**, Malden, v. 26, n. 6, p. 543-558, 2003.

NAKA, S. **Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘Guarani’ visando armazenagem em silos verticais**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

NASCIMENTO, F. C. **A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

PEGG, R. B.; SHAHIDI, F. **Encapsulation, Stabilization, and Controlled Release of Food Ingredients and Bioactives**. In: RAHMAN, M.S. (ed.), *Handbook of Food Preservation*, 2ª edição, pp. 509-570. 2007.

PIMENTA, T. V.; PEREIRA, R. G. F. A.; CORRÊA, J. L. G.; SILVA, J. R. Roasting processing of dry coffee cherry: influence of grain shape and temperature on physical, chemical and sensorial grain properties. **Boletim do CEPPA**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 97-106. 2009.

PITTIA, P.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C. R. Textural Changes of Coffee Beans as Affected by Roasting Conditions. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

PITTIA, P.; NICOLI, M. C.; SACCHETTI, G. Effect of moisture and water activity on textural properties of raw and roasted coffee beans. **Journal of Texture Studies**, Malden, v. 38, n. 1, p. 116-134. 2007.

PODCZECK, F.; MIAH, Y. The influence of particle size and shape on the angle of internal friction and the flow factor of unlubricated and lubricated powders. **International Journal of Pharmaceutics**, Filadélfia, v. 144, n. 2, p. 187-194, 1996.

RIBEIRO, R. C. M. S.; BORÉM, F. M.; CORRÊA, P. C.; RIBEIRO, D. M.; RESENDE, O. Porosidade e massa específica de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 3, p. 54-61, 2001.

ROBBERTS, T. C. **Food Plant Engineering Systems**. New York: CRC Press, 2002. p. 268.

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

SCHUBERT, H. Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 6, n. 1, p. 1-32, 1987.

SHEWFELT, R. L. **Measuring quality and maturity.** In: SHEWFELT, R.L.; PRUSSIA, S.E. (Eds.) Postharvest handling: a systems approach. New York, Academic Press, p. 99 – 124, 1993.

SHITTU, T. A.; LAWAL, M. O. Factors affecting instant properties of powdered cocoa beverages. **Food Chemistry**, Filadélfia, v. 100, n. 1, p. 91-98, 2007.

SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; CALIL-JÚNIOR, C.; GOMES, F. C. Ângulo de repouso, atrito interno e efetivo dos grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grade, v. 8, n. 1, p. 17-23, 2006.

SILVA, P. A.; CUNHA, R. L.; LOPES, A. S.; PENA, R. S. Caracterização de farinhas de tapioca produzidas no estado do Pará. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 1, p. 185-191. 2013.

SINGH, P. C.; SINGH, R. K.; BHAMIDIPATI, S.; SINGH, S. N.; BARONE, P. Thermophysical properties of fresh and roasted coffee powders. **Journal of Food Process Engineering**, Malden, v. 20, n. 1, p. 31-50, 1997.

TORRES, I. D. A.; HERRERA, J. J. C.; TASCÓN, C. E. O. Physical and mechanical properties correlation of coffee fruit (*Coffea arabica*) during its ripening. **Dyna**, Medellín, v. 79, n. 172, p. 148-155, 2012.

VARGAS-ELÍAS, G.A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação.** 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2011.

WILHELM, L. R.; SUTER, D. A.; BRUSEWITZ, G. H. **Food & Process Engineering Technology textbook.** St. Joseph, Michigan: ASAE, 2004. p. 299.

YAN, H.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. Compression characteristics of agglomerated food powders: effect of agglomerate size and water activity. **Food Science and Technology International**, California, v. 3, n. 5, p. 351–359, 1997.

CAPÍTULO 2

Conservação de café torrado e moído durante o armazenamento

2.1 INTRODUÇÃO

A conservação de café torrado, inteiro ou moído, é necessária para a comercialização deste produto, tanto para o mercado interno brasileiro como para o externo. Diferentes fatores tem influência na conservação do café e, conseqüentemente, na qualidade final deste produto, como por exemplo, o cultivo, a colheita e os procedimentos pós-colheita: torrefação, moagem e armazenamento.

O café torrado, inteiro e moído, é susceptível à perda de qualidade pela exposição ao ambiente de estocagem, como o oxigênio, à luz, à umidade e às temperaturas elevadas (BAPTESTINI, 2011). A qualidade do café torrado, inteiro e moído, é função do nível de torrefação e da moagem, ao passo que o correto armazenamento é necessário para a manutenção de sua qualidade. Ademais, é possível correlacionar a qualidade de café com as propriedades físicas, tais como teor de água, ângulo de repouso, massa específica unitária e aparente, a porosidade e a cor do produto.

O processo de torrefação tem influência significativa na composição química, nas propriedades físicas e estruturais do café, que por fim afetam a qualidade final do produto. Melo (2004) indicou que o ponto de torra define a qualidade final da bebida e Mwithiga e Jindal (2003) observaram significativas alterações nas propriedades físicas durante a torrefação dos grãos de café.

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 & VIANI, 1995). A moagem resulta em produtos pulverulentos, podendo-se obter produtos com diferentes granulometrias, de acordo com a necessidade do mercado, tal como concluíram Schmidt; Miglioranza; Prudêncio (2008). A moagem atua sobre as propriedades físicas dos produtos, como relatado em diferentes trabalhos (GELDART; ABDULLAH; VERLINDEN, 2009; KHEIRIPOUR LANGROUDI *et al.*, 2010).

O armazenamento do café é uma etapa importante sob o aspecto de comercialização, tendo em vista que sua colheita ocorre durante 3 a 4 meses do ano e seu consumo perdura ao longo de todo o ano e em diferentes localidades (RODRIGUES, 2009). Sendo assim, de modo a possibilitar a oferta deste produto durante todo o ano, mantendo-se a elevada qualidade inicial, há a necessidade de se conhecer as alterações físicas que ocorrem durante o armazenamento em diferentes condições, uma vez que estas são indicativas da qualidade do produto.

As propriedades físicas também são influenciadas pelo tempo de armazenamento, fato este observado em diferentes trabalhos, com diferentes produtos, tais como farinha de trigo, chá e soro de leite (TEUNOU & FITZPATRICK, 2000; IQBAL & FITZPATRICK, 2006), pó de laticínios (FITZPATRICK *et al.*, 2007) e ração avícola (NÓBREGA & NASCIMENTO, 2005; LOPES NETO; NASCIMENTO; SILVA, 2009).

O armazenamento de café torrado e moído não é indicado devido à moagem promover o rompimento das células e, portanto, possibilitar uma maior perda dos constituintes e da qualidade deste produto. Porém, o estudo das propriedades físicas do café torrado e moído se justifica em razão às possíveis dificuldades de mercado. Dentre estas, pode-se citar a necessidade de armazenar o produto já processado devido à falta de transporte, preços que inviabilizem a comercialização imediata e também a necessidade de formulação de *blends*. Além disso, a armazenagem a granel tem grande vantagem por possibilitar a mecanização dos processos com substancial redução na mão-de-obra requerida, quando comparada ao método tradicional de armazenagem (SILVA, 2003).

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar e determinar algumas propriedades físicas (teor de água, ângulo de repouso, massa específica unitária e

aparente, porosidade e as coordenadas de cor) de café em diferentes níveis de torra e granulometria, durante o armazenamento em duas temperaturas distintas.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido em dois locais: no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, MG; e no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte-MG.

2.2.1 *Matéria-prima*

Foram utilizados grãos de café cru (*Coffea canephora* e *Coffea arabica*), descascados e secos, adquiridos de comércio regional da Zona da Mata de Minas Gerais.

Os grãos foram submetidos a uma triagem para eliminar os grãos deteriorados, danificados e brocados, a fim de se obter uma matéria-prima homogênea e com o mínimo de defeitos. Grãos provenientes de frutos de bica corrida foram utilizados.

O teor de água médio inicial dos grãos foi de 12,61 % (b.s.), tendo sido determinado pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h (BRASIL, 2009).

2.2.2 *Preparo das amostras*

Os grãos de café de ambas as espécies, após a triagem, foram encaminhadas para o processo de torrefação. Para isso, foi utilizado um torrefador de queima direta de gás GLP, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com pré-aquecimento e capacidade de 350 g de café cru (Figura 2.1).



Figura 2.1. Torrefador de quatro cilindros rotativos com queima de gás direto.

O nível de cada torrefação dos grãos de café foi identificado por meio do acompanhamento e comparação da cor das amostras com o número padrão de cor Agrtron, assessorado por um profissional treinado. Dois níveis de torra foram obtidos: média clara (MC) e moderadamente escura (ME), cujos números Agrtron correspondentes são, respectivamente, SCAA#65 e SCAA#45 (Figura 2.2).



Figura 2.2. Níveis de torra empregados: média clara (A) e moderadamente escura (B).

Para garantir a uniformidade das torras, foi utilizado o parâmetro perda de massa, em que, para a temperatura utilizada de 285 °C, os grãos perderam, em média, 15,85 e 18,74 gramas de massa, respectivamente para as torras MC e ME (VARGAS-ELÍAS, 2011). Para se atingir estas perdas de massa, foram realizados testes com a temperatura do torrefador e o tempo de torrefação. Ao atingir os dois níveis de torra mencionados, o produto foi retirado do torrefador e imediatamente esfriado utilizando-se ar ambiente.

Após o processo de torrefação, os grãos foram processados em moinho Mahlkönig, em três granulometrias diferentes: fina (0,59 mm), média (0,84 mm) e grossa (1,19 mm), além de mantido o lote de café inteiro.

As amostras preparadas foram então colocadas em sacos de polipropileno e mantidas em câmaras tipo B.O.D. em duas temperaturas de armazenamento (10 e 30 °C). As mesmas foram analisadas durante seis meses, em cinco tempos distintos (0, 30, 60, 120 e 180 dias) quanto às diferentes propriedades físicas, descritas a seguir.

2.2.3 Propriedades físicas

2.2.3.1 Teor de água

O teor de água do café torrado, inteiro e moído, foi determinado empregando-se o método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h (BRASIL, 2009). Cada amostra foi avaliada em triplicata e a média das três determinações foi utilizada.

2.2.3.2 Ângulo de repouso

Para determinar o ângulo de repouso utilizou-se uma plataforma cilíndrica circular de diâmetro de 15 cm, contendo, em seu centro, uma haste graduada onde o produto foi depositado, proveniente de um funil de recepção de amostra de grãos a uma altura de 0,60 m. Em seguida, mediu-se a altura do talude formado pelo produto e a plataforma. De posse destas informações, o ângulo de repouso foi obtido por meio do arco tangente de um triângulo formado pela base do produto e a altura do talude. Cada amostra foi avaliada em triplicata e a média das três determinações foi utilizada.

2.2.3.3 Massa específica unitária e aparente

A massa específica unitária (ρ_u) ou real foi determinada com o uso de um picnômetro a hélio em conjunto com as Equações 2.1 e 2.2, em cinco repetições:

$$P_1(V_a - V_s) = P_2(V_a - V_s + V_e) \quad (2.1)$$

$$\rho_u = \frac{m_g}{V_s} \quad (2.2)$$

em que

P_1 = pressão inicial, Pa;

P_2 = pressão final, Pa;

V_a = volume da câmara da amostra, m^3 ;

V_s = volume do sólido (café), m^3 ;

V_e = volume da câmara de expansão, m^3 ;

ρ_u = massa específica unitária, $kg\ m^{-3}$; e

m_g = massa de café torrado, kg.

A massa específica aparente (ρ_{ap}) foi determinada com uma balança de peso hectolitro com capacidade de 1 L, em cinco repetições.

2.2.3.4 Porosidade

A porosidade (ε) foi determinada indiretamente de acordo com a Equação 2.3 (MOHSENIN, 1986), tradicionalmente utilizada para produtos agrícolas.

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_u}\right) \times 100 \quad (2.3)$$

em que

ε = porosidade, %; e

ρ_{ap} = massa específica aparente, $kg\ m^{-3}$.

2.2.3.5 Cor

A coloração foi realizada com auxílio de um colorímetro tristímulo, em três repetições, com leitura direta de reflectância das coordenadas L^* (luminosidade), a^* (tonalidades vermelha/verde) e b^* (tonalidades amarela/azul), empregando a escala Hunter-Lab e utilizando o iluminante $10^\circ/D60$.

A partir dos valores de L^* , a^* e b^* , foram obtidos os índices colorimétricos croma (C^*), que define a intensidade e a pureza de uma cor (Equação 2.4) e o ângulo hue (h^*), que define a tonalidade da cor (Equação 2.5): 0° (vermelho), 90° (amarelo), 180° (verde) e 270° (azul).

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (2.4)$$

$$h^* = \tan^{-1} \frac{b^*}{a^*} \quad (2.5)$$

2.2.4 Delineamento experimental

O trabalho foi realizado em dois experimentos: um tendo como matéria-prima grãos de café da espécie *Coffea arabica* L. e o outro utilizando grãos de café da espécie *Coffea canephora* Pierre. Cada experimento foi instalado em um esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas o tempo de armazenamento e nas subparcelas um fatorial $2 \times 4 \times 2$ (dois níveis de torrefação, quatro níveis de granulometria e duas temperaturas de armazenamento), com o número de repetições diferente para cada variável resposta analisada.

Os dados experimentais das propriedades físicas analisadas em cada tempo de armazenamento foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey adotando-se um nível de 5 % de probabilidade. Para o tempo de armazenamento os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t”, adotando-se o nível de 1, 5 e 10 %, no coeficiente de determinação, R^2 (obtido pela relação entre a soma de quadrado da regressão e a soma de quadrado do tratamento) e no comportamento em estudo.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Teor de água

A influência do tempo de armazenamento isoladamente, bem como sua interação com as variáveis torra e granulometria, foi significativa para o teor de água, nas duas temperaturas analisadas. Este fato ocorreu independentemente da espécie de café avaliada e a temperatura de armazenamento utilizada.

As Figuras 2.3 e 2.4 demonstram a variação dos valores de teor de água de café torrado, inteiro e moído, em função do tempo de armazenagem, respectivamente para *Coffea arabica* e *Coffea canephora*.

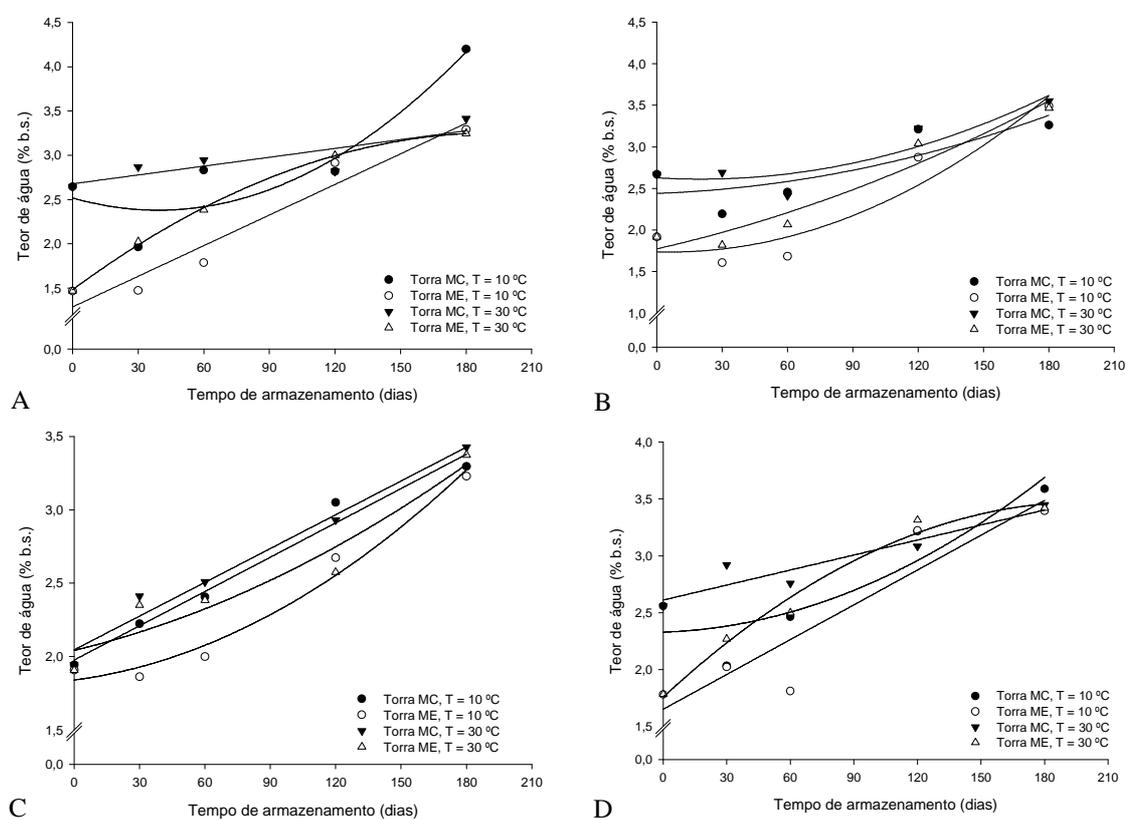


Figura 2.3. Valores médios observados e estimados de teor de água de *Coffea arabica* L. torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

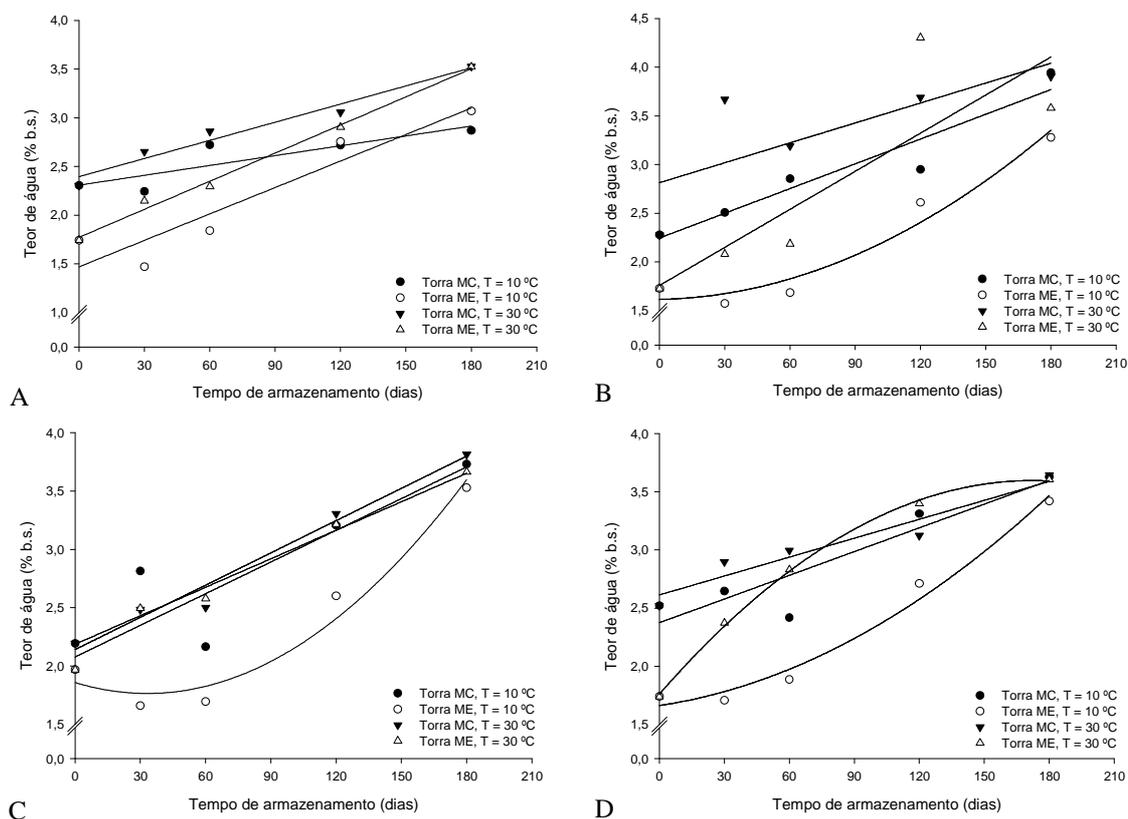


Figura 2.4. Valores médios observados e estimados de teor de água de *Coffea canephora* Pierre torrado, granulometria inteiro (A), fino (B), médio (C) e grosso (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

De acordo com as Figuras 2.3 e 2.4, nota-se que o café torrado e inteiro é a granulometria em que ocorre maior variação dos valores de teor de água ao longo do armazenamento, independentemente da espécie de café. Já as granulometrias fina, média e grossa permitem uma maior linearidade do aumento do teor de água ao longo do armazenamento.

Independentemente do nível granulométrico ou da espécie de café avaliada, os valores de teor de água aumentaram ao longo do armazenamento, chegando aos 180 dias com valores entre 3,5 e 4,0 % (b.s.), estando de acordo com a legislação vigente de até 5,0 % (b.u.) ou 5,26 % (b.s.) (BRASIL, 2010). Pelo fato do café torrado ser um produto higroscópico, ou seja, ele tem a capacidade de trocar água com o meio, esta tendência é esperada. O baixo teor de água inicial do café incita a adsorção de umidade, aumentando-se assim o teor de água com o passar dos dias.

Analisando as Figuras 2.3 e 2.4, observa-se que os cafés torrados ao nível ME possuem menores valores de teor de água quando comparados aos cafés torrados ao nível MC. O maior tempo no processo de torrefação (torra ME) leva a maior perda de

massa do produto, que por sua vez é retratada como a evaporação da água do produto, conforme foi observado. Trabalhos anteriores reportaram esta tendência (BAGGENSTOSS *et al.* 2008; SCHMIDT; MIGLIORANZA; PRUDÊNCIO, 2008; BICHO *et al.*, 2012).

De modo geral, os cafés torrados, inteiros e moídos, armazenados à temperatura de 10 °C obtiveram menores valores de teor de água, com tendência a se equivalerem após cerca de 150 dias de armazenamento. Fernandes *et al.* (2006) avaliaram a composição química do café torrado e moído durante 210 dias de armazenamento a 5 °C e 25 °C. Estes autores constataram que o café armazenado a 5 °C apresentou os menores valores de teor de água comparados aos armazenados a 25 °C, corroborando com os resultados deste trabalho.

Na Tabela 2.1 relata são apresentados os modelos ajustados aos dados experimentais de teor de água do café, de acordo com a espécie de café analisada e a temperatura de armazenagem utilizada. As equações de regressão apresentaram valores de coeficiente de determinação entre 56,93 e 99,90 %, obtendo parâmetros significativos ($p < 0,05$), indicando que os mesmos são aptos para representar o fenômeno estudado.

Tabela 2.1. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de teor de água (U) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura), em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) e armazenados em duas temperaturas, em função do tempo de armazenamento (t), com seus respectivos coeficientes de determinação (R², %)

<i>Café Arábica</i>								
Torra								
Gran.	MC				ME			
	10 °C	R ²	30 °C	R ²	10 °C	R ²	30 °C	R ²
0	$U = 2,440^* + 0,001t + 2,3 \cdot 10^{-5}t^2$	69,25	$U = 2,627^* - 0,002t + 3,9 \cdot 10^{-5}t^2$	85,12	$U = 1,735^* - 0,001t + 6,2 \cdot 10^{-5}t^2$	91,30	$U = 1,772^* + 0,006t + 2,2 \cdot 10^{-5}t^2$	94,22
1	$U = 1,976^* + 0,008^*t$	97,78	$U = 2,046^* + 0,008^*t$	97,59	$U = 1,839^* + 0,002t + 3,3 \cdot 10^{-5}t^2$	97,83	$U = 2,041^* + 0,004t + 1,9 \cdot 10^{-5}t^2$	92,28
2	$U = 2,328^* + 0,001t + 3,8 \cdot 10^{-5}t^2$	83,66	$U = 2,611^* + 0,004^*t$	88,32	$U = 1,649^* + 0,010^*t$	85,96	$U = 1,756^* + 0,017t - 4,3 \cdot 10^{-5}t^2$	98,25
3	$U = 2,519^* - 0,007t + 9,0 \cdot 10^{-5}t^2$	85,24	$U = 2,679^* + 0,003t$	70,01	$U = 1,288^* + 0,011^*t$	94,57	$U = 1,482^* + 0,018^*t - 4,7 \cdot 10^{-5}t^2$	99,90
<i>Café Conilon</i>								
Torra								
Gran.	MC				ME			
	10 °C	R ²	30 °C	R ²	10 °C	R ²	30 °C	R ²
0	$U = 2,246^* + 0,008^*t$	91,51	$U = 2,815^* + 0,007^*t$	56,93	$U = 1,615^* + 0,001t + 5,1 \cdot 10^{-5}t^2$	95,92	$U = 1,758^* + 0,013t$	72,14
1	$U = 2,186^* + 0,008^*t$	76,92	$U = 2,141^* + 0,009^*t$	97,38	$U = 1,858^* - 0,006t + 8,5 \cdot 10^{-5}t^2$	96,63	$U = 2,077^* + 0,009^*t$	97,00
2	$U = 2,375^* + 0,007^*t$	84,61	$U = 2,614^* + 0,005^*t$	92,54	$U = 1,666^* - 0,003t + 4,0 \cdot 10^{-5}t^2$	98,23	$U = 1,761^* + 0,021t - 6,2 \cdot 10^{-5}t^2$	99,90
3	$U = 2,309^* + 0,003^*t$	76,17	$U = 2,396^* + 0,006^*t$	96,57	$U = 1,469^* + 0,009^*t$	88,71	$U = 1,772^* + 0,010^*t$	99,38

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

2.3.2 Ângulo de repouso

Todos os fatores (nível de torra, granulometria e tempo de armazenamento) influenciaram significativamente os resultados de ângulo de repouso (α), bem como as interações entre esses. Este fato ocorreu independentemente da espécie de café avaliada e a temperatura de armazenamento utilizada.

As Figuras 2.5 e 2.6 demonstram o comportamento dos valores de ângulo de repouso ao longo do armazenamento, respectivamente para as espécies *Coffea arabica* e *Coffea canephora*.

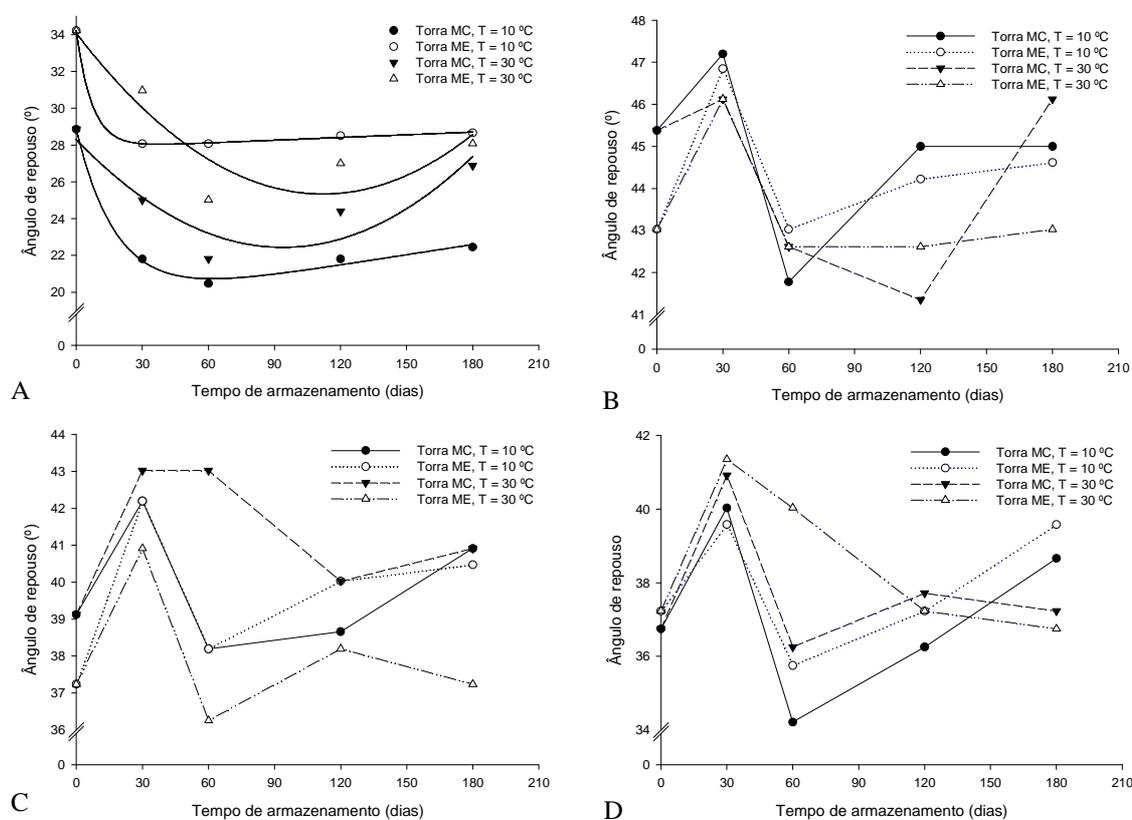


Figura 2.5. Valores médios observados de ângulo de repouso de café arábica torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

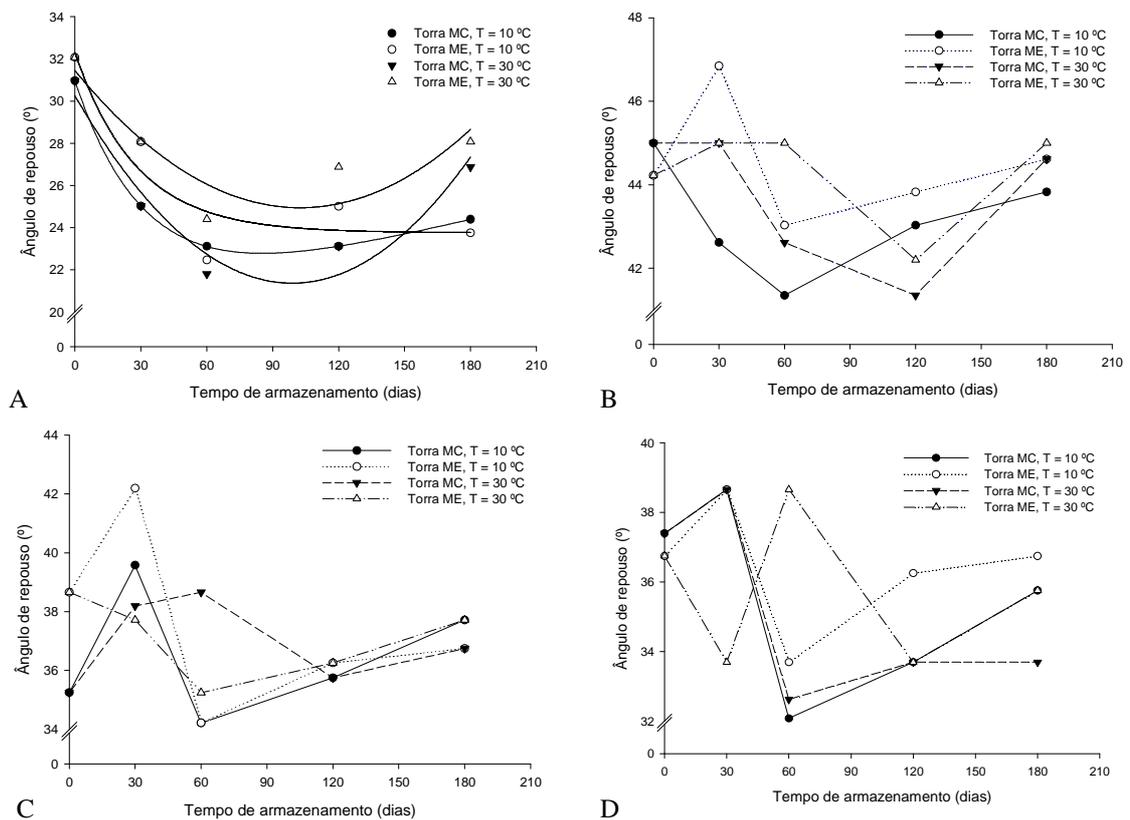


Figura 2.6. Valores médios observados de ângulo de repouso de café conilon torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

Observando-se as Figuras 2.5 e 2.6, nota-se que o café torrado inteiro, independentemente da espécie avaliada, apresenta comportamento distinto do café torrado e moído. Ao passo que estes têm um incremento nos valores de α da colheita para os 30 dias de armazenamento, o café torrado inteiro tem um decréscimo a partir da colheita. Por fim, em todas as amostras avaliadas, há tendência de aumento dos valores de α ao longo do armazenamento do produto.

A particularidade observada nos 30 primeiros dias é explicada pela integridade das células do café torrado. Como o grão de café não foi moído, ele possui maior capacidade de preservar seus constituintes e também seu teor de água devido à barreira física proveniente das células intactas ou com baixo grau de rompimento. Já a moagem permite a quebra dessa barreira, incrementando a velocidade das trocas entre o produto e o ambiente que o envolve, levando ao efeito de aglomeração devido à absorção de água do ambiente. Isto ocorre de maneira abrupta no início devido ao baixo teor de água após a torrefação, tornando o produto mais higroscópico, tendo maior absorção de umidade nessa fase. Assim, a aglomeração diminui a escoabilidade do café, aumentando

os valores de α . Este fato é notado pelos valores de α de café torrado e inteiro (entre 20 e 34 °) e de café torrado e moído (entre 32 e 48°).

Com o passar dos dias, as moléculas de água que penetram nos grãos inteiros, bem como a umidade adsorvida no café moído, levam ao aumento gradativo do ângulo de repouso, com as amostras tendendo a se equivaler. Este fato é esperado, uma vez que a maior quantidade de tempo do produto exposto ao ambiente permite a constante interação entre estes, levando ao incremento do teor de água do produto (observado na seção 2.3.1), de acordo com a umidade relativa do ambiente. Teunou e Fitzpatrick (2000) demonstraram que produtos pulverulentos se tornam mais coesos ao longo do tempo devido à compactação do produto devido à sua própria massa e devido à absorção de umidade, corroborando com os resultados aqui elencados.

A granulometria do café torrado teve papel importante na variável resposta α . As Figuras 2.5 e 2.6 (A, B e C) relatam que, quanto mais grosso for o café torrado, menores são os valores de ângulo de repouso. Geldart; Abdullah; Verlinden (2009) reportaram que, quanto maior a partícula, menor é o número total de partículas na massa do produto, diminuindo assim as forças de coesão entre produto/produto. Dessa forma, essa perda de coesividade leva a formação de taludes mais planos, ou seja, com menor ângulo de repouso.

Especificamente para as Figuras 2.5 (A) e 2.6 (A), percebe-se que, em termos gerais, as amostras mais intensamente torradas (ME) apresentam maiores valores de α durante o período de armazenamento. Segundo Medeiros e Lannes (2010), o maior grau de torrefação acarreta no aumento da friabilidade das partículas do produto, ou seja, estes se tornam mais susceptíveis de se esfarelarem, formando assim partículas menores.

As amostras torradas e moídas variaram seus valores de α de forma aleatória ao longo do armazenamento. Espera-se que, amostras com maior grau de torrefação e consequentemente menores teor de água apresentem menor ângulo de repouso, uma vez que estas propriedades estão diretamente ligadas. No entanto, o nível de higroscopicidade das amostras moídas pode ter sobreposto o grau de importância do nível de torrefação, levando a este comportamento aleatório.

As temperaturas de armazenamento utilizadas no presente trabalho permitiram ao café, especialmente para as amostras inteiras, manter os níveis encontrados de α . Já para as amostras moídas o efeito da temperatura foi mascarado pelo fator

granulométrico, uma vez que em diferentes amostras armazenadas a 10 °C houve variação brusca de ângulo de repouso.

Em razão ao observado nos valores de α nos 30 primeiros dias de armazenamento para as amostras torradas e que sofreram a moagem, não foi possível adequar equações que representem de maneira satisfatória este comportamento. Assim, a Tabela 2.2 relata as equações de regressão ajustadas aos dados observados de ângulo de repouso de café torrado e inteiro.

Tabela 2.2. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de ângulo de repouso (α) dos grãos inteiros de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e armazenados em duas temperaturas, em função do tempo de armazenamento (t), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

<i>Café Arábica</i>			
Torra	Temperatura (°C)	Equação	R^2
MC	10	$\alpha = 19,2321^{**} + 9,6365^{***} \exp(-0,0539t) + 0,0187t$	99,56
	30	$\alpha = 28,2988^* - 0,1249^{***} t + 0,0007^{***} t^2$	83,08
ME	10	$\alpha = 27,8212^* + 6,3946^{**} \exp(-0,1379t) + 0,0049t$	99,96
	30	$\alpha = 34,0717^* - 0,1560^{***} t + 0,0007t^2$	83,35
<i>Café Conilon</i>			
Torra	Temperatura (°C)	Equação	R^2
MC	10	$\alpha = 19,8020^* + 11,1610^* \exp(-0,0306^* t) + 0,0252^* t$	99,99
	30	$\alpha = 30,2446^* - 0,1797^{**} t + 0,0009^{***} t^2$	92,54
ME	10	$\alpha = 23,7452^* + 8,5520^{***} \exp(-0,0356t)$	85,62
	30	$\alpha = 31,4433^* - 0,1270^{***} t + 0,0006t^2$	78,70

* Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste “t”

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”

*** Significativo a 10 % de probabilidade pelo teste “t”

Nota-se pela Tabela 2.2 que as equações apresentadas relatam satisfatoriamente o comportamento apresentado, com valores adequados de coeficiente de determinação, entre 78,70 e 99,99 %, bem como a significância dos parâmetros de ajuste.

2.3.3 Massa específica unitária, aparente e porosidade

Os fatores nível de torrefação, temperatura de armazenamento, tempo de armazenamento e granulometria atuaram significativamente nos valores de massa específica unitária (ρ_u) de café torrado, independentemente da espécie avaliada.

As Figuras 2.7 e 2.8 demonstram o comportamento dessa propriedade física ao longo do armazenamento de café arábica e conilon, respectivamente, por seis meses.

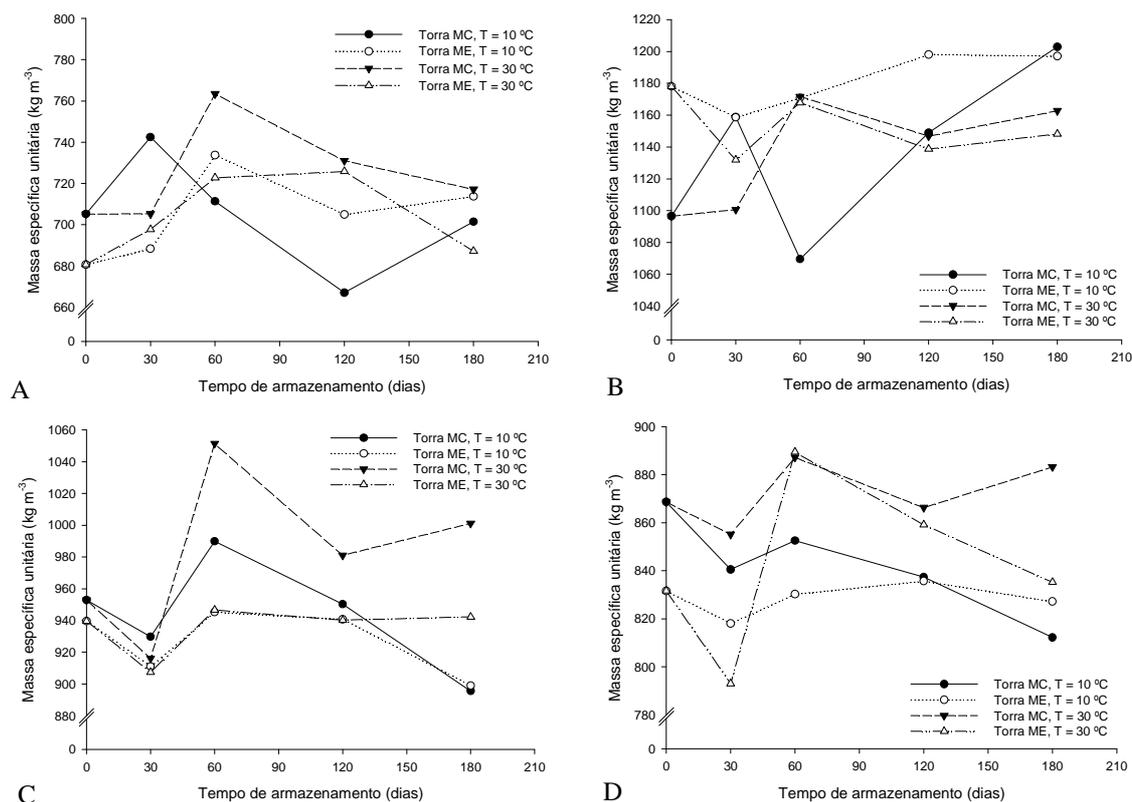


Figura 2.7. Valores médios observados de massa específica unitária de café arábica torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

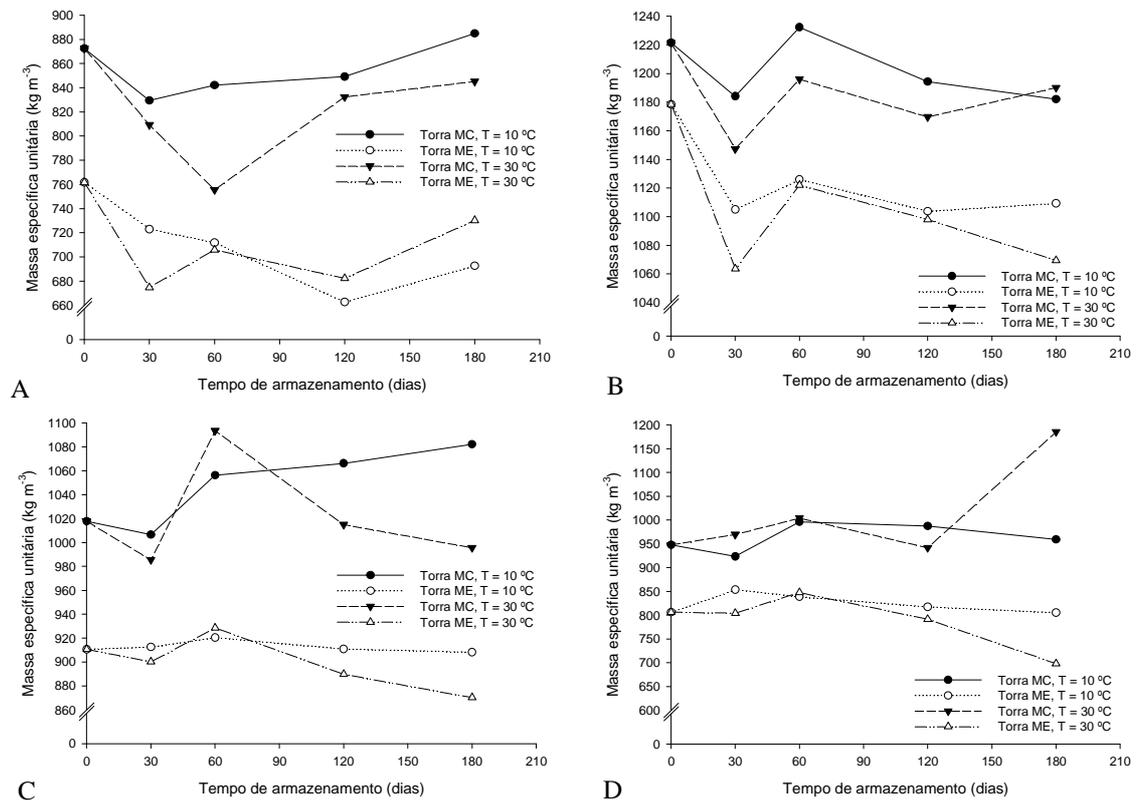


Figura 2.8. Valores médios observados de massa específica unitária de café conilon torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

Nota-se nas Figuras 2.7 e 2.8 que o incremento no grau de moagem, que resulta em menores tamanhos de partículas, leva a maiores valores de ρ_u . Este resultado é devido a que, em um dado volume constante, os cafés com moagem mais fina se aglomeram mais intensamente, resultando numa massa maior para aquele volume, ao passo que partículas maiores há uma menor aglomeração, culminando em menor massa e, conseqüentemente, menores valores de ρ_u . Singh *et al.* (1997) relataram este fato ao longo do processo de torrefação de café.

Avaliando-se as Figuras 2.7 e 2.8, nota-se que, em termos gerais, o nível de torrefação média clara apresentou os maiores valores de ρ_u , independentemente da espécie de café. Este fato é explicado pela variação de massa durante a torrefação: nível de torra mais brando leva a uma menor perda de massa, obtendo-se assim maiores valores de ρ_u . Singh *et al.* (1997), trabalhando com café mexicano e colombiano, também concluíram que níveis de torrefação maiores acarretam em decréscimo nos valores de ρ_u . Vargas-Elías (2011) reportou a diminuição de ρ_u em café com nível de torra mais acentuado devido à maior perda de massa do produto.

Outro fato a ser considerado com relação ao nível de torrefação está no nível celular. Segundo Licciardi *et al.* (2005), os triglicerídeos (óleos) do grão do café são pouco afetados pela torrefação, sofrendo apenas pequena hidrólise e decomposição, com liberação de ácidos graxos e formação de produtos voláteis. No entanto, nas torrações mais escuras, muitas células sofrem rompimento e o óleo pode migrar para a superfície do produto (FRANÇA *et al.*, 2001), ocorrendo assim, maior perda de massa, resultando na diminuição dos valores de massa específica. Variações no comportamento da massa específica em função do teor de gordura do leite em pó também foram observados por Fitzpatrick *et al.* (2004).

A armazenagem de café torrado a 10 °C foi a que, em termos gerais, levou à menor variação de ρ_u em relação aos seus valores iniciais (pós-torrefação). Associado a pequenas alterações em sua massa devido à absorção de água, os resultados de ρ_u sofreram pequenas variações ao longo do armazenamento. Já para as amostras armazenadas a 30 °C ocorreu intensa variação em ρ_u . Este fato é devido à maior aglomeração do produto devido à temperatura de estocagem, afetando assim ρ_u .

Ao longo do armazenamento ocorreu a variação dos valores de ρ_u das amostras de café torrado, com tendência geral de diminuição com relação ao início das análises (Figuras 2.7 e 2.8). Uma vez que a massa específica unitária é um parâmetro que depende do teor de água do produto, este índice diminui com o aumento do teor de água (RESENDE *et al.*, 2008; RODRIGUES, 2009). Esse comportamento foi observado neste trabalho, em que a partir dos 60 dias de armazenamento observou-se um decréscimo mais acentuado de ρ_u , ocorrência esta que acompanha o ganho de teor de água discutido anteriormente.

Os fatores nível de torrefação, temperatura de armazenamento, tempo de armazenamento e granulometria também influenciaram significativamente os valores de massa específica aparente de café torrado, independentemente da espécie avaliada. As Figuras 2.9 e 2.10 demonstram o comportamento dessa propriedade física ao longo do armazenamento de café arábica e conilon, respectivamente, por seis meses.

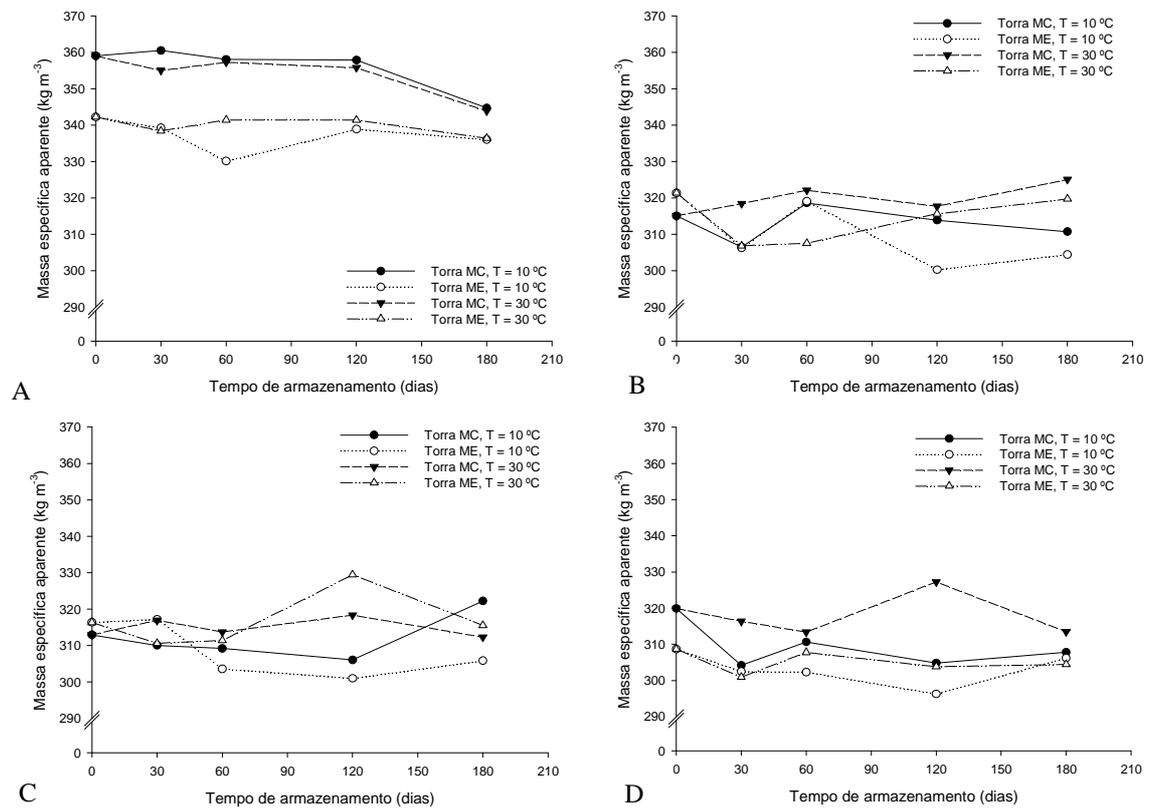


Figura 2.9. Valores médios observados de massa específica aparente de café arábica torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

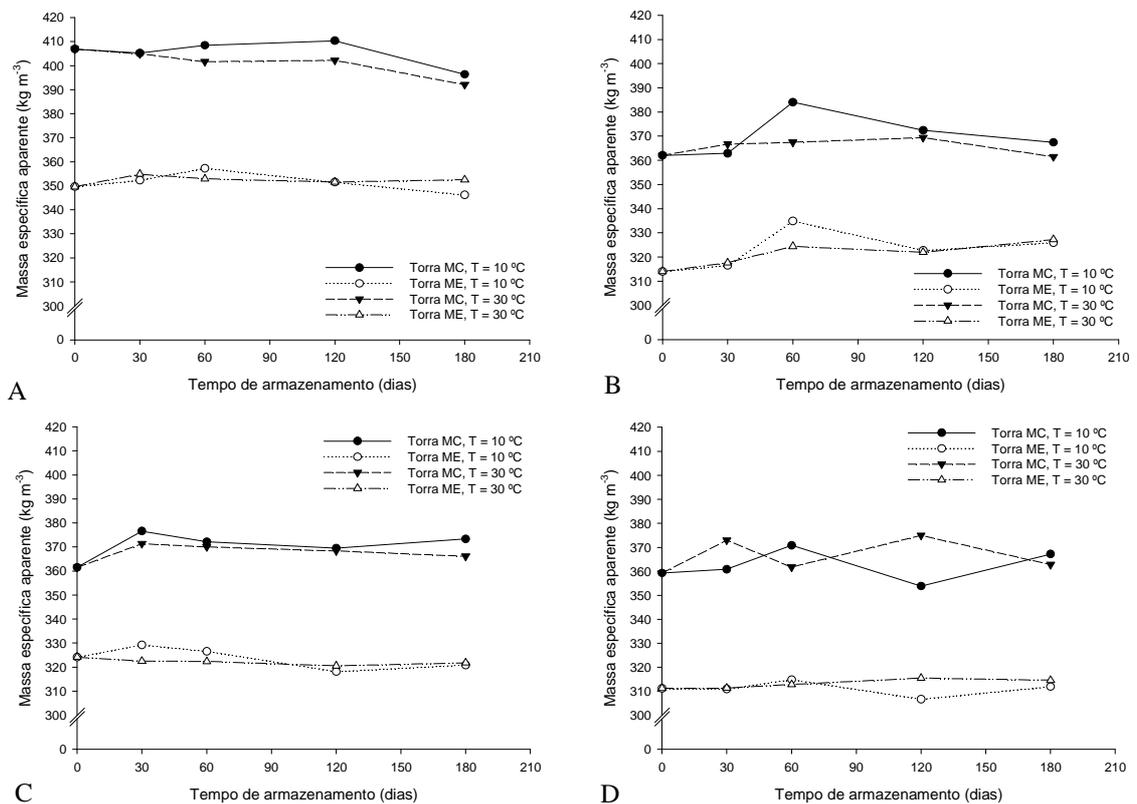


Figura 2.10. Valores médios observados de massa específica aparente de café conilon torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

Os valores de massa específica aparente foram influenciados pela interação entre o nível de torrefação e a granulometria, variando entre 300 e 410 kg m⁻³. Estes valores estão na faixa de 300 a 450 kg m⁻³ reportada por Illy e Viani (1995) para café torrado.

Nas diferentes granulometrias estudadas, nota-se que os grãos de café inteiros obtiveram maiores valores de ρ_{ap} . Esta ocorrência está diretamente relacionada ao conteúdo de componentes voláteis que por sua vez está relacionada à massa total do produto. Grãos inteiros liberam CO₂ lentamente, sendo necessários cerca de 30 dias para sua total liberação, resultando em maiores valores de massa, ao passo que 70 % de CO₂ são imediatamente liberados após a moagem (ILLY & VIANI, 1995).

Para os cafés torrados e moídos, percebe-se, em termos gerais, que ρ_{ap} decresce com o aumento do tamanho da partícula. Yan e Barbosa-Canovas (1997), estudando a compressibilidade de alimentos pulverulentos, relataram esta mesma relação entre a granulometria e ρ_{ap} . Estes autores explicam que o aumento do tamanho das partículas leva à diminuição do volume ocupado pelo produto; em outras palavras, há maior

quantidade de poros, ou seja, menor massa de produto em dado volume constante, resultando em menores valores de ρ_{ap} .

Assim como observado anteriormente para ρ_u , a torrefação média clara incorreu em maiores valores de ρ_{ap} devido à menor perda de massa em razão do menor tempo de torrefação. Diferentes trabalhos com café relataram esta tendência (ILLY & VIANI, 1995; SINGH *et al.*, 1997; PITTIA; DALLA ROSA; LERICI, 2001; MWITHIGA & JINDAL, 2003; MENDONÇA; FRANCA; OLIVEIRA, 2009; VARGAS-ELÍAS, 2011). Além disso, a torrefação moderadamente escura acarreta em maior perda de massa e no incremento de volume do café, levando assim a menores magnitudes de ρ_{ap} . A alteração no volume está relacionada com o aumento da pressão interna das estruturas das células que ocorre durante a transferência de calor e nas reações do processo de pirólise, no qual são mais intensas em torrefação prolongada (Borges *et al.*, 2004).

Considerando as Figuras 2.9 e 2.10, percebe-se que a temperatura de armazenagem de 30 °C ocasiona a diminuição de ρ_{ap} ao longo do armazenamento, ao passo que o café armazenado a 10 °C apresenta um decréscimo menos acentuado. Temperaturas de armazenamento adequadas possibilitam a manutenção e/ou menor perda dos constituintes de produtos agrícolas, chegando-se assim à melhor conservação do produto ao longo da vida de prateleira do mesmo, corroborando assim com os resultados aqui apresentados. Esta disposição é visualizada com mais facilidade nas amostras de café torradas ao nível média clara (MC), sendo um possível indicativo de que, possivelmente, o nível de torrefação é mais significativo aos resultados das propriedades físicas que a temperatura de armazenamento.

A interação entre o nível de torrefação e a granulometria do café foi significativa para os resultados de porosidade. Os resultados das amostras armazenadas a 30 °C não serão apresentadas, uma vez que não houve diferenças significativas entre as duas temperaturas de armazenamento, independentemente da espécie de café avaliada. A Figura 2.11 retrata a variação dos valores de porosidade ao longo do armazenamento a 10 °C.

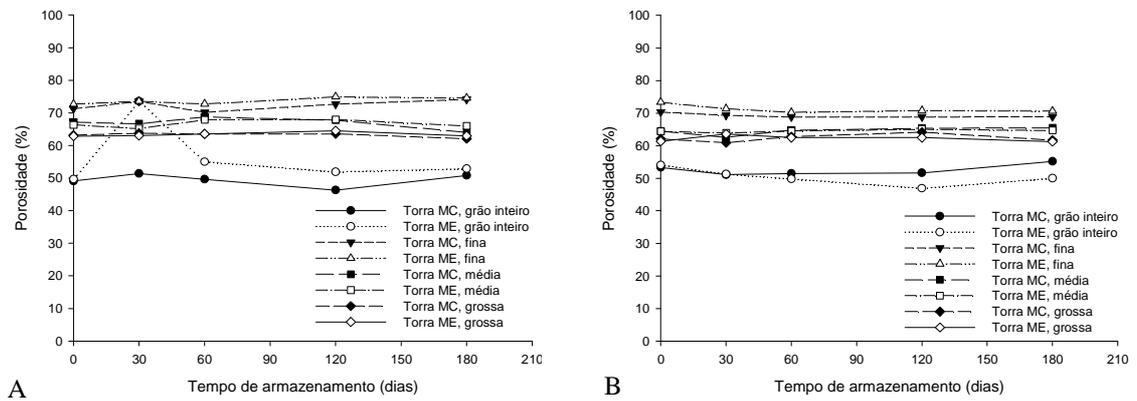


Figura 2.11. Valores médios observados de porosidade de café arábica (A) torrado e café conilon (B) torrado, ao longo do armazenamento a 10 °C.

Analisando-se a Figura 2.11, pode-se afirmar que a porosidade variou de acordo com o grau de moagem, sendo o café torrado e moído fino o que obteve os maiores valores de porosidade. Com o aumento do tamanho das partículas, a porosidade das amostras diminuiu até atingir os menores valores para os grãos de café inteiro e torrado.

O comportamento observado é devido à aglomeração do produto. Schubert (1987) relata que a porosidade aumenta com o decréscimo do tamanho das partículas devido à adesão entre as partículas permitir uma estrutura desprendida da massa. Pegg e Shahidi (2007) verificaram que produtos com menor granulometria tendem a se aglomerar, formando agregados maiores que o próprio grão, resultando assim em maior porosidade, concordando com os resultados apresentados neste trabalho.

2.3.4 Cor

2.3.4.1 Evolução da coordenada L^*

Nas Tabelas 2.3 e 2.4 estão as médias da coordenada L^* de café torrado (*Coffea arabica* e *Coffea canephora*) nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento em duas temperaturas distintas.

Tabela 2.3. Valores médios da coordenada colorimétrica L* dos grãos de café arábica, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	17,40 Ab	17,17 Ab	17,53 Ab	13,56 Aa	16,94 ABb	17,65 Ab	18,46 Ac	12,77 Aa
30	10	16,56 Ba	16,36 Ba	16,82 Ba	17,04 Ba	16,59 AEa	16,50 Ba	16,47 Ba	15,66 Bb
	30	16,78 BCa	16,33 Ba	16,95 Ba	16,75 Ba	16,32 Eac	16,47 Bac	16,10 Bc	15,39 BCb
60	10	16,93 Bac	16,90 ACa	16,92 Ba	17,53 Ba	17,34 Bc	16,62 Bac	16,36 Ba	15,57 Bb
	30	16,48 Ca	16,73 Ca	16,81 Ba	16,86 Ba	16,50 AEa	16,52 Ba	16,10 Ba	15,28 CDb
120	10	15,77 Da	16,14 Ba	16,52 Ba	16,62 Ba	15,50 Cb	15,97 Cb	15,93 Bb	15,34 Bb
	30	15,78 Dc	16,15 Bc	16,33 Dc	17,34 Ba	15,83 Fc	15,96 Cc	15,86 Bc	15,04 Bb
180	10	19,74 Eb	20,08 Cb	19,99 Cb	22,04 Ca	18,29 Dd	18,37 Dd	18,76 Ad	16,81 BEc
	30	19,46 Ec	18,94 Dc	19,61 Ec	21,44 Ca	18,65 Gc	18,71 Ec	19,02 Ac	17,49 DEb

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

Tabela 2.4. Valores médios da coordenada colorimétrica L* dos grãos de café conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	22,35 Ab	20,40 Ac	20,09 Ac	18,32 Aa	18,37 Aef	18,78 Ae	17,77 Af	13,17 Ad
30	10	22,73 Ab	21,65 Bc	20,66 ABd	19,07 Aa	17,83 ADf	17,05 BCg	16,32 Bh	15,44 BCe
	30	22,29 Ab	20,97 AEc	20,51 Ac	19,31 Aa	17,59 De	16,58 BEf	16,36 Bf	15,22 BEd
60	10	23,99 Bb	21,27 Bc	21,71 Bc	19,85 Aa	18,04 Ae	17,31 Be	16,33 Bd	15,82 Bd
	30	22,19 Ab	21,13 BEc	20,26 Ac	19,08 Aa	17,57 De	16,56 Ef	16,41 Bf	14,86 Ed
120	10	22,24 Ab	21,53 Bc	20,21 Ad	19,47 Aa	17,15 BEf	16,42 Ceg	15,69 Ch	14,39 Ace
	30	22,64 Ab	20,41 Ac	21,92 Db	18,98 Aa	16,84 Ee	16,29 Ee	15,96 BCe	14,13 ABEd
180	10	27,39 Cb	26,57 Cc	25,89 Cc	24,51 Ba	21,43 Ce	19,96 Df	19,69 Df	17,97 Dd
	30	26,40 Db	25,16 Dc	24,58 Ec	23,35 Ba	20,14 Fe	19,06 Af	19,12 Ef	17,81 Dd

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

Analisando-se as Tabelas 2.3 e 2.4, percebe-se que ocorrem diferenças significativas nas coordenadas de cor entre as temperaturas de armazenamento em diferentes tempos de armazenagem, com maior incidência nas amostras ME. As amostras de café MC apresentam, de modo geral, valores estatisticamente iguais de coordenada L*, independentemente da granulometria e do tempo de armazenagem. Dessa forma, pode-se concluir que o nível de torrefação possui maior importância para a coloração do café que a temperatura de armazenagem.

Nos diferentes tempos de armazenagem, ocorre comportamento aleatório da coordenada L* devido à granulometria do café. Em grande parte dos dados, o café inteiro, independentemente da espécie e nível de torrefação, foi estatisticamente diferente que os cafés torrados e moídos. Entre o nível de moagem (fina, média e grossa), há casos em que as amostras são estatisticamente iguais, porém com tendência de, ao passar do tempo de armazenagem, as amostras de moagem fina se diferenciar significativamente das restantes. Dessa forma, pode-se concluir que, em termos gerais, os cafés torrados e moídos ao nível médio e grosso são similares em termos de coloração.

De modo a facilitar a análise da coordenada L* de café torrado e moído ao longo do armazenagem, as Figura 2.12 e 2.13 foram elaboradas.

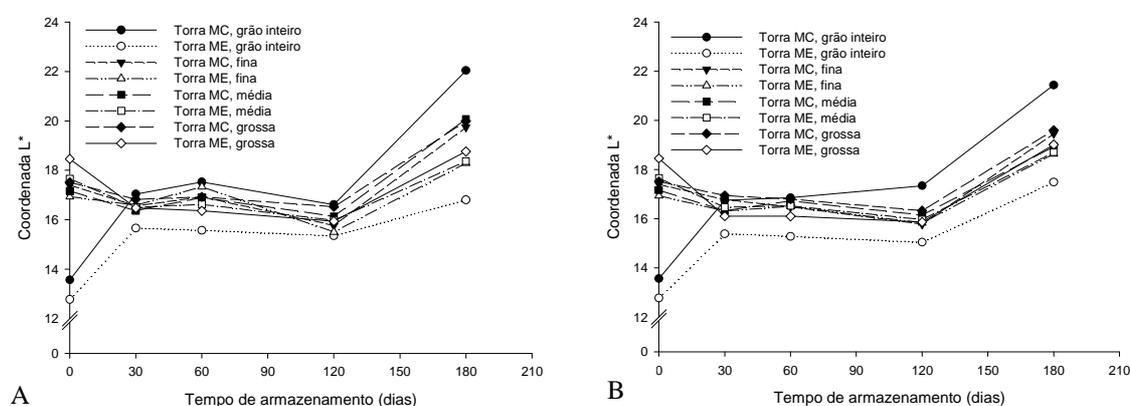


Figura 2.12. Valores médios observados da coordenada L* de café arábica torrado, nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenagem a 10 °C (A) e 30 °C (B).

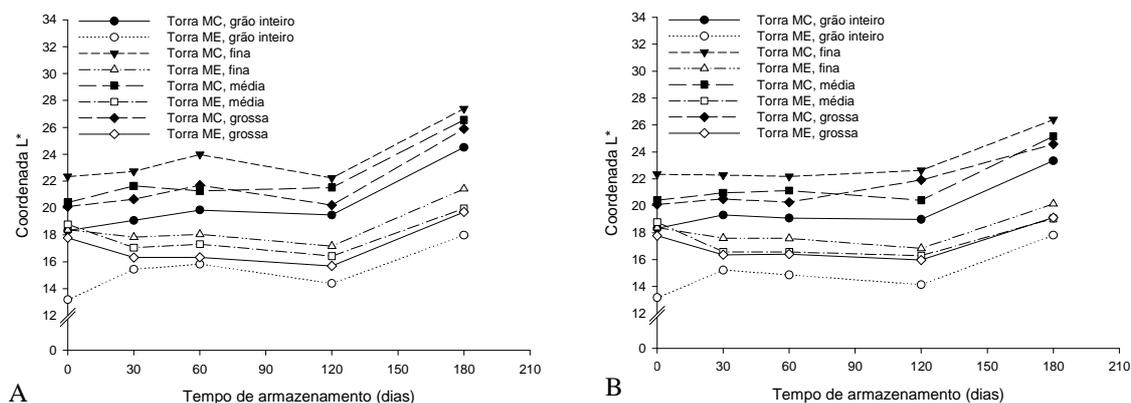


Figura 2.13. Valores médios observados da coordenada L^* de café conilon torrado, nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento a 10 °C (A) e 30 °C (B).

A luminosidade relaciona-se ao grau de escurecimento do produto, variando de 0 a 100. Menores valores desta coordenada indicam um maior escurecimento do produto. O escurecimento é percebido pelos menores valores da coordenada L^* para as amostras de café torrada ME, ao passo que as amostras de café torradas MC obtiveram maiores valores (Figuras 2.12 e 2.13), fato este esperado. Essa interação antagônica entre nível de torrefação e coordenada L^* também foi reportada por Bicho *et al.* (2012).

Tendo em vista as referidas Figuras, nota-se que nos primeiros 120 dias há uma tendência de manutenção dos valores desta coordenada colorimétrica, chegando a um aumento nos valores da coordenada L^* a partir dos 120 dias de armazenamento. Este comportamento pode ser relacionado ao maior teor de água do café ao final do armazenamento, conforme concluído por Nogueira (2009).

2.3.4.2 Evolução da coordenada a^*

Nas Tabelas 2.5 e 2.6 estão as médias da coordenada a^* de café torrado (*Coffea arabica* e *Coffea canephora*) nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento em duas temperaturas distintas.

Tabela 2.5. Valores médios da coordenada colorimétrica a* dos grãos de café arábica, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	6,58 Ab	5,99 ACc	5,67 Ac	5,30 Aa	6,18 Ac	5,87 Ac	5,89 Ac	4,99 Aa
30	10	6,31 Bb	5,97 Ac	5,75 ABc	4,75 ACa	6,40 ABb	5,94 Ac	5,65 ABc	4,22 ABd
	30	6,64 Ab	6,00 Ac	5,66 Ad	4,54 Ca	6,29 Af	5,81 Dg	5,41 Dh	4,24 Ae
60	10	6,65 Ab	6,24 Bc	5,88 Bd	5,02 Aa	6,59 Bb	6,13 Bcf	5,84 ABdf	4,22 Be
	30	6,92 Db	6,34 BEc	6,17 Dd	4,92 ACa	6,66 Bf	6,07 Bg	5,88 Ah	4,29 Be
120	10	6,58 Ab	6,17 BCc	5,82 ABd	4,83 Aa	6,43 ABf	5,95 ABg	5,59 Bh	4,16 ABe
	30	6,71 Ab	6,35 Ec	6,25 Dc	5,19 Aa	6,58 Bb	5,93 ABDe	5,55 BDf	4,25 Bd
180	10	10,46 Cb	9,44 Dc	9,06 Cd	7,96 Ba	10,73 Cb	9,65 Cc	8,85 Cd	7,68 Ca
	30	10,48 Cb	9,68 Fc	9,61 Ec	7,95 Ba	10,24 Db	9,40 Ec	8,80 Ce	6,53 Dd

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

Tabela 2.6. Valores médios da coordenada colorimétrica a* dos grãos de café conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	7,88 Ab	7,12 Ac	6,51 Ad	6,03 Aa	6,05 Af	5,98 Af	5,44 ACg	4,99 Ae
30	10	8,01 ABb	7,56 ABc	6,89 ABd	5,41 Ba	6,55 Af	5,76 Ag	5,14 Bh	4,15 Be
	30	7,98 ABb	7,15 ABc	6,60 ABd	5,23 Ba	6,28 Af	5,57 Bg	4,94 Eh	4,08 Be
60	10	8,09 ABb	7,33 ABc	7,24 Bc	5,47 Ba	6,65 Ae	5,83 Af	5,57 Af	4,10 Bd
	30	8,21 Bb	7,40 Bc	7,03 Bd	5,43 Ba	6,66 Af	5,79 Ag	5,42 Ah	3,98 Be
120	10	8,16 Bb	7,46 Bc	7,20 Bd	5,68 ABa	6,65 Af	5,81 Ag	5,28 BCh	4,02 Be
	30	8,54 Cb	7,33 Cc	7,45 Bc	5,47 Ba	6,57 Ae	5,80 Af	5,48 Af	3,98 Bd
180	10	11,65 Db	10,75 Dc	10,27 Cd	8,32 Ca	9,96 Bf	8,90 Cg	8,04 Dh	6,29 Ce
	30	11,75 Db	10,74 Dc	10,24 Cd	8,24 Ca	10,16 Bf	9,06 Cg	8,39 Fh	6,72 De

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

Pelas Tabelas 2.5 e 2.6, percebe-se que há diferenças significativas entre as temperaturas de armazenamento em 19 combinações de granulometria, nível de torra e tempos de armazenagem de um total de 72 combinações. Estas 19 combinações ocorrem de forma aleatória, sem tendência clara relativa aos fatores citados. Dessa forma, pode-se concluir que a temperatura de armazenamento influencia a coloração do café torrado, porém em menor importância tendo em vista os fatores restantes (torrefação e granulometria).

Nos diferentes tempos de armazenamento, o café torrado e inteiro, independentemente da espécie e nível de torrefação, foi estatisticamente diferente dos cafés torrados e moídos. Já em boa parte das amostras de cafés torrados e moídos, para os níveis de moagem média e grossa, estas são estatisticamente iguais. Dessa forma, tal como concluído para a coordenada L^* , os cafés torrados e moídos ao nível médio e grosso, de modo geral, são similares em termos de coloração.

Evidenciam-se pelas tabelas anteriores que os grãos de café torrados e inteiros apresentam menores valores da coordenada a^* que os cafés torrados e moídos, ao passo que, ao aumentar o tamanho das partículas (ou diminuir o nível de moagem), ocorre um decréscimo dos valores da coordenada a^* . Tendo em vista o sólido de cores do sistema CIE $L^*a^*b^*$, observa-se que valores de coordenada a^* próximos a zero apresentam coloração escura. Assim, é esperado que os grãos inteiros apresentassem menores valores que os grãos moídos. Após a moagem, a parte interna do produto que não foi torrada ao mesmo nível ou intensidade que a parte externa, apresenta coloração menos intensa, resultando num café moído de mistura mais clara que o grão inteiro. Da mesma forma explica-se a tendência observada devido ao grau de moagem. Amostras com tamanhos maiores de partículas (moagem grossa) tem em sua mistura menor quantidade de partículas com coloração mais clara (partes internas do grão), resultando, levemente, em coloração mais escura que as amostras de moagem fina e média.

De modo a facilitar a análise da coordenada a^* de café torrado e moído ao longo do armazenamento, as Figura 2.14 e 2.15 foram elaboradas.

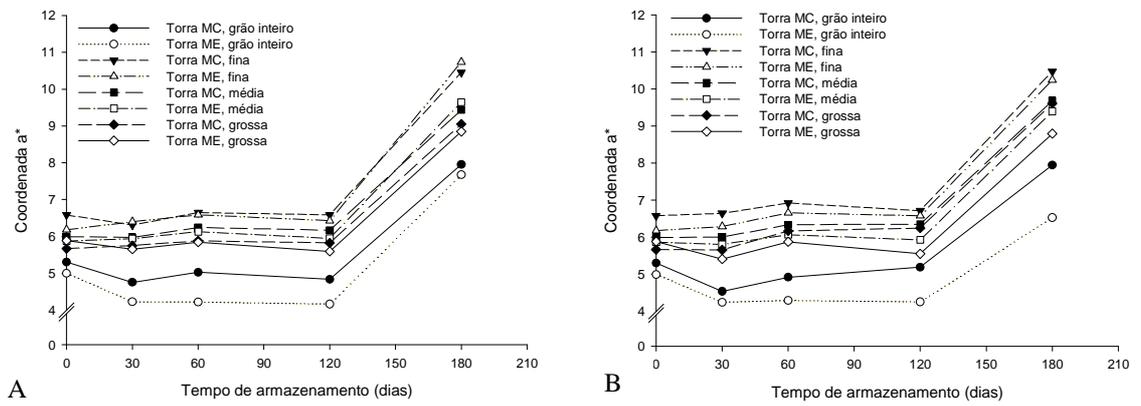


Figura 2.14. Valores médios observados da coordenada a^* de café arábica torrado, nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento a 10 °C (A) e 30 °C (B).

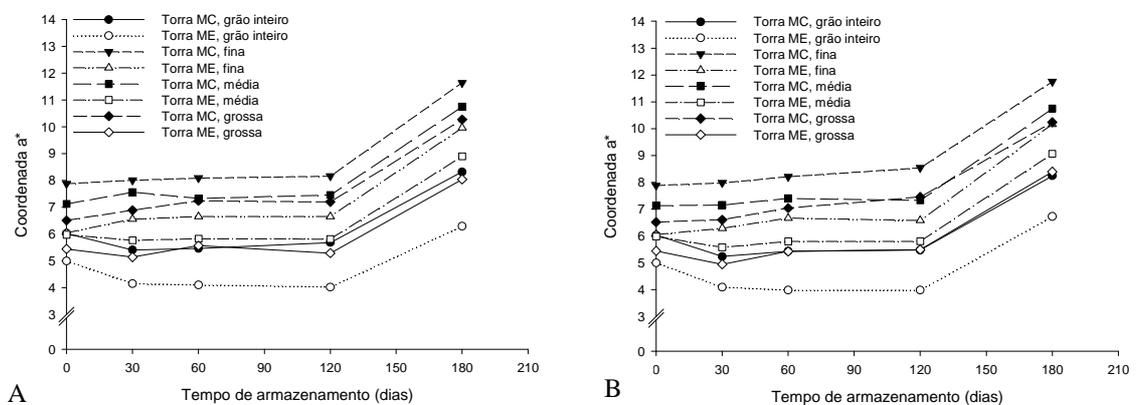


Figura 2.15. Valores médios observados da coordenada a^* de café conilon torrado, nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento a 10 °C (A) e 30 °C (B).

Para as duas torrefações utilizadas, percebe-se que há tendência dos valores da coordenada a^* da torra MC serem superiores aos da torra ME (Figuras 2.14 e 2.15). Bicho *et al.* (2012) também reportaram esta tendência da coordenada a^* de *C. arabica* e *C. canephora* processado em três níveis de torra diferentes, inteiros e moídos. Pittia; Nicoli; Sacchetti (2007) e Monteiro *et al.* (2002) relataram este comportamento para as coordenadas L^* , a^* e b^* de café em distintos níveis de torrefação, indicando o escurecimento do produto. Este comportamento é esperado, uma vez que maiores valores da coordenada a^* relatam coloração mais clara.

Tal como observado para a coordenada L^* , há linearidade até os 120 dias de armazenamento, ocorrendo um incremento importante da coordenada a^* após este período de tempo. Este aumento pode ser um indicador da perda de qualidade do café torrado, inteiro e moído.

2.3.4.3 Evolução da coordenada b^*

Nas Tabelas 2.7 e 2.8 estão as médias da coordenada b^* de café torrado (*Coffea arabica* e *Coffea canephora*) nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento em duas temperaturas distintas.

Tabela 2.7. Valores médios da coordenada colorimétrica b* dos grãos de café arábica, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	4,34 Abd	4,33 Abd	4,26 Ab	2,93 ABa	4,27 Ad	4,55 Ade	5,08 Ae	2,23 ABc
30	10	3,62 Bb	3,29 Bb	3,37 Bbd	2,53 Aa	3,86 Ab	3,47 Bbd	3,27 Bd	1,58 Ac
	30	4,15 Ab	3,57 Ec	3,50 Bc	2,28 Aa	3,87 Ae	3,44 Bf	3,07 Bf	1,51 Ad
60	10	3,97 Cb	3,78 Cb	3,51 BCbd	2,87 Aa	4,27 Ab	3,73 BCbd	3,49 Bd	1,53 Ac
	30	4,15 ACb	4,00 Fbc	3,99 Ac	2,81 ABa	4,15 Ae	3,75 Cef	3,49 Bf	2,12 BCd
120	10	4,11 ACb	3,91 CFb	3,75 Cb	2,90 Aa	3,95 Ad	3,72 Bd	3,54 Bd	1,92 Ac
	30	4,20 Abd	3,92 Fabe	4,04 Ab	3,48 Ba	4,16 Ad	3,69 BCde	3,35 Be	1,85 ACc
180	10	8,30 Db	7,46 Dc	6,87 Dae	6,83 Ca	8,86 Bb	7,34 Dc	6,35 Ce	4,34 Dd
	30	8,59 Eb	7,31 Dach	7,68 Ec	6,97 Ca	8,09 Cbe	7,23 Dfh	6,67 Cg	3,17 Bd

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

Tabela 2.8. Valores médios da coordenada colorimétrica b* dos grãos de café conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	7,88 ABb	6,60 Ac	5,97 Ad	5,10 Aa	4,41 Af	5,33 Ag	4,43 Af	2,32 ABe
30	10	7,59 Ab	7,05 ABc	6,06 ABd	3,94 Ba	4,62 Af	3,66 Bg	2,79 Bh	1,52 Ce
	30	7,74 Ab	6,72 Ac	5,86 Ad	3,85 Ba	4,46 Af	3,54 Bg	2,89 Bh	1,31 Ce
60	10	8,58 Cb	6,63 Ac	6,83 BCc	4,32 Ba	4,82 Ae	3,83 Bf	3,38 Cf	1,53 Cd
	30	7,91 Ab	7,00 Ac	6,23 Ad	4,12 Ba	4,76 Af	3,67 Bg	3,35 Ch	1,36 Ce
120	10	8,34 BCb	7,47 Bc	6,66 ACd	4,84 Ba	5,04 Af	3,93 Bg	3,17 BCh	1,66 ACe
	30	8,64 Cb	6,63 Ac	7,42 Dd	4,48 ABa	4,82 Af	3,83 Bg	3,44 Cg	1,53 Ce
180	10	16,16 Db	14,04 Cc	12,69 Ed	8,76 Ca	9,38 Bf	7,23 Cg	5,87 Dh	2,60 Be
	30	15,76 Eb	13,24 Dc	12,07 Fd	8,58 Ca	9,38 Bf	7,18 Cg	6,34 Eh	3,40 De

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

Pelos dados apresentados, é possível verificar diferenças significativas entre as duas temperaturas de armazenamento (10 e 30 °C), especialmente nas amostras torradas ao nível média clara (MC) e após 120 dias de armazenamento. As amostras armazenadas a 30 °C apresentaram, em geral, menores valores da coordenada b* frente às amostras armazenadas a 10 °C (Tabelas 2.7 e 2.8).

Nos cinco tempos de armazenamento avaliados (0, 30, 60, 120 e 180), o café torrado e inteiro, independentemente da espécie e nível de torrefação, foi estatisticamente diferente dos cafés torrados e moídos, tal como observado para a coordenada a*. Ainda, pelas Tabelas 2.7 e 2.8, assim como ocorreu para as demais coordenadas colorimétricas, os grãos de café torrados e inteiros apresentam menores valores que os cafés torrados e moídos. Assim, o aumento do tamanho das partículas (ou redução do nível de moagem), ocorre um decréscimo dos valores da coordenada b*.

As Figuras 2.16 e 2.17 relatam as alterações da coordenada b* ao longo do armazenamento, respectivamente para *Coffea arabica* e *Coffea conephora*.

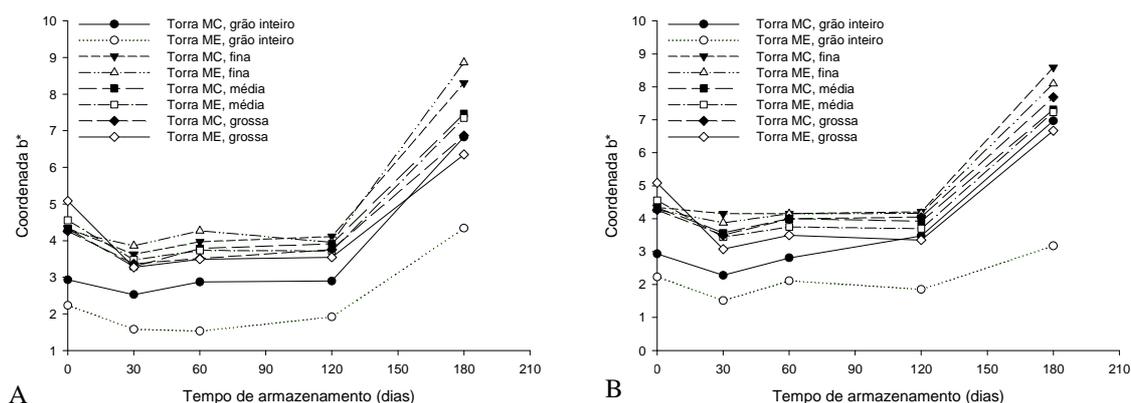


Figura 2.16. Valores médios observados da coordenada b* de café arábica torrado, nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento a 10 °C (A) e 30 °C (B).

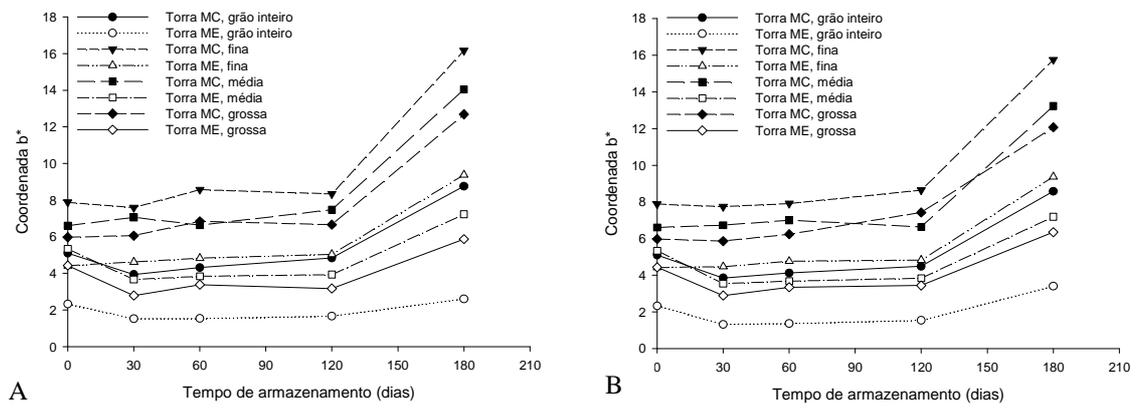


Figura 2.17. Valores médios observados da coordenada b^* de café conilon torrado, nos diferentes níveis granulométricos, ao longo do armazenamento a 10 °C (A) e 30 °C (B).

Seguindo o comportamento das coordenadas colorimétricas apresentado, verifica-se a tendência dos valores das amostras torradas MC superarem aos das amostras torradas ME (Figuras 2.16 e 2.17). Observa-se também a linearidade dos valores das coordenadas até os 120 dias de armazenamento.

De modo a perceber com maior clareza a evolução da coloração do café torrado, inteiro e moído, os índices colorimétricos ângulo hue e croma foram calculados e apresentados a seguir.

2.3.4.4 Índices colorimétricos ângulo hue e croma

Uma vez que o comportamento das amostras de café, independentemente da espécie, do nível de torrefação e da temperatura de armazenagem, é similar ao longo do armazenamento, buscou-se uma Figura que represente as diferenças devido ao tempo de armazenamento e à granulometria. Assim, a Figura 2.18 relata a diferença de coloração, utilizando-se os índices colorimétricos ângulo hue e croma, para o café arábica torrado MC e armazenado a 30 °C.

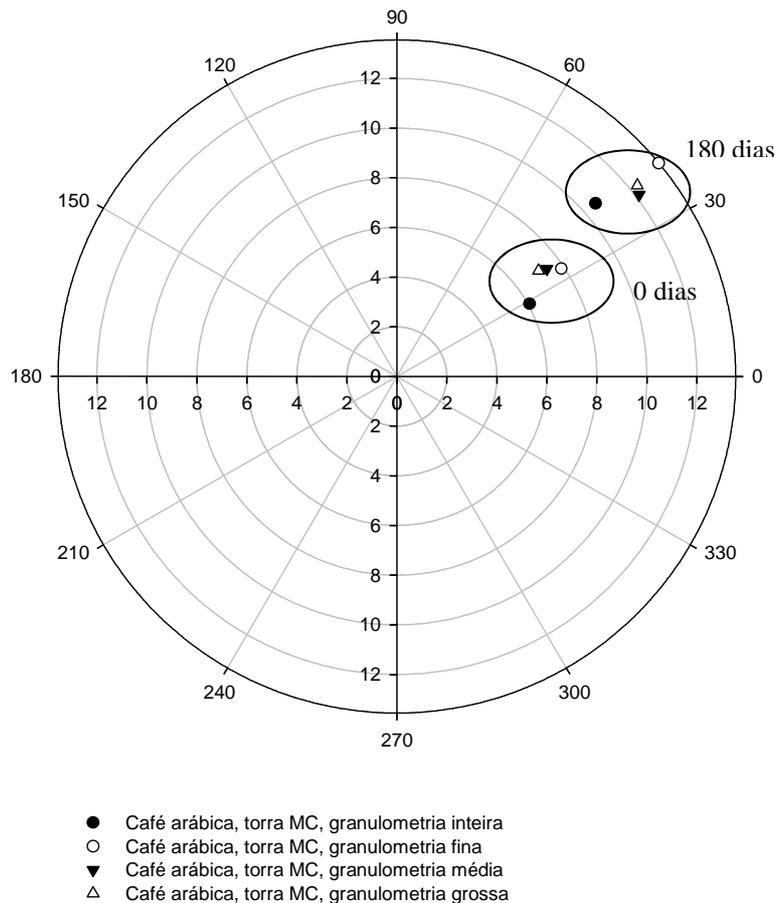


Figura 2.18. Localização das cores dos grãos de café arábica torrados ao nível média clara, inteiros e moídos, armazenados a 30 °C, no espaço cromático de Hunter, utilizando os índices colorimétricos croma e ângulo hue.

Pela Figura 2.18, é possível visualizar que os grãos de café torrados e inteiros se diferenciam das amostras moídas (menores valores), tal como concluído nas análises das coordenadas colorimétricas L^* , a^* e b^* . Além disso, em ambos os tempos de armazenamento, a coloração dessas amostras é mais escura. Esta diferença é devido à parte interna do grão inteiro não ter sido torrada ao mesmo nível ou intensidade que a parte externa do grão. Amostras moídas apresentam coloração menos intensa em razão da parte interna do café (intensidade de cor menor) ter sido exposta e posteriormente misturada com a parte externa do café, resultando em um café moído de mistura mais clara.

Analisando-se a Figura 2.18, nota-se que as amostras moídas são próximas em termos de coloração, sendo que a granulometria fina se diferencia das demais principalmente com o passar do tempo de armazenamento. Este resultado corrobora

com as conclusões tecidas anteriormente, em que as amostras de granulometria média e grossa se assemelham em termos colorimétricos. Ademais, após 180 dias de armazenamento, observa-se que a coloração das amostras de café torna-se menos escura, indício de perda da qualidade do produto em razão da perda de intensidade de cor.

2.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições em que foi realizado o experimento, conclui-se que:

1. A granulometria afetou significativamente a adsorção de café, independentemente da espécie e nível de torrefação;
2. Quanto maior o grau de torra, menores são os valores de teor de água das amostras de café;
3. O teor de água das amostras de café torrado, inteiro e moído, aumentou ao longo do armazenamento do produto, independentemente da temperatura de armazenagem;
4. Com o aumento da granulometria e em um menor nível de torrefação das amostras de café, há um decréscimo dos valores de ângulo de repouso de café torrado, inteiro e moído;
5. As propriedades massa específica unitária, massa específica aparente e porosidade do café aumentam seus valores com o incremento do grau de moagem de café, com um menor nível de torrefação e com menor tempo de armazenamento;
6. A coloração das amostras de café moídas ao nível média e grossa são estatisticamente iguais;
7. A partir dos 120 dias de armazenamento, ocorreu perda de coloração do café, visualizada pelas coordenadas L^* , a^* e b^* , bem como pelos índices colorimétricos ângulo hue e croma.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGGENSTOSS, J.; POISSON, L.; KAEGI, R.; PERREN, R.; ESCHER, F. Roasting and aroma formation: effect of initial moisture content and steam treatment. **Journal of agricultural and food chemistry**, Washington, v. 56, n. 14, p. 5847-5851, 2008.

BAPTESTINI, F. M. **Efeito da granulometria e da embalagem na sorção de água pelo café torrado e moído**. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.

BICHO, N. C.; LEITÃO, A. E.; RAMALHO, J. C.; LIDON, F. C. Use of colour parameters for roasted coffee assessment. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 436-442, 2012.

BORGES, M. L. A.; MENDONÇA, J. C. F.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; CORRÊA, P. C. Efeito da torração em parâmetros físicos de cafés de diferentes qualidades. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 8, p. 6-13, 2004.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.

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.

FERNANDES, S. M.; PEREIRA, R. G. F. 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, v. Especial Café, n. 9, p. 12-18, 2006.

FITZPATRICK, J. J.; IQBAL, T.; DELANEY, C.; TWOMEY, T.; KEOGH, M. K. Effect of powder properties and storage conditions on the flowability of milk powders with different fat contents. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 64, p. 435–444, 2004.

FITZPATRICK, J. J.; BARRY, K.; CERQUEIRA, P. S. M.; IQBAL, T.; O'NEILL, J.; ROOS, Y. H. Effect of composition and storage conditions on the flowability of dairy powders. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 17, n. 4, p. 328-392, 2007.

FRANÇA, A. S.; OLIVEIRA, L. S.; BORGES, M. L. A.; VITORINO, M. D. Evolução da composição do extrato aquoso de café durante o processo de torrefação. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 2, p. 37-47, 2001.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; VERLINDEN, A. Characterisation of dry powders. *Powder technology*, Filadélfia, v. 190, n. 1-2, p. 70-74, 2009.

ILLY, A.; VIANNI, R. **Espresso coffee: the chemistry of quality**. San Diego: Academic, 1995. 253 p.

IQBAL, T.; FITZPATRICK, J. J. Effect of storage conditions on the wall friction characteristics of three food powders. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 72, n. 3, p. 273-280, 2006.

KHEIRIPOUR LANGROUDI, M.; SUN, J.; SUNDARESAN, S.; TARDOS, G. I. Transmission of stresses in static and sheared granular beds: The influence of particle size, shearing rate, layer thickness and sensor size. **Powder technology**, Filadélfia, v. 203, n. 1, p. 23-32, 2010.

LICCIARDI, R.; PEREIRA, R. G. F. A.; MENDONÇA, L. M. V. L.; FURTADO, E. F. Avaliação físico-química de cafés torrados e moídos, de diferentes marcas comerciais, da região sul de minas gerais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 3, p. 425-429, 2005.

LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R. Efeito do tempo de armazenagem de rações avícolas no dimensionamento de silos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 518-527, 2009.

MEDEIROS, M. L.; LANNES, S. C. S. Propriedades físicas de substitutos de cacau. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. supl. 1, p. 243-253, 2010.

MELO, W. L. B. A importância da informação sobre do grau de torra do café e sua influência nas características organolépticas da bebida. **Comunicado Técnico n° 58**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, São Carlos (SP), 2004.

MENDONÇA, J. C. F.; FRANCA, A. S.; OLIVEIRA, L. S. Physical characterization of non-defective and defective Arabica and Robusta coffees before and after roasting. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 92, n. 4, p. 474-479, 2009.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. p. 918.

MONTEIRO, M. A. M.; MINIM, V. P. R.; CHAVES, J. B. P.; STRINGHETA, P. C.; SILVA, P. H. A. Efeito do tipo de torra sobre o teor de compostos fenólicos e a cor dos grãos de café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. Especial Café, n. 5, p. 55-59, 2002.

MWITHIGA, G.; JINDAL, V. K. Physical Changes During Coffee Roasting in Rotary Conduction-Type Heating Units. **Journal of Food Process Engineering**, Malden, v. 26, n. 6, p. 543-558, 2003.

NÓBREGA, M. V.; NASCIMENTO, J. W. B. Fluxo de ração avícola em silos prismáticos com tremonha excêntrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 413-419, 2005.

NOGUEIRA, B. L. **Características físicas, químicas e biológicas do café (*Coffea arabica* L.) natural e descascado**. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2009.

PEGG, R. B.; SHAHIDI, F. **Encapsulation, Stabilization, and Controlled Release of Food Ingredients and Bioactives**. In: RAHMAN, M.S. (ed.), Handbook of Food Preservation, 2^a edição, pp. 509-570. 2007.

PITTIA, P.; DALLA ROSA, M.; LERICI, C. R. Textural Changes of Coffee Beans as Affected by Roasting Conditions. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, n. 3, p. 168-175, 2001.

PITTIA, P.; NICOLI, M. C.; SACCHETTI, G. Effect of moisture and water activity on textural properties of raw and roasted coffee beans. **Journal of Texture Studies**, Malden, v. 38, n. 1, p. 116-134. 2007.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Propriedades físicas do feijão durante a secagem: determinação e modelagem. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 225-230, 2008.

RODRIGUES, A. P. L. **Avaliação dos constituintes voláteis do café submetido a diferentes tratamentos pós-colheita pela análise de suas características físicas, químicas e sensoriais**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2009.

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

SCHUBERT, H. Food particle technology. Part I: Properties of particles and particulate food systems. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 6, n. 1, p. 1-32, 1987.

SILVA, F. S. **Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike**. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2003.

SINGH, P. C.; SINGH, R. K.; BHAMIDIPATI, S.; SINGH, S. N.; BARONE, P. Thermophysical properties of fresh and roasted coffee powders. **Journal of Food Process Engineering**, Malden, v. 20, n. 1, p. 31-50, 1997.

TEUNOU, E.; FITZPATRICK, J. J. Effect of storage time and consolidation on food powder flowability. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 43, n. 2, p. 97-101, 2000.

VARGAS-ELÍAS, G. A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.

YAN, H.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. Compression characteristics of agglomerated food powders: effect of agglomerate size and water activity. **Food Science and Technology International**, California, v. 3, n. 5, p. 351–359, 1997.

CAPÍTULO 3

Efeito da granulometria e torrefação na sorção de água em café durante o armazenamento

3.1 INTRODUÇÃO

De modo a garantir a segurança alimentar da população, um país deve estar apto a armazenar sua produção agrícola por vários anos, resguardando-se com relação aos impactos de possíveis condições climáticas adversas ou situações de guerra que inviabilizem a produção agrícola necessária para a alimentação. Ainda, o armazenamento de produtos agrícolas possibilita a comercialização destes produtos em momentos oportunos, assegurando a lucratividade e a segurança social dos agentes atuantes nas cadeias produtivas.

O armazenamento deve ser realizado de forma adequada, assegurando a qualidade dos produtos e a vida de prateleira dos mesmos. Importantes parâmetros a serem considerados durante o armazenamento são a temperatura e a umidade relativa do ambiente que envolve o produto. Estes determinam a atividade de água (a_w) do produto que, por ser higroscópico, realiza troca de água com o ambiente. Por apresentar baixo teor de água, o café torrado e moído pode absorver água do ambiente, ocorrendo a aglomeração do mesmo, dificultando o manuseio e movimentação do produto, onerando estes processos e, por conseguinte, o produto final.

A possibilidade de aglomeração, indicada pelas condições de armazenamento, ainda é influenciada pela granulometria e pelo nível de torrefação, uma vez que estas interferem na capacidade higroscópica do produto (BROOKER; BAKKER-ARKEMA;

HALL, 1992). Portanto, o estudo de diferentes níveis granulométricos e de torrefação é necessário para a compreensão das interações entre o produto e o ambiente.

A moagem de café, cujo objetivo é o de aumentar a superfície específica de extração, permite a obtenção de pós com diferentes granulometrias. A granulometria exerce influência direta na sorção de água, uma vez que há o incremento da interface do café e o ambiente, facilitando a transferência de umidade. Baptistini (2011) observou que cafés com granulometrias menores obtiveram maiores valores de a_w ao fim de 120 dias de armazenamento. Ainda, segundo Andueza; De Peña; Cid (2003), a ruptura dos tecidos e células do café devido à moagem facilita a liberação de compostos voláteis que conferem o aroma à bebida. Dessa forma, a qualidade da bebida de café ficará depreciada com o passar do tempo de armazenamento devido a essa perda de compostos voláteis em se tratando de café moído.

Além da moagem, a torra dos grãos de café também afeta o grau de sorção de umidade, uma vez que este processo incide diretamente no teor de água final do produto. Assim, o café será mais higroscópico (torras escuras) ou menos higroscópico (torras claras) de acordo com seu nível de torrefação. Bicho *et al.* (2012) avaliaram três diferentes níveis de torrefação, concluindo que a torra realizada com maior temperatura e tempo resultou em amostras de café com menor teor de água. Schmidt; Miglioranza; Prudêncio (2008) concluíram que um maior tempo de torra resulta em cafés com menor teor de água, para uma determinada temperatura.

O teor de água nos produtos agrícolas determina sua vida de prateleira e impacta diretamente nas operações pós-colheita. Sua correta mensuração e predição auxiliam na tomada de decisões para o correto armazenamento do produto (MOHSEIN, 1986), em que a condição de equilíbrio do produto e o ar ambiente é o melhor indicativo das alterações do produto em decorrência da higroscopicidade. Assim, a avaliação da a_w ou o teor de água no equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente se faz necessária.

De modo a obter e avaliar as alterações de sorção de água ao longo do armazenamento, isotermas de sorção são indispensáveis. Estas podem ser obtidas por meio de modelos matemáticos, os quais diferem na sua base teórica ou empírica e na quantidade de parâmetros envolvidos. Os modelos são essenciais para predizer e simular o comportamento dos materiais submetidos a determinado processo.

O monitoramento da sorção de água pode ser realizado por meio da obtenção da a_w e também das propriedades termodinâmicas de sorção. O efeito da a_w foi estudado por Cardelli e Labuza (2001) para determinar a vida de prateleira de café torrado e

moído. A cada 0,1 de aumento da a_w , ocorreu uma diminuição da vida útil do café em aproximadamente 60 %, que foi atribuído ao escurecimento não enzimático, seguido pela temperatura, na qual a cada 10 °C de aumento desta variável, a vida de prateleira do café torrado e moído diminuiu em aproximadamente 20 %.

Segundo Corrêa; Oliveira; Santos (2012), para averiguar o efeito da atividade de água e compreender as propriedades da água adsorvida e avaliar a microestrutura dos alimentos, além de possibilitar o estudo dos fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos alimentos, o conhecimento das propriedades termodinâmicas de produtos agrícolas é uma importante fonte de informação.

Diante do exposto e 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 de café torrado em diferentes níveis de torrefação e moído em diferentes níveis granulométricos, armazenadas a 10 e 30 °C, além de determinar as propriedades termodinâmicas da sorção da água em função da atividade de água.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, MG.

3.2.1 *Matéria-prima*

Foram utilizados grãos de café cru (*Coffea canephora* e *Coffea arabica*), descascados e secos, adquiridos de comércio regional da Zona da Mata de Minas Gerais.

Os grãos foram submetidos a uma triagem para eliminar os grãos deteriorados, danificados e brocados, a fim de se obter uma matéria-prima homogênea e com o mínimo de defeitos. Grãos provenientes de frutos de bica corrida foram utilizados.

O teor de água médio inicial dos grãos foi de 12,61 % (b.s.), tendo sido determinado pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h (BRASIL, 2009).

3.2.2 *Preparo das amostras*

Os grãos de café de ambas as espécies, após a triagem, foram encaminhadas para o processo de torrefação. Para isso, foi utilizado um torrefador de queima direta de gás GLP, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com pré-aquecimento e capacidade de 350 g de café cru (Figura 3.1).



Figura 3.1. Torrefador de quatro cilindros rotativos com queima de gás direto.

O nível de cada torrefação dos grãos de café foi identificado por meio do acompanhamento e comparação da cor das amostras com o número padrão de cor Agrtron, assessorado por um profissional treinado. Dois níveis de torra foram obtidos: média clara (MC) e moderadamente escura (ME), cujos números Agrtron correspondentes são, respectivamente, SCAA#65 e SCAA#45 (Figura 3.2).



Figura 3.2. Níveis de torra empregados: média clara (A) e moderadamente escura (B).

Para garantir a uniformidade das torras, foi utilizado o parâmetro perda de massa, em que, para a temperatura utilizada de 285 °C, os grãos perderam, em média, 15,85 e 18,74 gramas de massa, respectivamente para as torras MC e ME (VARGAS-ELÍAS, 2011). Para se atingir estas perdas de massa, foram realizados testes com a temperatura do torrefador e o tempo de torrefação. Ao atingir os dois níveis de torra mencionados, o produto foi retirado do torrefador e imediatamente esfriado utilizando-se ar ambiente.

Após o processo de torrefação, os grãos foram processados em moinho Mahlkönig, em três granulometrias diferentes: fina (0,59 mm), média (0,84 mm) e grossa (1,19 mm), além de mantido o lote de café inteiro.

As amostras preparadas foram então colocadas em sacos de polipropileno e mantidas sob refrigeração em duas temperaturas de armazenamento (10 e 30 °C). As mesmas foram analisadas durante seis meses, em cinco tempos distintos (0, 30, 60, 120 e 180 dias).

3.2.3 *Atividade de água*

A avaliação das alterações da atividade de água (a_w) das amostras de grãos de café torrados, inteiros e moídos, foi realizada com o auxílio do analisador de atividade de água AquaLab, modelo 4TE, com precisão de $\pm 0,003 a_w$. Três repetições foram realizadas.

3.2.4 *Isotermas de adsorção*

Para a obtenção do teor de água no equilíbrio das amostras de café torrado nos diferentes níveis granulométricos foi utilizado o método estático, em que as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, em câmaras tipo B.O.D. nas temperaturas de 10 e 30 °C. Nos experimentos de sorção, foram utilizadas amostras contendo aproximadamente 10 g de produto, em três repetições.

O teor de água das amostras de café obtido em cada tempo de armazenamento utilizado (0, 30, 60, 120 e 180 dias) foi considerado como o teor de água de equilíbrio. Uma vez que as amostras foram armazenadas em sacos plásticos permeáveis e que o tempo para se atingir o equilíbrio, em cada período de análise, foi avaliado como suficiente.

Aos dados do equilíbrio higroscópico, foram ajustados modelos matemáticos comumente utilizados para descrição dos fenômenos de sorção em produtos agrícolas (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Modelos matemáticos utilizados para representar as isotermas de sorção

Designação do Modelo	Modelo
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (ca_w)]$ (3.1)
GAB Modificado	$U_e = \frac{ab(c/T)a_w}{\{[1 - ba_w][1 - ba_w + b(c/T)a_w]\}}$ (3.2)
Halsey	$U_e = \left[\frac{\exp(a - bT)}{-\ln a_w} \right]^{1/c}$ (3.3)
Oswin Modificado	$U_e = \frac{a + bT}{\left(\frac{1 - a_w}{a_w} \right)^{1/c}}$ (3.4)
Sigma-Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(a_w)]\}$ (3.5)

em que:

U_e = teor de água no equilíbrio, % b.s.;

a_w = atividade de água, adimensional;

a, b, c = parâmetros de ajuste dos modelos que dependem do produto; e,

T = temperatura, °C.

Para verificar o grau de ajuste do modelo, foram consideradas as magnitudes do desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P), sendo que, de modo geral, quanto menores forem as magnitudes desses índices, melhor o ajuste do modelo aos dados observados experimentalmente. O coeficiente de determinação (R^2) e a análise dos resíduos também foram utilizados para averiguar a adequação dos modelos. Os valores de P e SE para cada modelo foram calculados pelas Equações 3.6 e 3.7, respectivamente:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (3.6)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (3.7)$$

em que:

P = erro médio relativo, %;

SE = desvio padrão da estimativa, % b.s.;

Y = valor observado experimentalmente;

\hat{Y} = valor estimado pelo modelo;

n = número de dados observados; e

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

3.2.5 Propriedades termodinâmicas de sorção de água

O calor isostérico de sorção (ou entalpia diferencial) é uma quantidade molar diferencial derivada da temperatura dado em uma quantidade constante de moléculas de água sorvidas (Equação 3.8).

$$\left[\frac{\partial \ln(p)}{\partial T_k} \right]_{n_w} = \frac{\Delta H}{R T_k^2} \quad (3.8)$$

em que:

p = pressão parcial de vapor d'água;

n_w = número de moléculas de água sorvidas;

T_k = temperatura, K;

ΔH = calor isostérico integral de sorção ou entalpia diferencial, kJ kg^{-1} ; e,

R = constante universal dos gases, $0,462 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

O calor isostérico líquido de sorção é calculado pelos dados de sorção de água utilizando a equação de Clausius-Clapeyron (Equação 3.9).

$$\frac{\partial \ln(p_0)}{\partial T_k} = \frac{L_c}{R T_k^2} \quad (3.9)$$

em que:

p_0 = pressão de saturação; e,

L_c = calor latente de condensação da água livre, kJ kg^{-1} .

Nos processos de adsorção, a energia presente no vapor d'água é liberada pelo sistema (neste caso, café torrado) em razão da mudança de fase, para que a água se ligue ao sítio ativo na forma líquida. Dessa forma, é necessário contabilizar essa energia liberada de modo a se obter a entalpia diferencial do processo de adsorção. O calor latente de condensação da água livre (L_c), que retrata essa energia liberada, é obtido pela temperatura média (\bar{T}) na faixa em estudo, em $^{\circ}\text{C}$, segundo apresentado na Equação 3.10:

$$L_c = -2502,2 + 2,39\bar{T} \quad (3.10)$$

Subtraindo a Equação 3.9 da Equação 3.8, resulta na Equação 3.11:

$$\left[\frac{\partial \ln(p/p_0)}{\partial T_k} \right]_{n_w} = \left(\frac{\partial \ln a_w}{\partial T_k} \right)_{n_w} = \frac{\Delta H_{st}}{RT_k^2} \quad (3.11)$$

em que:

ΔH_{st} = calor isostérico líquido de sorção, kJ kg^{-1} .

A entalpia diferencial é obtida somando-se L_c e ΔH_{st} . Integrando a Equação 3.11 e assumindo que ΔH_{st} é independente da temperatura, a entalpia diferencial é calculada para cada valor de teor de água de equilíbrio, de acordo com a Equação 3.12 (WANG & BRENNAN, 1991).

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial (1/T_k)} = -\frac{\Delta H - L_c}{R} = -\frac{\Delta H_{st}}{R} \quad (3.12)$$

As alterações nos valores de entropia diferencial de sorção (ΔS) são calculadas por meio da Equação de Gibbs-Helmholtz (Equação 3.13):

$$\Delta S = \frac{\Delta H_{st} - \Delta G}{T_K} \quad (3.13)$$

em que:

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

ΔG = energia livre de Gibbs, kJ kg^{-1} .

A energia livre de Gibbs é calculada pela Equação 3.14 (MORAN & SHAPIRO, 2006), em que ela é função da temperatura e da umidade relativa de equilíbrio ou atividade de água.

$$\Delta G = \pm RT_k \ln(a_w) \quad (3.14)$$

Os sinais “+” e “-” presentes na Equação 3.14 e em outras relacionadas às propriedades termodinâmicas referem-se ao sentido da transferência de calor, sendo atrelado à espontaneidade ou não do processo estudado. Sendo assim, o sinal positivo relata processos de adsorção no presente trabalho.

O efeito das mudanças na sorção da água sobre a energia livre normalmente é acompanhada de mudanças nos valores de entalpia e entropia. Assim, substituindo a Equação 3.14 na Equação 3.13 e rearranjando, tem-se a Equação 3.15.

$$\ln a_w = \pm \left(\frac{\Delta H_{st}}{RT_k} - \frac{\Delta S}{R} \right) \quad (3.15)$$

Os valores de calor isostérico líquido de sorção e os valores de entropia diferencial podem ser calculados a partir da Equação 3.15, plotando os valores do logaritmo neperiano da atividade de água pelo inverso da temperatura, para os respectivos valores de teor de água de equilíbrio. Os valores de atividade de água, temperatura e teor de água de equilíbrio foram obtidos a partir da equação de melhor ajuste aos dados de teor de água de equilíbrio de café torrado.

A dependência linear entre a entalpia e a entropia foi verificada correlacionando os valores calculados de entalpia diferencial de sorção (ΔH) e de entropia (ΔS) pela Equação 3.16 (BELL, 1937).

$$\Delta H = T_B (\Delta S) + \Delta G_B \quad (3.16)$$

em que:

T_B = temperatura isocinética, K; e,

ΔG_B = energia livre de Gibbs à temperatura isocinética, kJ kg^{-1} .

A temperatura isocinética é uma propriedade característica da superfície do material (AGUERRE; SUAREZ; VIOLLAZ, 1986), sendo descrita pelo coeficiente angular da relação linear existente entre entalpia e entropia, em que representa a temperatura em que todas as reações em série ocorrem em uma mesma taxa. Uma vez que a entalpia e a entropia são altamente correlacionadas, assume-se que a teoria da compensação pode ser válida para a sorção (LIU & GUO, 2001).

De acordo com Krug; Hunter; Grieger (1976a; 1976b), para verificar se existe a compensação, a temperatura isocinética deve ser comparada com a média harmônica da temperatura. A compensação química linear só existirá se a temperatura isocinética (T_B) for diferente da média harmônica da temperatura (T_{hm}). Caso $T_B > T_{hm}$, o processo é regido pela entalpia, enquanto que a condição contrária relata que o processo é regido pela entropia. O cálculo de T_{hm} é realizada pela Equação 3.17:

$$T_{hm} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{T_k} \right)} \quad (3.17)$$

em que:

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

n = número de temperaturas utilizadas.

Um intervalo de confiança aproximado ($1-\alpha$), para a temperatura isocinética pode ser calculado pela Equação 3.18. Se a média harmônica da temperatura estiver

dentro do intervalo calculado da temperatura isocinética, a relação entre os valores de entalpia e entropia diferencial de sorção refletirá apenas erros experimentais e não a existência de fatores químicos e físicos que regem a teoria da compensação (BERISTAIN; GARCIA; AZUARA, 1996). Neste trabalho, adotou-se um intervalo de confiança para a temperatura isocinética de 99 % em toda a faixa de dados observados.

$$T_B = \hat{T}_B \pm t_{\left(m-2, \frac{\alpha}{2}\right)} \sqrt{V(\hat{T}_B)} \quad (3.18)$$

em que:

$$\hat{T}_B = \frac{\sum(\Delta\hat{H} - \overline{\Delta H})(\Delta\hat{S} - \overline{\Delta S})}{\sum(\Delta\hat{S} - \overline{\Delta S})^2} \quad (3.19)$$

$$V(\hat{T}_B) = \frac{\sum(\Delta\hat{H} - \overline{\Delta G}_B - \hat{T}_B \Delta\hat{S})^2}{(m-2) \sum(\Delta\hat{S} - \overline{\Delta S})^2} \quad (3.20)$$

em que:

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

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

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

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Atividade de água

A influência do tempo de armazenamento, do nível de torrefação e da granulometria foram significativas para a atividade de água (a_w), nas duas temperaturas analisadas. Este fato ocorreu independentemente da espécie de café analisada.

As Figuras 3.3 e 3.4 demonstram a variação dos valores de a_w de café torrado, inteiro e moído, em função do tempo de armazenagem, respectivamente para *Coffea arabica* e *Coffea canephora*.

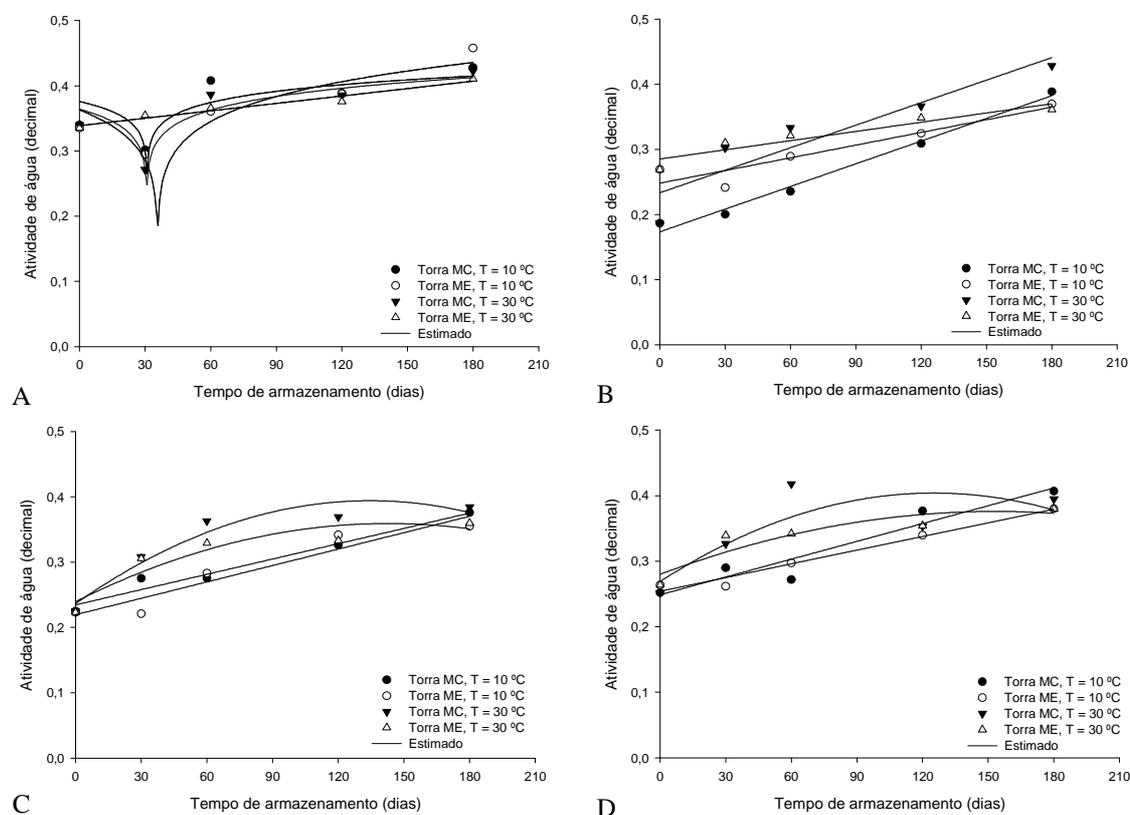


Figura 3.3. Valores médios observados e estimados de atividade de água de café arábica torrado, granulometria inteiro (A), fino (B), médio (C) e grosso (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

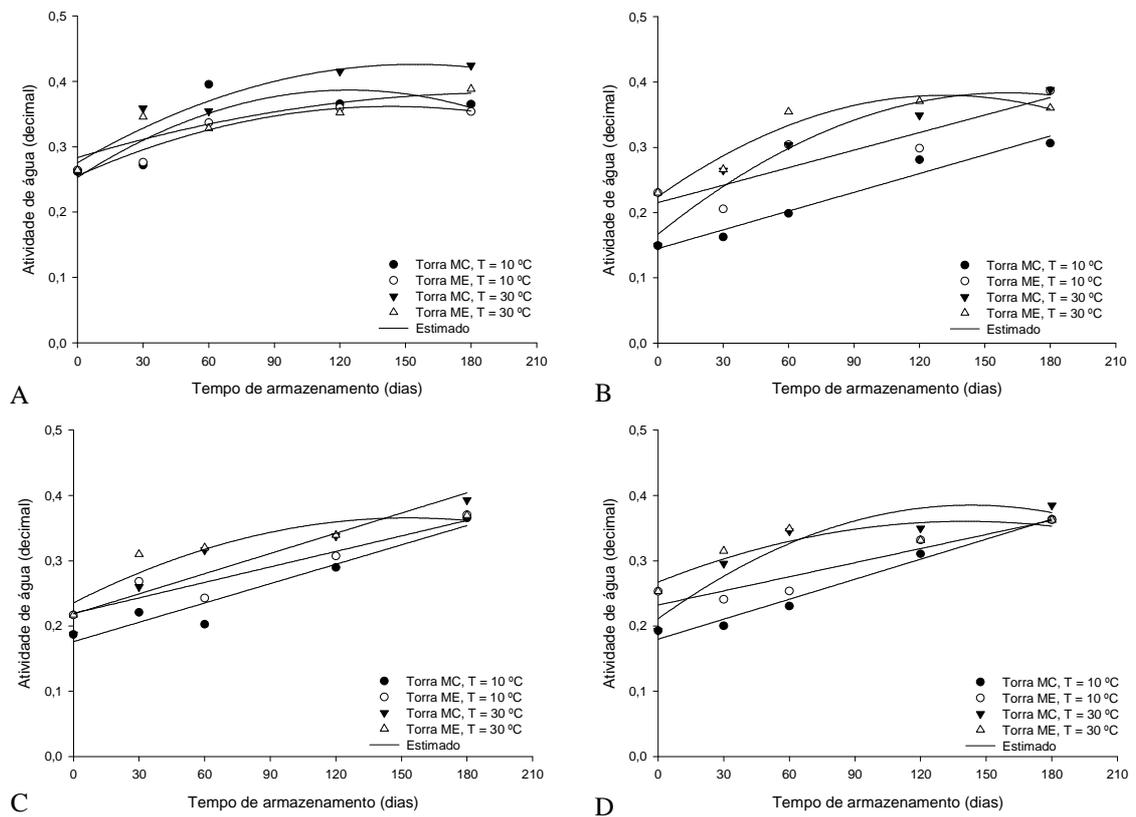


Figura 3.4. Valores médios observados e estimados de atividade de água de café conilon torrado, granulometria inteiro (A), fino (B), médio (C) e grosso (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

De acordo com as Figuras 3.3 e 3.4, nota-se que, de modo geral, o café torrado e inteiro é a granulometria em que ocorre menor variação dos valores de a_w ao longo do armazenamento, independentemente da espécie de café. Já nas amostras com granulometrias fina, média e grossa, há maior aumento de a_w ao longo do armazenamento. Este fato é devido aos maiores valores iniciais de a_w para as amostras de café torrado e inteiro, uma vez que a torrefação produz CO_2 , água e substâncias voláteis (PIMENTA *et al.*, 2009) facilmente liberadas após a moagem, resultando na baixa a_w para cafés moídos.

Verifica-se que os cafés torrados ao nível ME, em termos gerais, possuem menores valores de a_w ao longo do armazenamento quando comparados aos cafés torrados ao nível MC (Figuras 3.3 e 3.4). O maior tempo no processo de torrefação (torra ME) leva a maior perda de massa do produto, que por sua vez é retratada como a evaporação da água do produto, obtendo-se assim menores valores de a_w . Pittia; Nicoli; Sacchetti (2007) reportaram menores valores de a_w para cafés torrados em maior nível de torrefação, tal qual no presente trabalho.

Os cafés torrados, inteiros e moídos, armazenados à temperatura de 10 °C obtiveram menores valores de a_w . Este fato é esperado, uma vez que é sabido que maiores temperaturas aceleram as trocas realizadas entre o produto e o ambiente, acelerando neste caso a adsorção de água pelas amostras de café armazenadas a 30 °C.

A Tabela 3.2 relata as equações ajustadas aos dados experimentais de atividade de água do café, de acordo com a espécie de café analisada, nível de torrefação e a temperatura de armazenagem utilizada. As equações de regressão apresentaram valores de coeficiente de determinação entre 69,25 e 99,90 %, com parâmetros significativos. Estes fatos indicam que as equações são aptas para representar o fenômeno estudado.

Tabela 3.2. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de atividade de água (a_w) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura), em quatro granulometrias diferentes (0 - fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 - inteira) e armazenados em duas temperaturas, em função do tempo de armazenamento (t), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

<i>Café Arábica</i>									
Torra									
Gran.	MC				ME				
	10 °C	R^2	30 °C	R^2	10 °C	R^2	30 °C	R^2	
0	$a_w = 2,4398^{**} + 0,001t + 2,3 \cdot 10^{-5}t^2$	69,25	$a_w = 2,6274^* - 0,0016t + 3,9 \cdot 10^{-5}t^2$	85,12	$a_w = 1,7354^{**} - 0,0007t + 6,2 \cdot 10^{-5}t^2$	91,30	$a_w = 1,7719^{**} + 0,0059t + 2,2 \cdot 10^{-5}t^2$	94,22	
1	$a_w = 1,9758^* + 0,0078^{**}t$	97,78	$a_w = 2,0457^* + 0,0077^{**}t$	97,59	$a_w = 1,8395^* + 0,0019t + 3,3 \cdot 10^{-5}t^2$	97,83	$a_w = 2,0414^* + 0,0036t + 1,9 \cdot 10^{-5}t^2$	92,28	
2	$a_w = 2,3280^{**} + 0,0006t + 3,8 \cdot 10^{-5}t^2$	83,66	$a_w = 2,6109^* + 0,0044^{**}t$	88,32	$a_w = 1,6494^* + 0,0102^{**}t$	85,96	$a_w = 1,7561^* + 0,0172^{**}t - 4,3 \cdot 10^{-5}t^2$	98,25	
3	$a_w = 2,5197^{**} - 0,0071t + 9,0 \cdot 10^{-5}t^2$	85,24	$a_w = 2,6789^* + 0,0033t$	70,01	$a_w = 1,2884^* + 0,0115^*t$	94,57	$a_w = 1,4824^* - 0,0183^*t - 4,7 \cdot 10^{-5}t^2$	99,90	
<i>Café Conilon</i>									
Torra									
Gran.	MC				ME				
	10 °C	R^2	30 °C	R^2	10 °C	R^2	30 °C	R^2	
0	$a_w = 0,1447^* + 0,001^*t$	96,29	$a_w = 0,1664^{**} + 0,0027t - 8,4 \cdot 10^{-6}t^2$	95,81	$a_w = 0,2152^* + 0,0009^{**}t$	82,72	$a_w = 0,2242^* + 0,0006t - 8,9 \cdot 10^{-6}t^2$	94,03	
1	$a_w = 0,1759^* + 0,001^*t$	92,78	$a_w = 0,2183^* + 0,001^{**}t$	89,70	$a_w = 0,2194^* + 0,0008^{**}t$	90,71	$a_w = 0,2355^{**} + 0,0017t - 5,5 \cdot 10^{-6}t^2$	87,52	
2	$a_w = 0,1797^* + 0,001^*t$	97,99	$a_w = 0,2109^{**} + 0,0024t - 8,5 \cdot 10^{-6}t^2$	90,36	$a_w = 0,2322^* + 0,0007^{**}t$	89,57	$a_w = 0,2673^* + 0,0013t - 4,7 \cdot 10^{-6}t^2$	78,81	
3	$a_w = 0,2531^{**} + 0,0022t - 8,6 \cdot 10^{-6}t^2$	73,17	$a_w = 0,2757^* + 0,0019t - 6,3 \cdot 10^{-6}t^2$	91,91	$a_w = 0,2557^* + 0,0015t - 5,1 \cdot 10^{-6}t^2$	93,05	$a_w = 0,2834^* + 0,001t - 2,5 \cdot 10^{-6}t^2$	77,37	

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

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”.

3.3.2 Modelagem matemática da adsorção dos grãos de café

Nas Tabelas 3.3 a 3.10 estão apresentados os coeficientes dos modelos ajustados aos dados observados do equilíbrio higroscópico dos grãos de café (*C. arabica* e *C. canephora*) torrados em dois diferentes níveis (MC e ME), inteiros e moídos, obtido por adsorção, com seus respectivos valores do coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE) e do erro médio relativo (P).

Tabela 3.3. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado média clara, inteiro, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,2688	- 0,0007	3,5366	8,63	0,38	82,32
GAB Modificado	1,1659	18676737	1,5831	8,52	0,36	84,85
Halsey	0,7986	- 0,0005	0,7736	8,62	0,38	82,28
Oswin Modificado	4,3465	0,0029	1,2547	8,66	0,39	81,35
Sigma-copace	- 2,5690	- 0,0007	2,4893	8,58	0,37	83,06
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	0,2217	- 0,0026	2,0712	3,87	0,17	92,64
GAB Modificado	1,5018	58697490	1,2655	4,33	0,18	91,55
Halsey	1,3059	- 0,0035	1,3272	3,87	0,17	92,62
Oswin Modificado	3,4227	0,0010	2,1947	3,87	0,17	92,79
Sigma-copace	- 1,1543	- 0,0026	1,4793	3,86	0,16	92,88

Tabela 3.4. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado moderadamente escuro, inteiro, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 1,9901	- 0,0116	6,8228	7,86	0,27	94,86
GAB Modificado	0,7988	11691431	1,7036	17,56	0,47	83,50
Halsey	0,2083	- 0,0047	0,4015	7,93	0,28	94,79
Oswin Modificado	3,9986	0,0579	0,6178	7,94	0,26	95,20
Sigma-copace	- 6,1253	- 0,0120	4,5916	7,99	0,28	94,45
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 1,2570	- 0,0006	6,3450	9,02	0,27	93,08
GAB Modificado	0,7449	3071165	2,0371	8,07	0,25	94,17
Halsey	0,4668	- 0,0003	0,4340	9,11	0,27	92,97
Oswin Modificado	6,1339	0,0049	0,7282	9,43	0,28	92,54
Sigma-copace	- 5,5530	- 0,0005	4,5920	8,76	0,26	93,38

Tabela 3.5. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado média clara, moído no nível granulométrico fino, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	0,6307	0,0020	1,5103	8,60	0,31	78,84
GAB Modificado	1,9735	32807	1,0015	8,20	0,31	78,94
Halsey	2,2298	0,0037	1,8819	8,72	0,32	78,27
Oswin Modificado	3,8356	- 0,0070	3,3432	8,97	0,32	76,87
Sigma-copace	- 0,4391	0,0021	1,1249	8,42	0,31	79,66
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	0,5888	0,0016	2,2271	6,92	0,33	89,20
GAB Modificado	2,1534	1086	1,2614	7,31	0,35	87,85
Halsey	1,8295	0,0019	1,3063	6,58	0,32	89,84
Oswin Modificado	5,011	- 0,0057	2,4113	6,12	0,31	90,59
Sigma-copace	- 1,0349	0,0017	1,6950	7,22	0,34	88,47

Tabela 3.6. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado moderadamente escuro, moído no nível granulométrico fino, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 1,2981	0,0022	7,0346	9,79	0,27	94,50
GAB Modificado	0,7920	315,2493	2,1228	8,40	0,25	95,17
Halsey	0,5057	0,0009	0,3922	9,92	0,27	94,38
Oswin Modificado	8,2013	- 0,0120	0,6626	10,24	0,28	94,05
Sigma-copace	- 6,1094	0,0021	5,1219	9,56	0,27	94,69
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,6566	- 0,0058	4,7150	9,71	0,36	92,86
GAB Modificado	1,0058	10259337	1,8935	10,09	0,41	90,51
Halsey	0,6369	- 0,0034	0,5909	9,86	0,36	92,75
Oswin Modificado	4,9883	0,0314	1,0159	10,11	0,37	92,52
Sigma-copace	- 3,9327	- 0,0059	3,4666	9,57	0,36	92,92

Tabela 3.7. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado média clara, moído no nível granulométrico médio, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,0289	0,0051	3,4378	5,36	0,22	92,92
GAB Modificado	1,4918	218,2119	1,4949	5,98	0,23	92,20
Halsey	0,9977	0,0041	0,8085	5,29	0,22	92,87
Oswin Modificado	5,0419	- 0,0227	1,3851	5,29	0,23	92,65
Sigma-copace	- 2,4062	0,0052	2,5223	5,46	0,22	93,01
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	0,3490	0,0060	2,8808	6,69	0,25	93,62
GAB Modificado	1,9438	265,6907	1,3547	6,95	0,26	93,02
Halsey	1,3829	0,0059	0,9827	6,71	0,25	93,55
Oswin Modificado	5,5280	- 0,0295	1,7415	6,77	0,26	93,19
Sigma-copace	- 1,7023	0,0060	2,1542	6,64	0,25	93,76

Tabela 3.8. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado moderadamente escuro, moído no nível granulométrico médio, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,3118	0,0007	3,9976	7,87	0,25	91,53
GAB Modificado	1,0204	6936116	1,8741	6,89	0,21	94,07
Halsey	0,8145	0,0005	0,7053	8,03	0,25	91,13
Oswin Modificado	4,8437	- 0,0036	1,2506	8,37	0,27	90,21
Sigma-copace	- 3,1818	0,0006	3,0098	7,60	0,24	92,16
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,5796	- 0,0021	4,8426	8,75	0,25	95,09
GAB Modificado	1,0019	30517074	1,9552	7,73	0,23	96,00
Halsey	0,6927	- 0,0012	0,5777	9,01	0,26	94,75
Oswin Modificado	5,6483	0,0121	1,0044	9,53	0,28	94,00
Sigma-copace	- 3,9768	- 0,0022	3,5867	8,40	0,24	95,52

Tabela 3.9. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado média clara, moído no nível granulométrico grosso, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	0,3956	0,0003	1,9596	9,14	0,36	74,68
GAB Modificado	1,7321	11763447	1,1579	9,16	0,37	74,07
Halsey	1,5685	0,0004	1,4046	9,15	0,36	74,61
Oswin Modificado	3,8738	- 0,0011	2,3121	9,13	0,36	74,77
Sigma-copace	- 0,8989	0,0003	1,3928	9,17	0,36	74,43
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	0,5589	0,0036	2,0645	4,37	0,18	93,57
GAB Modificado	2,0411	826,4070	1,1647	4,80	0,20	92,48
Halsey	1,8138	0,0049	1,3789	4,48	0,19	93,26
Oswin Modificado	4,6036	- 0,0148	2,4715	4,78	0,19	92,59
Sigma-copace	- 0,9290	0,0036	1,5581	4,27	0,18	93,93

Tabela 3.10. Estimativas dos parâmetros dos modelos de equilíbrio higroscópico de café torrado moderadamente escuro, moído no nível granulométrico grosso, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2), desvio padrão da estimativa (SE), erro médio relativo (P) e análise de resíduos, para a faixa de temperatura de 10 a 30 °C

<i>Café Arábica</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,8803	0,0032	5,7552	9,08	0,32	91,74
GAB Modificado	0,9946	171,8968	1,9167	8,81	0,32	91,60
Halsey	0,5914	0,0015	0,4781	9,14	0,32	91,70
Oswin Modificado	6,7830	- 0,0213	0,7994	9,32	0,32	91,59
Sigma-copace	- 4,7679	0,0031	4,1550	8,93	0,32	91,77
<i>Café Conilon</i>						
Modelos	Parâmetros de ajuste			P (%)	SE (% b.s.)	R^2 (%)
	a	b	c			
Copace	- 0,9357	- 0,0011	5,9178	6,30	0,27	94,89
GAB Modificado	0,8648	4774015	2,0777	5,72	0,28	94,61
Halsey	0,5813	- 0,0005	0,4687	6,38	0,27	94,87
Oswin Modificado	6,7563	0,0064	0,8029	6,60	0,27	94,78
Sigma-copace	- 5,0459	- 0,0012	4,3541	6,14	0,27	94,93

Para a adequabilidade de certo modelo na descrição de um fenômeno, segundo Samapundo *et al.* (2007), valores inferiores a 10 % de erro médio relativo indicam bom ajuste para fins práticos. De acordo com Draper e Smith (1998), a capacidade de um modelo para descrever com fidelidade determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do desvio padrão da estimativa. Considerou-se aceitável, neste trabalho, um desvio máximo da estimativa do modelo de 0,5 % (b.s.). Desta forma, de acordo com os dados das Tabelas 3.3 a 3.10, verifica-se que, entre todos os modelos avaliados, o modelo Sigma-Copace foi o que teve as menores magnitudes de P e SE.

De modo a assegurar que o modelo selecionado está apto a descrever o fenômeno, é indicado que seja realizada a análise dos resíduos. A Figura 3.5 mostra a distribuição dos resíduos apresentada pelo modelo Sigma-Copace na descrição do fenômeno de adsorção nos grãos de café arábica torrado, inteiro e moído.

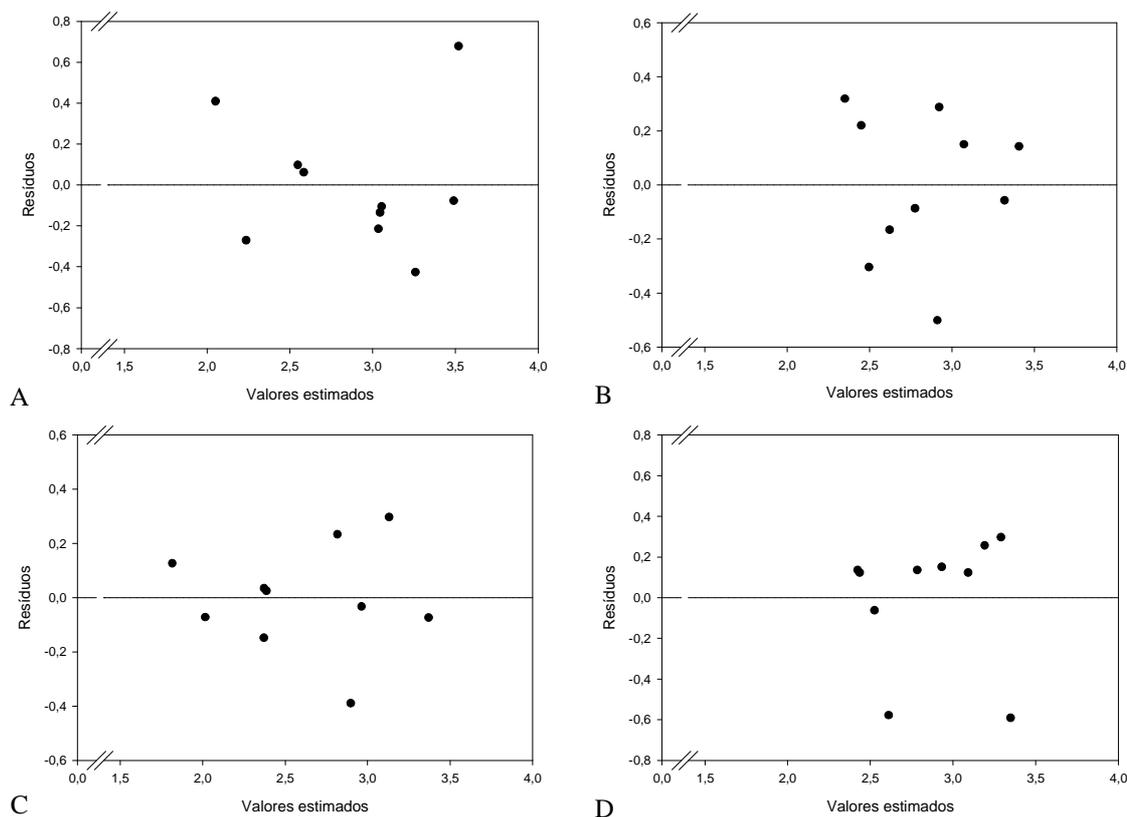


Figura 3.5. Comportamento da distribuição dos resíduos do modelo Sigma-Copace avaliado para obtenção das isotermas de adsorção para grão de café arábica torrado ao nível média clara, granulometria inteiro (A), fino (B), médio (C) e grosso (D).

Nota-se, pela Figura 3.5, que os comportamentos apresentados pelos resíduos do modelo Sigma-Copace na descrição dos teores de água de equilíbrio dos grãos de café arábica torrado, inteiro e moído, foram aleatórios. Dessa forma, em adição às menores magnitudes de P e SE, o modelo Sigma-Copace também não foi tendencioso nas suas estimativas, sendo esse o modelo recomendado para a estimativa dos teores de água de equilíbrio de café arábica e conilon, torrado ao nível MC e ME, nas granulometrias empregadas. O modelo Sigma-Copace também representou de forma satisfatória a higroscopicidade de café solúvel (CORRÊA; AFONSO JÚNIOR; STRINGHETA, 2000) e frutos de café conilon (BOTELHO, 2012). Devido à similaridade da distribuição dos resíduos, independentemente da espécie de café e do nível de torrefação, não foram inseridos aqui os comportamentos restantes.

Nas Figuras 3.6 a 3.9 são apresentadas as médias dos dados observados do teor de água de equilíbrio dos grãos de café arábica e conilon torrados, para os diferentes níveis granulométricos, obtidos por adsorção, bem como suas isotermas determinadas pelo modelo Sigma-Copace para as temperaturas de 10 e 30 °C.

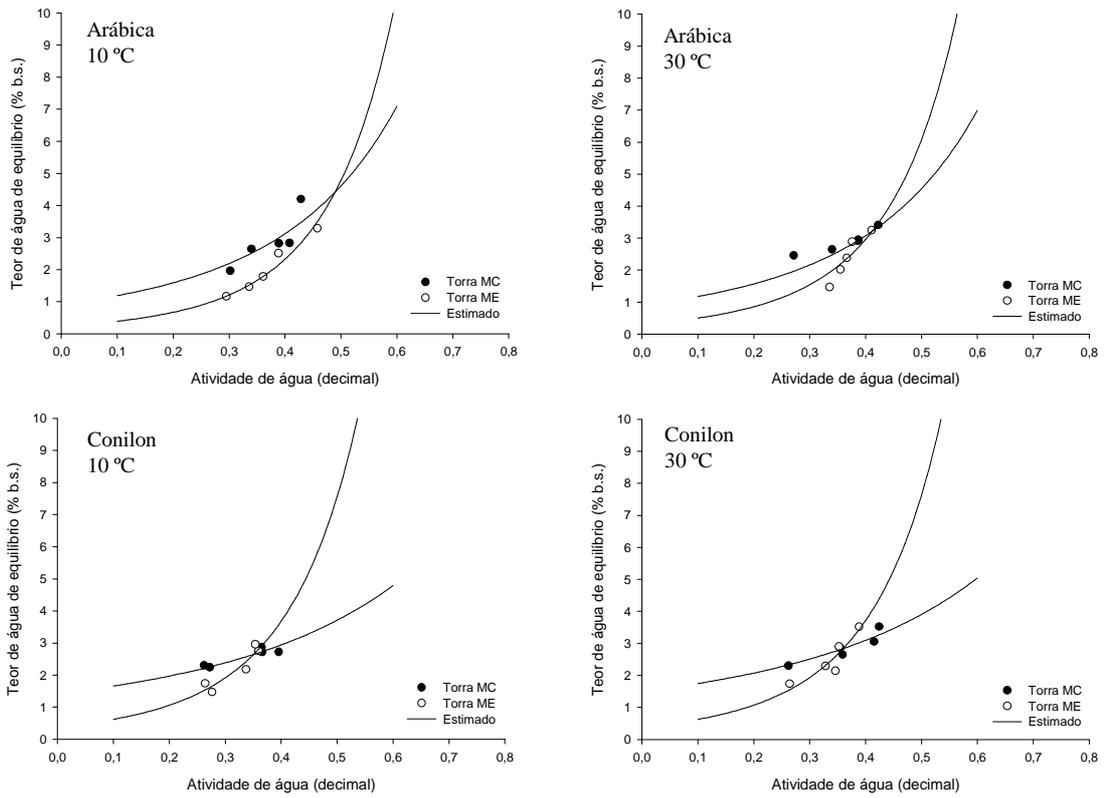


Figura 3.6. Valores observados e estimados, pelo modelo Sigma-Copace, do teor de água de equilíbrio dos grãos de café arábica e conilon, torrado e inteiro, obtidos por adsorção e armazenados a 10 °C e 30 °C.

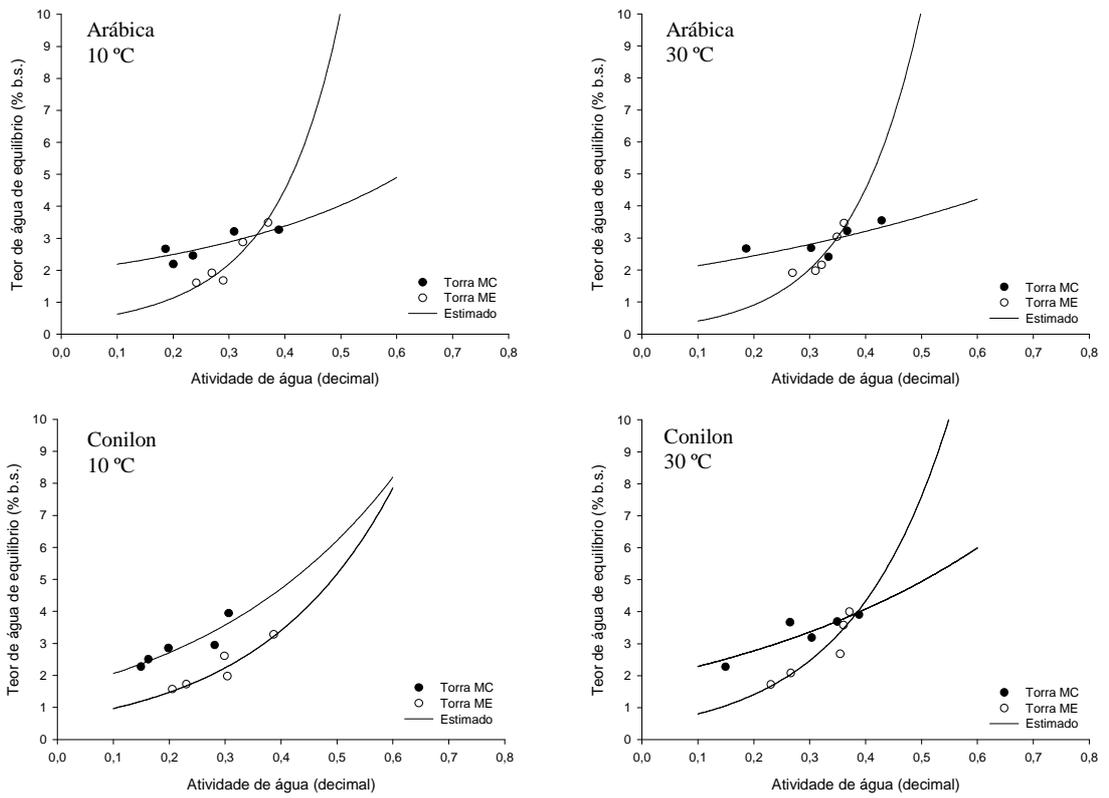


Figura 3.7. Valores observados e estimados, pelo modelo Sigma-Copace, do teor de água de equilíbrio dos grãos de café arábica e conilon, torrado e moído ao nível granulométrico fino, obtidos por adsorção e armazenados a 10 °C e 30 °C.

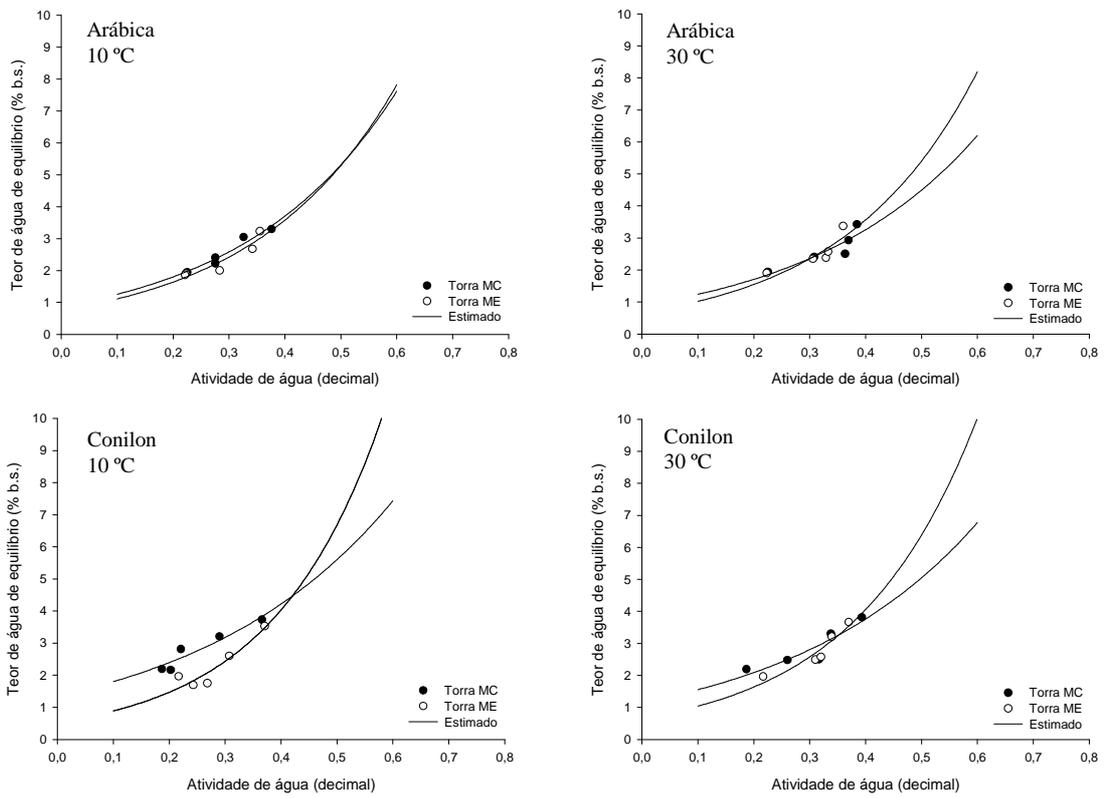


Figura 3.8. Valores observados e estimados, pelo modelo Sigma-Copace, do teor de água de equilíbrio dos grãos de café arábica e conilon, torrado e moído ao nível granulométrico médio, obtidos por adsorção e armazenados a 10 °C e 30 °C.

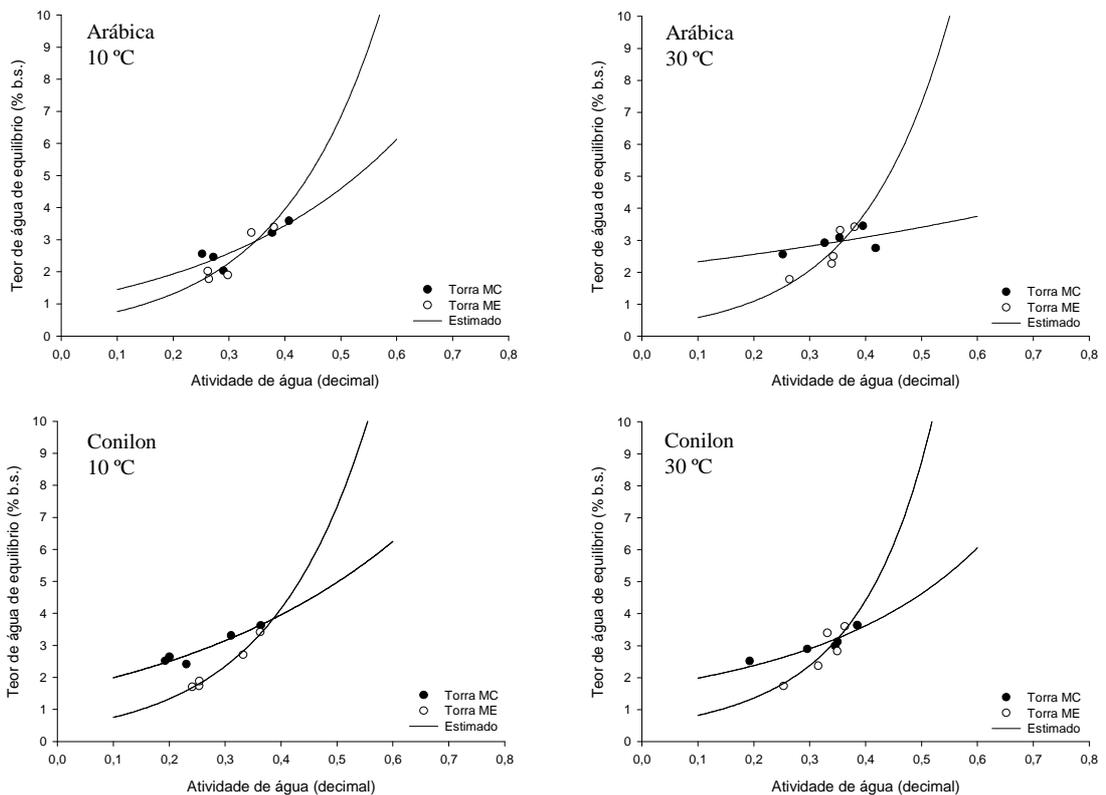


Figura 3.9. Valores observados e estimados, pelo modelo Sigma-Copace, do teor de água de equilíbrio dos grãos de café arábica e conilon, torrado e moído ao nível granulométrico grosso, obtidos por adsorção e armazenados a 10 °C e 30 °C.

Analisando as isotermas das Figuras 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9, pode-se verificar que há influência da temperatura na higroscopicidade nas amostras de café torrado, independentemente da espécie de café e do nível granulométrico avaliado. De modo a se obter o mesmo teor de água de equilíbrio aumentando-se a temperatura, deve-se, necessariamente, aumentar a umidade relativa de equilíbrio (ou atividade de água); ou, de forma semelhante, para uma dada umidade relativa constante, o teor de água de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura. Segundo Mohsenin (1986), ao passo que ocorre um incremento na temperatura, a vibração das moléculas aumenta, elevando a distância entre estas, diminuindo assim a atração entre as moléculas. Portanto, a quantidade de água sorvida muda à medida que ocorre variação na temperatura a uma dada umidade relativa. Em trabalho posterior, Palipane e Driscoll (1992) indicaram que o aumento da temperatura acarreta em maiores níveis energéticos das moléculas de água, tornando-as termodinamicamente menos estáveis, facilitando a quebra da ligação entre a água e os locais de sorção, culminando na diminuição do teor de água do produto.

De acordo com as Figuras 3.6 a 3.9, as isotermas de adsorção do café torrado apresentaram em sua porção final, correspondente às atividades de água mais elevadas, um incremento pronunciado da curva, especialmente para as amostras torradas ao nível moderadamente escuro. Este comportamento se deve ao observado anteriormente, em que as amostras torradas a um nível mais elevado são mais higroscópicas, e conseqüentemente tem a possibilidade de adsorver maiores quantitativos de moléculas de água do ambiente. Esse incremento da curva foi observado por Corrêa; Afonso Júnior; Stringheta (2000), Anese; Manzocco; Nicoli (2006) e Baptestini (2011), trabalhando respectivamente com café solúvel, café torrado e moído armazenado a 30 °C por 1 mês e café torrado e moído estocado em diferentes embalagens.

Verifica-se que há boa correspondência entre os dados estimados pelo modelo de Sigma-Copace e os dados observados experimentalmente. Entretanto, deve-se salientar que o referido modelo é exponencial, portanto não se observa inflexão da isoterma para a predição de teores de água quando a atividade de água tende a zero, sendo uma limitação desse modelo. Ademais, sugere-se que em trabalhos futuros sejam testados experimentalmente os teores de água de equilíbrio para valores de a_w entre 0,5 e 0,9, de modo a averiguar o comportamento final das isotermas de adsorção de café torrado e moído, principalmente para café torrado ao nível ME, uma vez que é possível a superestimação dos valores de teor de água de equilíbrio nestes níveis de a_w .

Brunauer (1945) classificou as isotermas de sorção com base nas forças de van der Waals de gases não polares adsorvidos em vários substratos sólidos não porosos. O resultado desta classificação está apresentado na Figura 3.10.

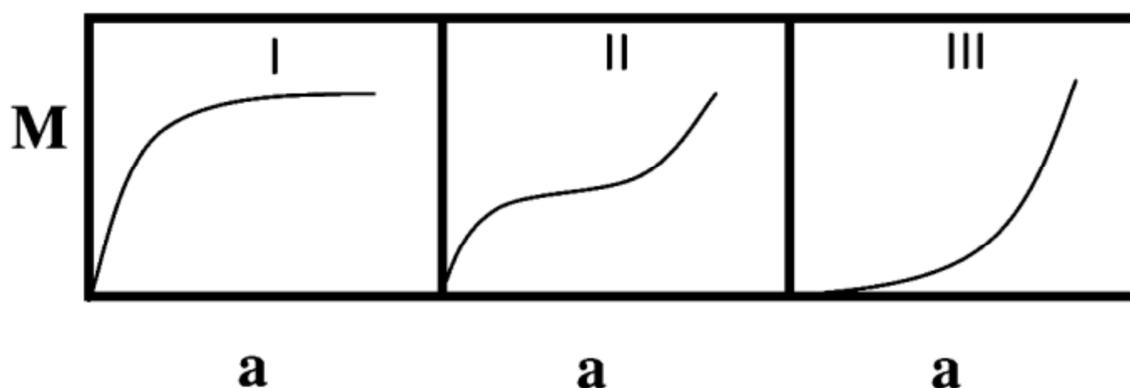


Figura 3.10. Três tipos de isotermas de sorção demonstrando o teor de água adsorvente (M) *versus* a atividade de água (a). Fonte: Labuza e Altunakar (2007).

Analisando a Figura 3.10, pode-se concluir que as isotermas de adsorção de café torrado, inteiro e moído, podem ser classificadas como do tipo III. De acordo com Labuza e Altunakar (2007), as isotermas do tipo III são aplicáveis a alimentos contendo principalmente componentes cristalinos, estado caracterizado por um arranjo regular tridimensional das moléculas baseados na orientação em que as mesmas se encontram. O ganho de umidade é baixo até cerca de 0,8 de a_w , tal como apresentado nas Figuras 3.6 a 3.9.

3.3.3 Entalpia diferencial de adsorção

Os valores observados e estimados de entalpia diferencial de adsorção, em função do teor de água de equilíbrio, para as amostras de café (*Coffea arabica* e *Coffea canephora*) torrado (MC e ME), nos níveis granulométricos estão apresentados na Figura 3.11.

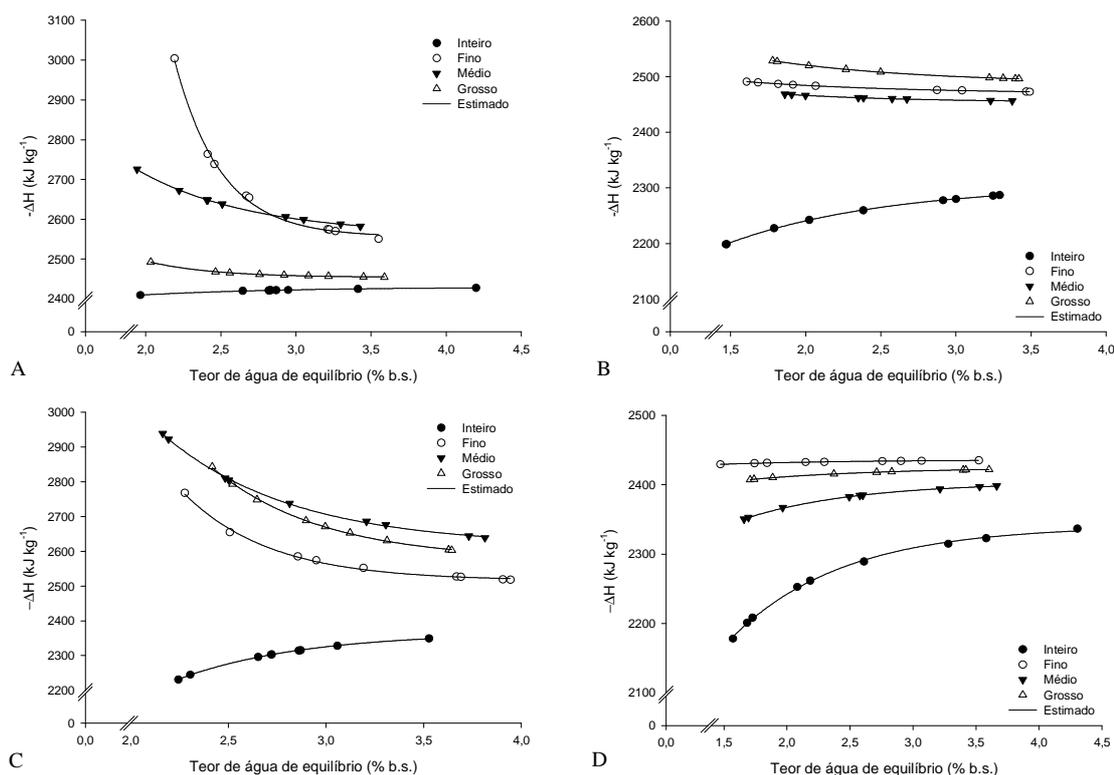


Figura 3.11. Valores observados e estimados de entalpia diferencial de adsorção (ΔH) de café arábica torrado média clara (A) e moderadamente escuro (B) e café conilon torrado média clara (C) e moderadamente escuro (D), em diferentes níveis granulométricos.

Pela Figura 3.11, nota-se que com o incremento de teor de água, os valores de entalpia diferencial de adsorção tendem a se aproximar ao valor do calor latente da água pura ($2442,45 \text{ kJ kg}^{-1}$), indicando que o número de ligações entre as moléculas de água e os sítios ativos do produto se encontra próximo de seu máximo (saturação). Este comportamento é explicado pelas diferenças nas forças de ligação da água com a superfície sorvente (café), em que no início da sorção (baixos teores de água), há sítios polares de sorção altamente ativos com elevada energia de interação na superfície sorvente, que por sua vez são cobertos com moléculas de água, formando uma camada monomolecular (AL-MUHTASEB; MCMINN; MAGEE, 2004). À medida que 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 menor energia de interação e, conseqüentemente, menor entalpia diferencial de sorção (WANG & BRENNAN, 1991).

Observa-se que com a redução do teor de água de equilíbrio, há um incremento da energia liberada pela sorção da água no produto, fato este mais pronunciado nos cafés torrados ao nível MC (Figura 3.11). Os maiores valores de ΔH na torra MC em um valor constante de teor de água indicam que durante a adsorção existem mais locais (sítios) polares ou locais de sorção na superfície adsorvente do café em comparação com os cafés torrados ME. Viganó *et al.* (2012) relataram que maiores valores de entalpia diferencial de sorção pode ser interpretada por maiores interações energéticas e heterogeneidade de moléculas de água, indicando que estes produtos são mais afetados por mudanças na umidade relativa. Já para os grãos inteiros e para as amostras moídas de café conilon torradas ao nível ME, que apresentaram comportamento inverso (menores valores de ΔH com redução de teor de água), a adsorção de água ocorre na forma de vapor, uma vez que a energia liberada no processo não atingiu o valor do calor latente de condensação. O fato de a energia liberada ser menor que o da água livre indica que a força de ligação entre as moléculas de água aos sítios ativos presentes na matéria seca do produto é mais fraca que as ligações entre as próprias moléculas de água.

A variação de ΔH de acordo com os níveis granulométricos de café torrado, independentemente da espécie avaliada, pode ser analisada pela torrefação. A torra ME possibilitou que todas as amostras moídas se equivalessem estatisticamente ($p < 0,05$), diferindo do café torrado inteiro. Baptistini (2011) também concluiu que as amostras de café arábica, torrado e moído nestas mesmas granulometrias (fino, médio e grosso),

foram estatisticamente iguais. No entanto, o nível de torrefação MC não permite uma segregação de acordo com a granulometria, tendo comportamento aleatório de acordo com a espécie avaliada. As granulometrias fina e média, bem como a média e grossa são estatisticamente iguais ($p < 0,05$) respectivamente para o café arábica e conilon.

As equações ajustadas da entalpia diferencial de adsorção, 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 3.11.

Nota-se, na Tabela 3.11, que as equações que relacionam a entalpia diferencial de adsorção com o teor de água apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação ($\geq 99,72$), indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas.

Tabela 3.11. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de entalpia diferencial de adsorção (ΔH) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura), em quatro granulometrias diferentes (0 – fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 – inteira), em função do teor de água (U_e), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

<i>Café Arábica</i>			
Torra	Gran.	Equação	R^2
MC	0	$\Delta H = 2555,7722^* + 528088,6652^{**} \exp(-3,2303^* U_e)$	99,73
	1	$\Delta H = 2560,9976^* + 2202,7925^* \exp(-1,3373^* U_e)$	99,96
	2	$\Delta H = 2454,0665^* + 3896,0944^{**} \exp(-2,2755^* U_e)$	99,86
	3	$\Delta H = 2429,4977^* - 157,2065^* \exp(-1,0498^* U_e)$	99,95
ME	0	$\Delta H = 2469,2329^* + 95,5345^* \exp(-0,9168^* U_e)$	99,97
	1	$\Delta H = 2454,2174^* + 130,8667^* \exp(-1,1837^* U_e)$	99,98
	2	$\Delta H = 2488,0539^* + 228,9331^* \exp(-0,9710^* U_e)$	99,99
	3	$\Delta H = 2305,6319^* - 425,2757^* \exp(-0,9393^* U_e)$	99,98
<i>Café Conilon</i>			
Torra	Gran.	Equação	R^2
MC	0	$\Delta H = 2515,7119^* + 41099,9116^{**} \exp(-2,2431^* U_e)$	99,72
	1	$\Delta H = 2615,7317^* + 8401,6808^{**} \exp(-1,5085^* U_e)$	99,92
	2	$\Delta H = 2574,8988^* + 19411,4494^{**} \exp(-1,7750^* U_e)$	99,93
	3	$\Delta H = 2366,7309^* - 4490,2391^* \exp(-1,5625^* U_e)$	99,97
ME	0	$\Delta H = 2435,7722^* - 27,6157^* \exp(-0,9993^* U_e)$	99,92
	1	$\Delta H = 2403,4560^* - 339,5514^* \exp(-1,1218^* U_e)$	99,95
	2	$\Delta H = 2424,8885^* - 87,2353^* \exp(-0,9425^* U_e)$	99,98
	3	$\Delta H = 2340,6697^* - 943,9656^* \exp(-1,1302^* U_e)$	99,84

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

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”.

3.3.4 Entropia diferencial de adsorção

Os valores observados e estimados de entropia diferencial de adsorção, em função do teor de água de equilíbrio, para as amostras de café (*Coffea arabica* e *Coffea canephora*) torrado (MC e ME), nos níveis granulométricos estão apresentados na Figura 3.12.

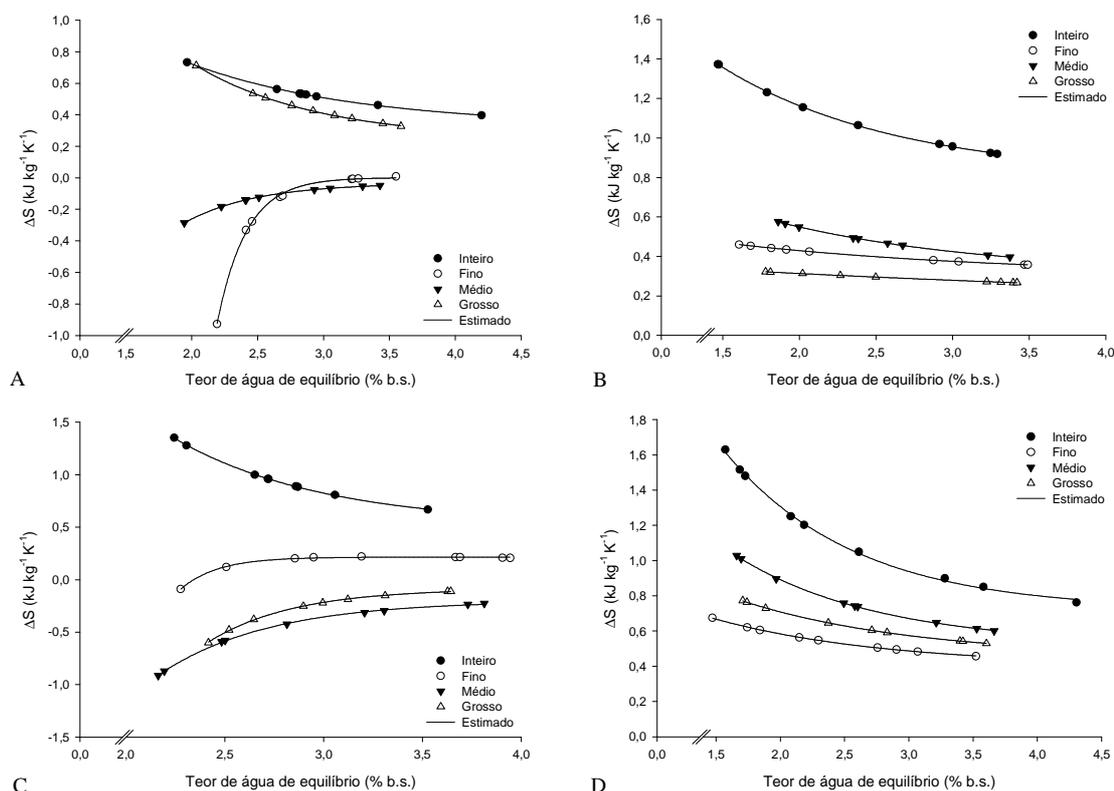


Figura 3.12. Valores observados e estimados de entropia diferencial de adsorção (ΔS) de café arábica torrado média clara (A) e moderadamente escuro (B) e café conilon torrado média clara (C) e moderadamente escuro (D), em diferentes níveis granulométricos.

Observa-se na Figura 3.12 que, de modo geral, a entropia diferencial de adsorção teve uma variação semelhante à entalpia diferencial de adsorção em relação à variação do teor de água. Tal comportamento era esperado, uma vez que a geração de entropia está condicionada à transferência de calor entre dois sistemas, sendo sua magnitude sempre proporcional ao calor transferido em uma mesma temperatura. Resultado semelhante foi observado por Al-Muhtaseb; McMinn; Magee (2004), trabalhando com amido em pó e por Baptistini (2011), trabalhando com café torrado moído armazenado em diferentes embalagens.

Pela Figura 3.12 nota-se também que há amostras de café que apresentam comportamento contrário ao explanado anteriormente, ou seja, há um aumento de entropia diferencial com o incremento do teor de água. De acordo com Rizvi (2005), há dois comportamentos opostos de entropia diferencial em alimentos para o processo de adsorção: perda de entropia devido à localização da água e um aumento de entropia devido à formação de solução, como por exemplo, solubilização do alimento e expansão do produto. Dito isto, o incremento de ΔS é um indicativo de formação de camadas de moléculas de água que serão removidas posteriormente da superfície do produto (RIZVI, 2005). Este fato ocorreu apenas nas amostras de café torradas ao nível MC, indicando que a torra ME não permite a formação das camadas de água.

A entropia diferencial é proporcional ao número de locais disponíveis para a adsorção de água no café, sendo que esta propriedade descreve o grau de desordem e movimentação aleatória de moléculas de água no sorvente (GONELI *et al.*, 2013). Portanto, os maiores valores de ΔS encontrados nas amostras de café torrado inteiro (Figura 3.12) é esperado, uma vez que há uma área maior para as moléculas de água movimentarem, o que leva a maior número de locais de sorção em dado teor de água.

Para teores de água elevados, a matéria seca do produto já não exerce tanta influência na sorção de água como acontece quando o produto está mais seco, pois seus sítios ativos tendem a saturar (BOTELHO, 2012). Nessa condição, a entropia diferencial tendeu, como esperado, a atingir magnitudes observadas para a água pura ($\Delta S = 0$).

As equações ajustadas da entropia diferencial de adsorção, 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 3.12.

Nota-se, na Tabela 3.12, que assim como ocorreu com a entalpia diferencial, as equações que relacionam a entropia diferencial de adsorção com o teor de água apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação ($\geq 99,70$), indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas.

Tabela 3.12. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de entropia diferencial de adsorção (ΔS) dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura), em quatro granulometrias diferentes (0 – fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 – inteira), em função do teor de água (U_e), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

<i>Café Arábica</i>			
Torra	Gran.	Equação	R^2
MC	0	$\Delta S = 0,0018 - 16476,3876^{**} \exp(-4,4658^* U_e)$	99,89
	1	$\Delta S = -0,0324^* - 8,9081^* \exp(-1,8323^* U_e)$	99,97
	2	$\Delta S = 0,2414^* + 4,1082^* \exp(-1,0659^* U_e)$	99,97
	3	$\Delta S = 0,3285^* + 1,8803^* \exp(-0,7819^* U_e)$	99,97
ME	0	$\Delta S = 0,3008^* + 0,3828^* \exp(-0,5471^* U_e)$	99,99
	1	$\Delta S = 0,3105^* + 1,0452^* \exp(-0,7393^* U_e)$	99,99
	2	$\Delta S = 0,1332^* + 0,2746^* \exp(-0,2113^* U_e)$	99,99
	3	$\Delta S = 0,8039^* + 2,0216^* \exp(-0,8640^* U_e)$	99,98
<i>Café Conilon</i>			
Torra	Gran.	Equação	
MC	0	$\Delta S = 0,2153^* - 55468,5545 \exp(-5,3189^* U_e)$	99,70
	1	$\Delta S = -0,1996^* - 35,8146^{**} \exp(-1,8116^* U_e)$	99,93
	2	$\Delta S = -0,0842^* - 137,2597^{**} \exp(-2,3145^* U_e)$	99,94
	3	$\Delta S = 0,5215^* + 16,2154^* \exp(-1,3265^* U_e)$	99,97
ME	0	$\Delta S = 0,4012^* + 0,8249^* \exp(-0,7547^* U_e)$	99,95
	1	$\Delta S = 0,5219^* + 2,2677^* \exp(-0,9065^* U_e)$	99,96
	2	$\Delta S = 0,4516^* + 1,1278^* \exp(-0,7398^* U_e)$	99,99
	3	$\Delta S = 0,7182^* + 4,2138^* \exp(-0,9842^* U_e)$	99,86

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

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”.

3.3.5 Energia Livre de Gibbs

Os valores observados e estimados de energia livre de Gibbs, em função do teor de água de equilíbrio, para as amostras de café (*Coffea arabica* e *Coffea canephora*) torrado (MC e ME), nos níveis granulométricos e armazenados a 10 e 30 °C estão apresentados nas Figuras 3.13 e 3.14.

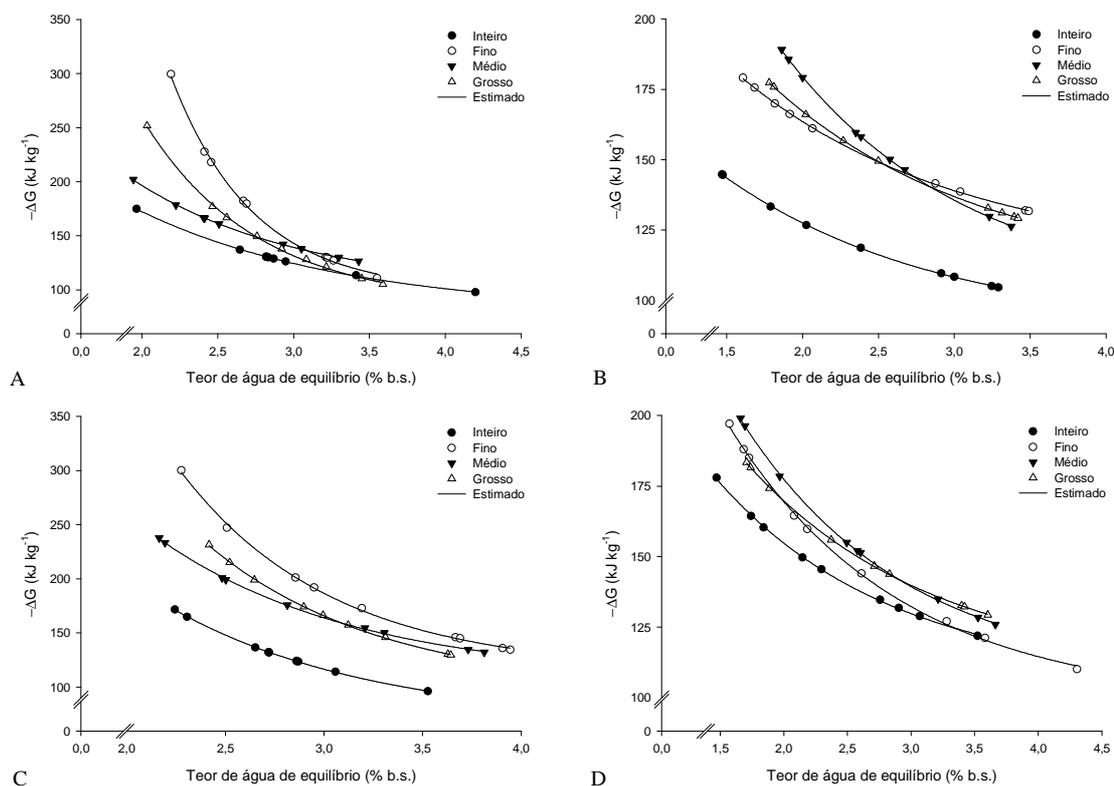


Figura 3.13. Valores observados e estimados de energia livre de Gibbs (ΔG) de café arábica torrado média clara (A) e moderadamente escuro (B) e café conilon torrado média clara (C) e moderadamente escuro (D), em diferentes níveis granulométricos, armazenados a 10 °C.

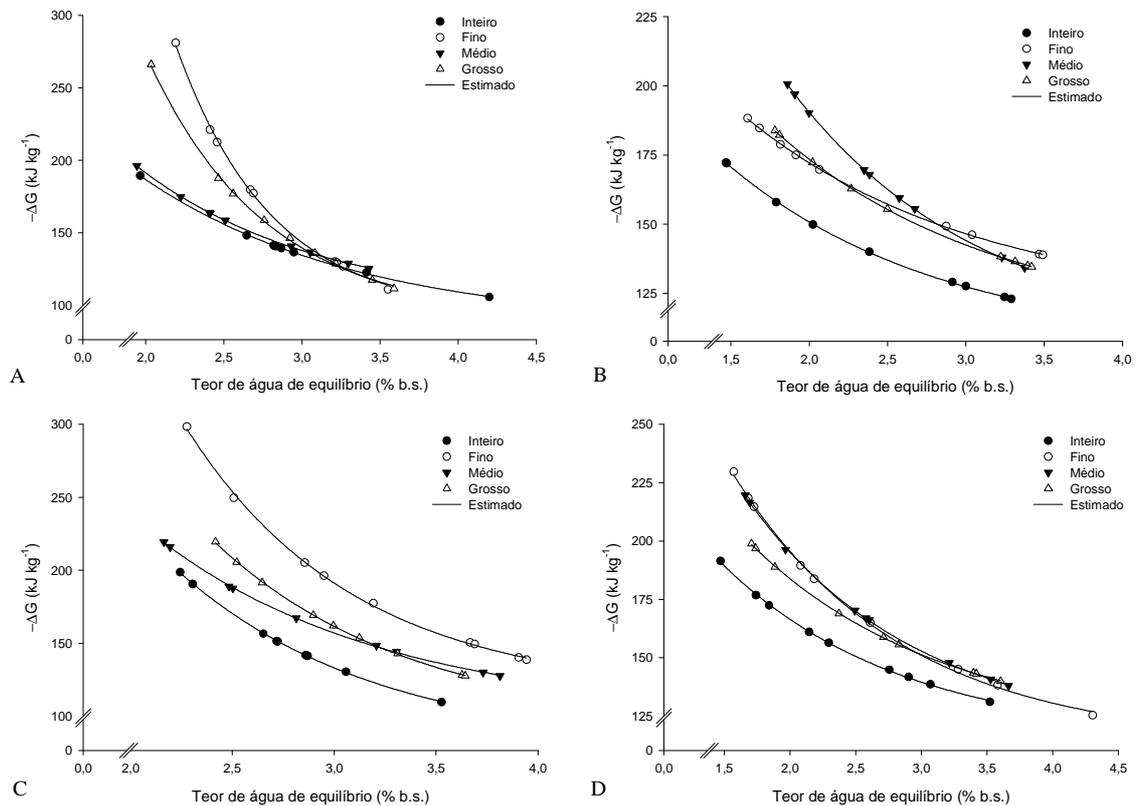


Figura 3.14. Valores observados e estimados de energia livre de Gibbs (ΔG) de café arábica torrado média clara (A) e moderadamente escuro (B) e café conilon torrado média clara (C) e moderadamente escuro (D), em diferentes níveis granulométricos, armazenados a 30 °C.

Nkolo Meze'e; Noah Ngamveng; Bardet (2008) relatam que a energia livre de Gibbs é atribuída ao trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis. O valor negativo da energia livre de Gibbs é característico de uma reação exergônica, em que não requer uma adição de energia proveniente do meio em que o produto está envolvido para que ocorra a reação, ou seja, a reação é espontânea. Esse comportamento é esperado, uma vez que o processo de adsorção é espontâneo: as amostras encontram-se inicialmente com menor umidade relativa de equilíbrio (após torrefação), sendo posteriormente submetidas a uma maior umidade relativa (armazenamento) até que o equilíbrio seja atingido.

De acordo com as Figuras 3.13 e 3.14, as amostras de café torradas e mantidas inteiras obtiveram menores valores absolutos de ΔG que as amostras moídas, sendo que maiores valores absolutos desta propriedade estão relacionadas à maior higroscopicidade do produto. Este comportamento é esperado, uma vez que a integridade nas amostras inteiras atua como barreira física para a troca do grão com o

ambiente que o circunda, limitando a espontaneidade do processo de adsorção (menores valores de ΔG).

Nota-se também que ao longo do armazenamento ocorre o decréscimo dos valores de ΔG , independentemente da espécie avaliada, nível de torrefação e nível granulométrico do café torrado (Figuras 3.13 e 3.14). Este fato também é esperado, uma vez que com o passar dos dias as amostras de café adsorvem as moléculas de água proveniente do ambiente, tendo assim menos locais de adsorção e conseqüentemente apresentando menor espontaneidade para a sorção de água.

A energia livre de Gibbs aumentou com o incremento da temperatura (Figuras 3.13 e 3.14), ocorrência esta devido ao maior grau de excitação das moléculas que compõem o produto, acelerando as trocas gasosas e, por conseguinte, tornando o processo mais rápido e espontâneo. Gökmen e Serpen (2002) e Koyuncu *et al.* (2007), ambos avaliando a adsorção de compostos de suco de maçã em resinas, também verificaram um aumento de energia livre de Gibbs com o aumento da temperatura. Entretanto, a influência da temperatura em altos valores de teor de água se torna irrelevante, já que os locais de sorção nestes teores já estão disponíveis (GONELI *et al.*, 2013).

As equações ajustadas da entropia diferencial de adsorção, em função do teor de água no equilíbrio para o café torrado, nos diferentes níveis granulométricos com seus coeficientes de determinação, estão apresentadas nas Tabelas 3.12 e 3.13, respectivamente para o café arábica e conilon.

Nota-se, nas Tabelas 3.12 e 3.13, que as equações que relacionam a entropia diferencial de adsorção com o teor de água apresentaram valores satisfatórios para o coeficiente de determinação ($\geq 99,84$), indicando que houve boa correspondência entre os dados observados e estimados pelas equações propostas.

Tabela 3.12. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de energia livre de Gibbs (ΔG) dos grãos de café arábica, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura), em quatro granulometrias diferentes (0 – fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 – inteira), em função do teor de água (U_e), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

Torra	Gran.	10 °C	R^2	30 °C	R^2
MC	0	$\Delta G = 98,5956^* + 11508,7690^{**} \exp(-1,8516^* U_e)$	99,84	$\Delta G = 93,6311^* + 6612,2752^{**} \exp(-1,6299^* U_e)$	99,90
	1	$\Delta G = 101,3137^* + 601,7169^* \exp(-0,9218^* U_e)$	99,98	$\Delta G = 98,9475^* + 520,5834^* \exp(-0,8465^* U_e)$	99,98
	2	$\Delta G = 86,1266^* + 2501,6658^* \exp(-1,3372^* U_e)$	99,92	$\Delta G = 91,1133^* + 2567,2755^* \exp(-1,3231^* U_e)$	99,92
	3	$\Delta G = 79,0373^* + 394,7421^* \exp(-0,7216^* U_e)$	99,97	$\Delta G = 85,6288^* + 432,1064^* \exp(-0,7264^* U_e)$	99,97
ME	0	$\Delta G = 114,0748^* + 194,3921^* \exp(-0,6843^* U_e)$	99,98	$\Delta G = 120,1619^* + 201,8131^* \exp(-0,6785^* U_e)$	99,98
	1	$\Delta G = 101,2877^* + 404,8091^* \exp(-0,8225^* U_e)$	99,99	$\Delta G = 107,5265^* + 425,4906^* \exp(-0,8180^* U_e)$	99,99
	2	$\Delta G = 108,0823^* + 248,7611^* \exp(-0,7186^* U_e)$	99,99	$\Delta G = 112,3155^* + 251,4116^* \exp(-0,7070^* U_e)$	99,99
	3	$\Delta G = 89,4094^* + 155,0617^* \exp(-0,7019^* U_e)$	99,99	$\Delta G = 105,7127^* + 194,5490^* \exp(-0,7314^* U_e)$	99,99

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

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”.

Tabela 3.13. Equações de regressão ajustadas aos valores experimentais de energia livre de Gibbs (ΔG) dos grãos de café conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura), em quatro granulometrias diferentes (0 – fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 – inteira), em função do teor de água (U_e), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

Torra	Gran.	10 °C	R^2	30 °C	R^2
MC	0	$\Delta G = 114,8920^* + 3523,2562^{**} \exp(-1,2980^* U_e)$	99,90	$\Delta G = 115,9299^* + 2857,7029^{**} \exp(-1,2122^* U_e)$	99,92
	1	$\Delta G = 108,0518^* + 1121,3325^* \exp(-0,9994^* U_e)$	99,96	$\Delta G = 100,9415^* + 811,3640^* \exp(-0,8911^* U_e)$	99,97
	2	$\Delta G = 96,9922^* + 2096,9898^* \exp(-1,1390^* U_e)$	99,97	$\Delta G = 91,9660^* + 1538,8994^* \exp(-1,0324^* U_e)$	99,98
	3	$\Delta G = 66,6016^* + 941,7578^* \exp(-0,9789^* U_e)$	99,99	$\Delta G = 77,7580^* + 1217,4900^* \exp(-1,0307^* U_e)$	99,99
ME	0	$\Delta G = 98,4384^* + 313,0786^* \exp(-0,7412^* U_e)$	99,92	$\Delta G = 113,2453^* + 391,9881^* \exp(-0,7795^* U_e)$	99,91
	1	$\Delta G = 106,9262^* + 331,6674^* \exp(-0,7741^* U_e)$	99,98	$\Delta G = 117,4704^* + 376,0686^* \exp(-0,7877^* U_e)$	99,98
	2	$\Delta G = 109,5534^* + 237,6650^* \exp(-0,6866^* U_e)$	99,99	$\Delta G = 118,6009^* + 260,1271^* \exp(-0,6909^* U_e)$	99,99
	3	$\Delta G = 106,6262^* + 207,8330^* \exp(-0,7309^* U_e)$	99,96	$\Delta G = 114,6520^* + 224,3190^* \exp(-0,7326^* U_e)$	99,96

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

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”.

3.3.6 Compensação entalpia-entropia

A temperatura isocinética e a energia livre de Gibbs à temperatura isocinética, para a adsorção, foram determinadas, sendo os valores com um intervalo de confiança de 99 % apresentados na Tabela 3.14.

Tabela 3.14. Temperatura isocinética (T_B) e energia livre de Gibbs à temperatura isocinética (ΔG_B) para a avaliação da teoria da compensação entalpia-entropia dos grãos de café arábica e conilon, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes

<i>Café Arábica</i>				
Gran.	MC		ME	
	T_B (K)	ΔG_B (kJ kg ⁻¹)	T_B (K)	ΔG_B (kJ kg ⁻¹)
Inteira	54,80 ± 10,28	-2450,41	194,73 ± 5,66	-2466,33
Fina	477,25 ± 128,61	-2582,42	174,29 ± 22,26	-2410,32
Média	601,88 ± 112,49	-2559,74	68,36 ± 11,78	-2428,96
Grossa	94,86 ± 43,43	-2506,62	567,67 ± 150,33	-2343,79
<i>Café Conilon</i>				
Gran.	MC		ME	
	T_B (K)	ΔG_B (kJ kg ⁻¹)	T_B (K)	ΔG_B (kJ kg ⁻¹)
Inteira	174,82 ± 13,95	-2469,36	25,82 ± 2,91	-2446,99
Fina	768,90 ± 516,31	-2710,43	183,15 ± 12,52	-2479,41
Média	434,73 ± 41,46	-2547,20	112,58 ± 10,69	-2467,04
Grossa	490,92 ± 67,55	-2557,00	60,73 ± 4,81	-2454,45

A fim de se validar a teoria da compensação entalpia-entropia, a temperatura isocinética deve ser comparada com a média harmônica (T_{hm}) da faixa de temperatura utilizada para a determinação das isotermas de sorção. A T_{hm} calculada foi de 292,82 K.

Tendo em vista os dados da Tabela 3.14, pode-se confirmar que a dependência linear apresentada pelas variações de entalpia e entropia das amostras, independentemente da espécie em questão, do nível de torrefação e da granulometria empregada, pode ser aplicada à teoria da compensação entalpia entropia, uma vez que $T_B \neq T_{hm}$. Entretanto, para a amostra de café conilon torrado à média clara e moído fina,

a teoria de compensação entalpia-entropia não pôde ser validada, já que o valor de T_{hm} está dentro da faixa de T_B . Na amostra relatada, a teoria da compensação entalpia-entropia não é válida possivelmente pelos valores encontrados de ΔS para esta amostra (Figura 3.12 C), em que estiveram ao redor de zero.

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, verifica-se que o mecanismo de sorção da água no café torrado pode ser controlado tanto pela entalpia como pela entropia, sendo que há maior número de amostras controladas pela entropia (10) que pela entalpia (5).

Baptestini (2011) avaliando a sorção de café torrado e moído em diferentes embalagens e Goneli *et al.* (2013) trabalhando com frutos de café em diferentes processamentos concluíram que seus respectivos processos foram controlados por entalpia. Já Zúñiga; Moyano; Pedreschi (2008) avaliando a sorção de água em fatias de batata e Botelho (2012) verificando a sorção de frutos de café conilon concluíram que seus respectivos processos são controlados por entropia.

3.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições em que foi realizado o experimento, conclui-se que:

1. A atividade de água do café torrado, independentemente da espécie avaliada, do nível de torrefação e da granulometria, aumentou ao longo do armazenamento;
2. Os cafés torrados em nível moderadamente escuro apresentaram uma maior higroscopicidade com relação aos cafés torrados ao nível média clara;
3. O modelo de Sigma-Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café em dois níveis diferentes de torrefação, nas distintas condições granulométricas;
4. O teor de água de equilíbrio do café torrado reduziu com o aumento da temperatura para um dado valor de atividade de água;
5. A redução do teor de água provocou aumento da energia liberada pela sorção da água no produto, representada pelos valores de entalpia diferencial de sorção;
6. A diminuição do teor de água levou ao aumento dos valores da entropia diferencial de sorção;
7. A teoria da compensação entalpia-entropia foi satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. E. Enthalpy–entropy compensation in sorption phenomena: application to the prediction of the effect of temperature on food isotherms. **Journal of Food Science**, Malden, v. 51, n. 6, p. 1547–1549, 1986.

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**, Filadélfia, v. 62, n. 2, p. 135-142, 2004.

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**, Washington, v. 51, n. 24, p. 7034-7039, 2003.

ANESE, M.; MANZOCCO, L.; NICOLI, M. C. Modeling the secondary shelf life of ground roasted coffee. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 54, n. 15, p. 5571-5576, 2006.

BAPTESTINI, F. M. **Efeito da granulometria e da embalagem na sorção de água pelo café torrado e moído**. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.

BELL, R. P. Relations between the energy and entropy of solution and their significance. **Transactions of the Faraday Society**, v. 33, p. 496–501, 1937.

BERISTAIN, C. I.; GARCIA, H. S.; AZUARA, E. Enthalpy-entropy compensation in food vapor adsorption. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 30, n. 3-4, p. 405–415. 1996.

BICHO, N. C.; LEITÃO, A. E.; RAMALHO, J. C.; LIDON, F. C. Use of colour parameters for roasted coffee assessment. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 32, n. 3, p. 436-442, 2012.

BOTELHO, F. M. **Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de *Coffea canephora***. 141 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2012.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.

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

BRUNAUER, S. **The Adsorption of Gases and Vapors**. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1945.

CARDELLI, C.; LABUZA, T. P. Application of Weibull Hazard Analysis to the determination of the shelf life of roasted and ground coffee. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 34, p. 273-278, 2001.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; SANTOS, E. S. Thermodynamic properties of agricultural products processes. In: I. Arana (Ed.). **Physical properties of foods: Novel measurement techniques and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 131-141.

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, 2000.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1998. 736 p.

GOKMEN, V.; SERPEN, A. Equilibrium and kinetic studies on the adsorption of dark colored compounds from apple juice using adsorbent resin. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 53, n. 3, p. 221–227, 2002.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 50, p. 386-391, 2013.

KOYUNCU, H.; KUL, A. R.; ÇALIMLI, A.; YILDIZ, N.; CEYLAN, H. Adsorption of dark compounds with bentonites in apple juice. **LWT - Food Science and Technology**, Filadélfia, v. 40, n. 3, p. 489–497, 2007.

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**, Washington, v. 80, n. 21, 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**, Washington, v. 80, n. 21, p. 2341–2351, 1976b.

LABUZA, T. P.; ALTUNAKAR, B. Water Activity Prediction and Moisture Sorption Isotherms. In: BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; FONTANA JR., A. J.; SCHMIDT, S. J.; LABUZA, T. P. (Eds.). **Water Activity in Foods: Fundamentals and Applications**. Ames: Blackwell Publishing Professional, 2007. p. 109-154.

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**, Washington, v. 101, n. 3, p. 673–695, 2001.

- MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841 p.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. John Wiley & Sons, 2006. 831p.
- NKOLO MEZE'E, Y. N.; NOAH NGAMVENG, J.; BARDET, S. Effect of enthalpy–entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: the case of bubinga (*Guibourtia Tessmanii* J. L'Éonard; *G. Pellegriniana* J.L.). **Thermochimica Acta**, Filadélfia, v. 468, p. 1–5, 2008.
- PALIPANE, K. B.; DRISCOLL, R. H. Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 18, n. 1, p. 63-76, 1992.
- PIMENTA, T. V.; PEREIRA, R. G. F. A.; CORRÊA, J. L. G.; SILVA, J. R. Roasting processing of dry coffee cherry: influence of grain shape and temperature on physical, chemical and sensorial grain properties. **Boletim do CEPPA**, Campinas, v. 27, n. 1, p. 97-106, 2009.
- PITTIA, P.; NICOLI, M. C.; SACCHETTI, G. Effect of moisture and water activity on textural properties of raw and roasted coffee beans. **Journal of Texture Studies**, Malden, v. 38, n. 1, p. 116-134, 2007.
- RIZVI, S. S. H. Thermodynamic Properties of Foods in Dehydration. In: RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. (Ed.). **Engineering Properties of Foods**. Nova Iorque: CRC Press, 2005. p. 239-326.
- SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHIERE, F.; DE MEULENAER, B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J. M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 79, n. 1, p. 168-175, 2007.
- SCHMIDT, C. A. P.; MIGLIORANZA, É.; PRUDÊNÇIO, S. H. Interação da torra e moagem do café na preferência do consumidor do oeste paranaense. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 4, p. 1111-1117, 2008.
- VARGAS-ELÍAS, G. A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.
- VIGANÓ, J.; AZUARA, E.; TELIS, V. R. N.; BERISTAIN, C. I.; JIMÉNEZ, M.; TELIS-ROMERO, J. Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. **Thermochimica Acta**, Filadélfia, v. 528, p. 63–71, 2012.
- WANG, N.; BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 14, n. 4, p. 269–287, 1991.

ZÚÑIGA, R. N.; MOYANO, P. C.; PEDRESCHI, F. Enthalpy–entropy compensation for water loss of potato slices during deep-fat frying. **Journal of Food Engineering**, Filadélfia, v. 88, n. 1, p.1–8, 2008.

CAPÍTULO 4

Propriedades de fluxo de café torrado em diferentes granulometrias durante o armazenamento

4.1 INTRODUÇÃO

O agronegócio vem ao longo dos anos aumentando sua participação no PIB do Brasil, impactando diretamente no número de empregos diretos e indiretos, contribuindo para o aumento da renda mensal do brasileiro. Dentre os diversos produtos agrícolas, o café destaca-se tanto nesses termos sociais como em termos históricos, pois foi, juntamente com a cana-de-açúcar, responsável pelo desenvolvimento inicial do Brasil.

Nos primórdios do Brasil colônia, a produção de café se concentrava na Bahia, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Minas Gerais (BARTH, 2009). Atualmente, esta cultura se adaptou no Espírito Santo, em alguns Estados da região Norte e no Cerrado (BORTOLIN, 2005), impulsionando a melhoria de infraestrutura de colheita e pós-colheita e fixando habitantes nessas localidades. Entretanto, há ainda dificuldades relativas ao escoamento de produtos nessas regiões devido às dificuldades de transporte adequado e distância aos centros consumidores e aos portos.

Por essa razão, grande parte da comercialização brasileira de café se dá na forma de grãos verdes ou crus, obtidos por meio do descascamento, limpeza e secagem dos frutos de café. Segundo a ABIC (2012), o café verde responde por 88,5 % do valor total exportado, seguido por café solúvel (10,8 %) e café torrado e moído (0,3 %). Assim, nota-se a perda do potencial de valor agregado ao café para os produtores e profissionais

atuantes na cadeia do agronegócio cafeeiro, uma vez que estes não realizam o restante do processamento por falta de capital, técnicas inadequadas e dificuldades no transporte e manuseio do produto pulverulento, caso do café torrado e moído. Ademais, o manuseio de materiais é um importante fator na operação rotineira das indústrias processadoras de café, podendo afetar consideravelmente a qualidade do produto, influenciando diretamente no custo da operação e no lucro da empresa (ROBBERTS, 2002).

Para realizar o transporte e manuseio do café torrado e moído entre o local de produção e o de consumo/exportação de maneira satisfatória, bem como realizar a movimentação do produto dentro da unidade beneficiadora, o conhecimento de algumas propriedades de fluxo do produto são de extrema valia. Caso estas propriedades não sejam conhecidas, problemas durante a movimentação do produto poderão ocorrer, aumentando o custo final e o risco de danos ao produto, além de acidentes ao pessoal envolvido. Este custo da movimentação e manuseio dos produtos pode alcançar até 50 % do valor total da manufatura do produto final (ROBBERTS, 2002). Sendo assim, busca-se o menor número de movimentações necessárias com máxima eficiência na operação.

Caso estudos relativos às propriedades de fluxo não sejam realizados, poderá ocorrer a concepção de projetos inadequados de equipamentos, podendo resultar no não escoamento dos produtos (JENIKE, 1964; JENIKE & JOHANSON, 1979). Segundo Silva *et al.* (2008), é de extrema importância o conhecimento das propriedades de fluxo dos produtos armazenados, as quais exercem importante papel no comportamento de pressões e fluxos nos equipamentos de movimentação. Estes são necessários dentro da linha de processamento de café, já que a saída do produto final requer a movimentação de diferentes matérias-primas, nos diferentes níveis de processamento. Knowlton *et al.* (1994) relatam que a determinação dessas propriedades é importante por proporcionar conhecimento adequado às operações industriais como fluxo em tremonhas e silos, dosagem, transporte e empacotamento.

Diferentes fatores interferem nas propriedades de fluxo de café, tais como a torrefação, a moagem e o armazenamento. No entanto, este último não é indicado para produtos pulverulentos devido à moagem promover o rompimento das células e, portanto, possibilitar uma maior perda dos constituintes e da qualidade dos produtos. Porém, o estudo das propriedades de fluxo do café torrado e moído ao longo do armazenamento se justifica em razão às possíveis dificuldades de mercado. Dentre

estas, pode-se citar a necessidade de armazenar o produto já processado devido à falta de transporte, preços que inviabilizem a comercialização imediata e também a necessidade de formulação de *blends*.

Especificamente para as estruturas de armazenagem, o conhecimento das propriedades de fluxo do café em contato com determinado material que compõe estas estruturas é importante para o projeto correto das mesmas. Dentre as principais propriedades de fluxo, podem-se destacar os coeficientes de atrito interno e externo, o ângulo de atrito interno, o efetivo ângulo de atrito interno, o ângulo de atrito com a parede e o coeficiente K.

Os coeficientes de atrito interno e externo são fundamentais para assegurar o projeto racional e seguro de equipamentos de transporte, de processamento e de armazenamento (MOHSENIN, 1986). O atrito externo é o atrito entre o produto armazenado e o material da parede do silo ou equipamento, ao passo que o interno é o atrito do produto armazenado um contra o outro (grão/grão) (BOUMANS, 1985). Segundo Silva *et al.* (2003), estas propriedades desempenham um importante papel no comportamento de pressões e fluxo em silos.

O ângulo de atrito interno é o ângulo entre as forças normais e tensões cisalhantes de um dado estado de tensões de um ponto. Ele é proporcional à força normal sobre os grãos, sendo a força contrária constituída por uma mistura de pressões de escorregamento e de rolamento entre grãos (GAGGERO; TREIN; IPPOLITI, 2002). Nascimento e Calil Junior (2008) relatam que este ângulo está intimamente ligado às condições internas do produto armazenado, dependendo do nível de pressões médias aplicado a todos os grãos.

Segundo Naka (2010), para o cálculo da inclinação da tremonha, de modo a se evitar a formação de obstruções que venham a impedir o correto escoamento do produto armazenado, são necessários os valores do ângulo de atrito interno e do efetivo ângulo de atrito interno. Este último é o ângulo formado pela reta que passa pela origem com o eixo das tensões normais.

O coeficiente K é definido como a relação entre a pressão horizontal e a vertical em qualquer ponto de uma massa granular, sendo também conhecido como coeficiente de pressão lateral. O coeficiente K é um dos parâmetros necessários para o cálculo das pressões que o produto exerce sobre as paredes e o fundo de um silo.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho avaliar e determinar algumas propriedades de fluxo (coeficientes de atrito interno e externo, ângulo de atrito interno,

efetivo ângulo de atrito interno, ângulo de atrito com a parede e o coeficiente K) do café ao longo do armazenamento, bem como avaliar a influência de diferentes níveis de torra e granulometria sobre essas propriedades.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Propriedades Físicas e Qualidade de Produtos Agrícolas pertencente ao Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem (CENTREINAR), localizado na Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, Minas Gerais, MG; e no Laboratório de Madeiras e Estruturas de Madeiras da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos-SP.

4.2.1 *Matéria-prima*

Foram utilizados grãos de café cru (*Coffea canephora* e *Coffea arabica*), descascados e secos, adquiridos de comércio regional da Zona da Mata de Minas Gerais.

Os grãos foram submetidos a uma triagem para eliminar os grãos deteriorados, danificados e brocados, a fim de se obter uma matéria-prima homogênea e com o mínimo de defeitos. Grãos provenientes de frutos de bica corrida foram utilizados.

O teor de água médio inicial dos grãos foi de 12,61 % (b.s.), tendo sido determinado pelo método gravimétrico, utilizando uma estufa com circulação forçada de ar a 105 ± 1 °C por 24 h (BRASIL, 2009).

4.2.2 *Preparo das amostras*

Os grãos de café de ambas as espécies, após a triagem, foram encaminhadas para o processo de torrefação. Para isso, foi utilizado um torrefador de queima direta de gás GLP, com cilindro em movimento rotativo a 45 rpm, com pré-aquecimento e capacidade de 350 g de café cru (Figura 4.1).



Figura 4.1. Torrefador de quatro cilindros rotativos com queima de gás direto.

O nível de cada torrefação dos grãos de café foi identificado por meio do acompanhamento e comparação da cor das amostras com o número padrão de cor Agrtron, assessorado por um profissional treinado. Dois níveis de torra foram obtidos: média clara (MC) e moderadamente escura (ME), cujos números Agrtron correspondentes são, respectivamente, SCAA#65 e SCAA#45 (Figura 4.2).



Figura 4.2. Níveis de torra empregados: média clara (A) e moderadamente escura (B).

Para garantir a uniformidade das torras, foi utilizado o parâmetro perda de massa, em que, para a temperatura utilizada de 285 °C, os grãos perderam, em média, 15,85 e 18,74 gramas de massa, respectivamente para as torras MC e ME (VARGAS-ELÍAS, 2011). Para se atingir estas perdas de massa, foram realizados testes com a temperatura do torrefador e o tempo de torrefação. Ao atingir os dois níveis de torra mencionados, o produto foi retirado do torrefador e imediatamente esfriado utilizando-se ar ambiente.

Após o processo de torrefação, os grãos foram processados em moinho Mahlkönig, em três granulometrias diferentes: fina (0,59 mm), média (0,84 mm) e grossa (1,19 mm), além de mantido o lote de café inteiro.

As amostras preparadas foram então colocadas em sacos de polipropileno e mantidas em câmaras tipo B.O.D. em duas temperaturas de armazenamento (10 e 30 °C). As mesmas foram analisadas durante seis meses, em cinco tempos distintos (0, 30, 60, 120 e 180 dias).

4.2.3 *Ensaio de cisalhamento*

A determinação das propriedades de fluxo do café torrado inteiro e moído foi realizada utilizando-se um equipamento de cisalhamento modelo TSG 70/140, construído com base no aparelho de cisalhamento de Jenike (Figura 4.3). A metodologia empregada foi a proposta por Milani (1993), sendo que, para a execução do ensaio, foram utilizadas as recomendações da norma inglesa – BMHB (1985), Jenike e Johanson (1979) e o Manual de Operação da Máquina TSG 70-140.



Figura 4.3 – Aparelho de cisalhamento direto Jenike TSG 70/140.

O ensaio consiste na aplicação de uma força normal sobre a célula que mantém o produto, medindo-se a força necessária para cisalhar a amostra. A célula de cisalhamento tem forma circular e é composta pela base, anel e tampa (Figura 4.4). A força normal é obtida por meio de anilhas de aço sobre um pendural (*hanger*) que se apoia no centro da tampa. O aparelho de cisalhamento direto de Jenike promove a ação do cisalhamento movendo-se horizontalmente a uma velocidade entre 1 e 3 mm min⁻¹, tracionada através da tampa.

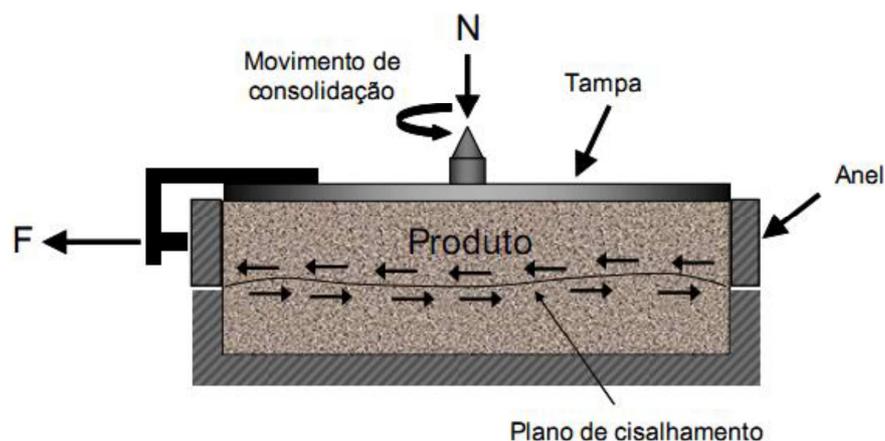


Figura 4.4. Célula de cisalhamento.

Para o ensaio de cisalhamento, são necessárias duas etapas: a primeira é a preparação da amostra, e na segunda é feita a medição real das tensões de cisalhamento. A primeira parte tem como objetivo preparar a consolidação crítica da amostra para o desenvolvimento de uma zona de cisalhamento, dentro da qual ocorra fluxo de estado estável, onde a densidade e a tensão de cisalhamento permanecem constantes durante o teste. Esta parte é chamada de pré-cisalhamento. Na segunda parte do teste, as tensões de cisalhamento são medidas com valores de cargas normais, determinando as forças de cisalhamento necessárias para o deslizamento do produto. Esta parte do ensaio é chamada de cisalhamento.

Para que ocorra a primeira parte do teste, foram realizadas 25 rotações para se atingir a condição de fluxo estável. Em seguida, a tampa de cisalhamento foi colocada sobre a superfície dos grãos compactados durante a primeira parte do teste. Logo depois, ela foi carregada com pendural de pesos, e o teste de cisalhamento realizado a velocidade de 2 mm min⁻¹ pelo avanço da haste de força, registrando-se a força de

cisalhamento. A Figura 4.5 apresenta a posição da célula de cisalhamento nestas duas etapas do ensaio.

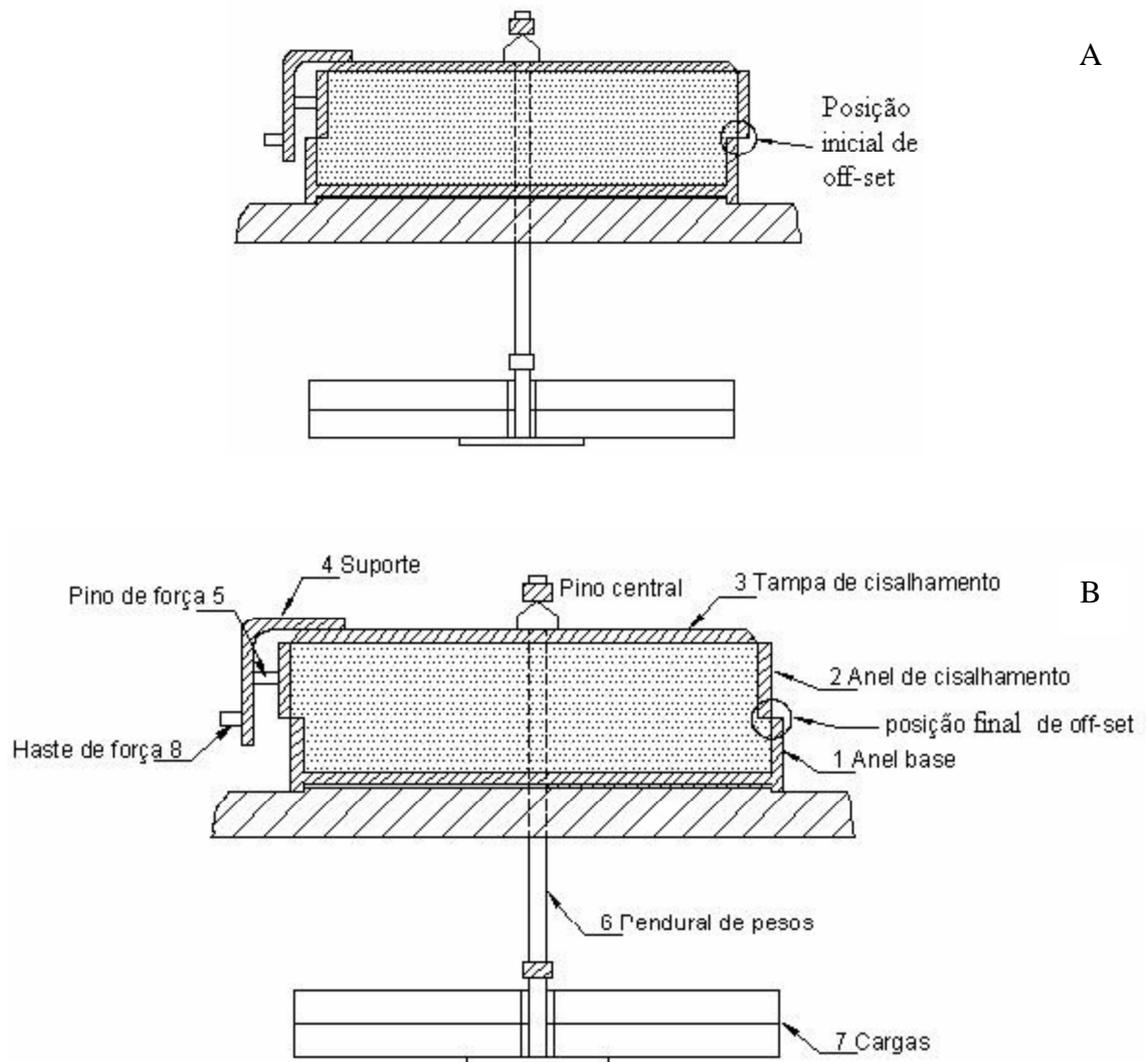


Figura 4.5. Célula de cisalhamento de Jenike na posição inicial (A) e final (B). Fonte: Milani (1993)

Os resultados dos ensaios de cisalhamento são apresentados graficamente em um diagrama de tensão normal (σ) e tensão de cisalhamento (τ) (Figura 4.6).

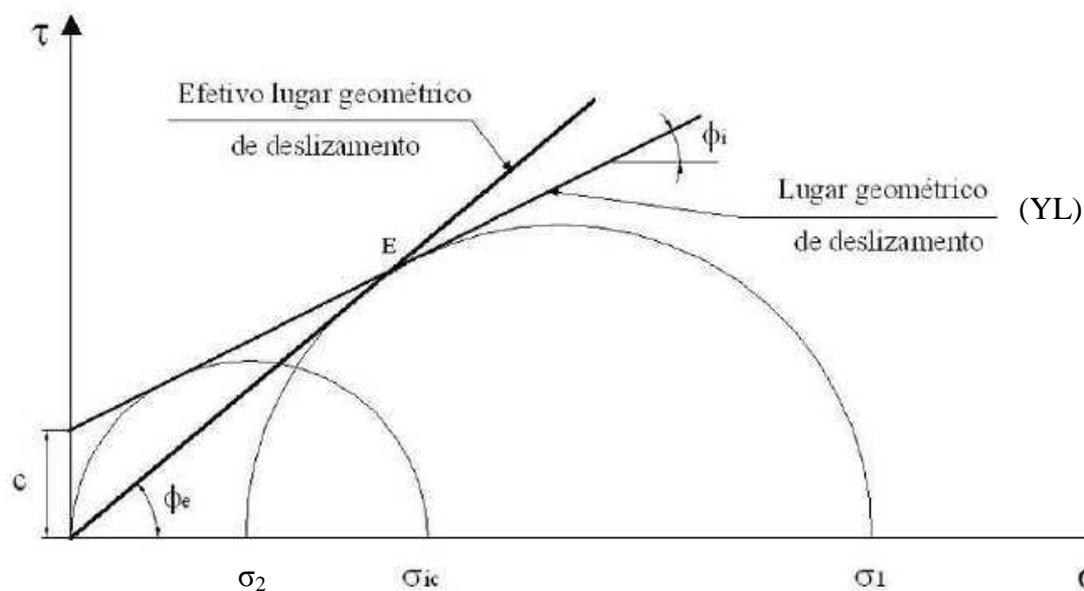


Figura 4.6. Diagrama de tensões normais e de cisalhamento. Fonte: Silva (2003), com adaptações.

Um produto armazenado em um silo sofre pressões que causam consolidação e fornecem resistência, sendo que as pressões mais importantes ocorrem durante o fluxo, isto é, durante a deformação contínua do produto acima de seu limite elástico. Considerando um elemento do produto armazenado em um silo (Figura 4.7), σ_1 e σ_2 são, respectivamente, a maior e a menor tensão de consolidação e são indicadas pelo maior semicírculo de Mohr da Figura 4.6. Se o elemento para esta condição é cisalhado em várias cargas normais, então é obtido o lugar geométrico de deslizamento (YL) (Figura 4.6). O semicírculo de Mohr, através da origem, define a tensão de deslizamento inconfina (σ_{ic}), que representa a resistência do material em uma superfície livre. Estendendo o lugar geométrico para interceptar o eixo τ , é definida a coesão aparente c (Figura 4.6).

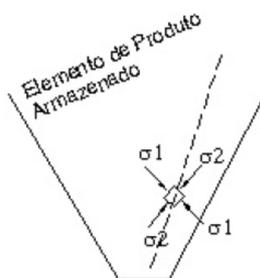


Figura 4.7. Diagrama de tensões normais e de cisalhamento. Fonte: Silva (2003)

Os níveis das cargas normais utilizadas no teste de cisalhamento estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Níveis de cargas utilizadas nas etapas de pré-cisalhamento (W_P) e cisalhamento (W_S) da amostra, para determinação dos lugares geométricos (YL)

YL 1		YL 2		YL 3	
W_P (N)	W_S (N)	W_P (N)	W_S (N)	W_P (N)	W_S (N)
100	70	70	50	50	35
100	50	70	35	50	20
100	35	70	20	50	10

4.2.4 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

O ângulo formado pela linha reta do lugar geométrico de deslizamento e a horizontal corresponde ao ângulo de atrito interno (ϕ_i) (Figura 4.6). Refere-se às condições internas do produto armazenado, dependendo do nível de pressões médias aplicado a todos os grãos. O aumento das pressões de confinamento irá tornar a amostra do produto mais densa. Dessa forma o ângulo de atrito interno aumenta com o peso específico ou com a diminuição do índice de vazios.

O efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) é obtido de forma igual ao ϕ_i , quando consideramos o produto de fluxo livre. Na prática, o ϕ_e é sempre construído com uma linha entre a origem e a interseção com o maior semicírculo de Mohr (Figura 4.6).

4.2.5 Ângulo de atrito com a parede

O ângulo de atrito que o café faz com a parede (ϕ_w) é o ângulo formado pela linha reta do lugar geométrico de deslizamento com a parede e a horizontal. Para medir o ângulo de atrito com a parede, a base da célula de cisalhamento foi substituída por uma amostra de diferentes materiais: aço rugoso, madeira e concreto (Figura 4.8).

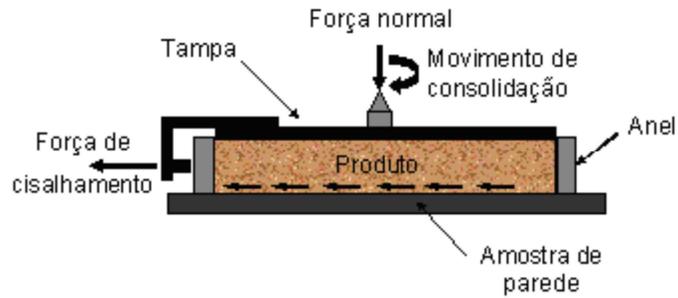


Figura 4.8. Montagem de ensaio de atrito com a parede.

O produto contido na parte superior da célula de cisalhamento foi cisalhado sobre a amostra do material, sob diferentes tensões normais de 50, 40, 30, 20, 10 e 0 N e os valores das tensões de cisalhamento foram medidos.

4.2.6 Coeficientes de atrito interno e externo

Os coeficientes de atrito interno e externo do café torrado inteiro e moído em suas diferentes condições (nível de torra, granulometria e tempo de armazenamento) foram determinados matematicamente pelas Equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$\mu_i' = \tan \phi_i \quad (4.1)$$

$$\mu_e' = \tan \phi_w \quad (4.2)$$

em que:

ϕ_i = ângulo de atrito interno, grau;

ϕ_w = ângulo de atrito com a parede, grau;

μ_i' = coeficiente de atrito interno, adimensional.

μ_e' = coeficiente de atrito externo, adimensional.

4.2.7 Função fluxo

A função fluxo (FF) é a pressão ou resistência de deslizamento inconfina (σ_{ic}), sendo uma medida da resistência do produto em fluir em uma superfície livre, apresentando a função da máxima pressão de consolidação. Assim, devido a esta

propriedade, o produto é capaz de formar um arco estável ou efeito tubo (CALIL JÚNIOR, 1990). Ela é definida pela Equação 4.3.

$$FF = \frac{\sigma_l}{\sigma_{lc}} \quad (4.3)$$

em que:

FF = função fluxo, adimensional;

σ_l = tensão máxima de consolidação, kPa; e,

σ_{lc} = resistência inconfina de deslizamento, kPa.

4.2.8 Coeficiente K

A norma alemã DIN 1055-6 de 2005 define o valor de K pela expressão de Jaky, considerando um coeficiente de ponderação igual a 1,2 (Equação 4.4), sendo esta equação a que melhor se aproxima aos dados experimentais do coeficiente K , conforme concluído por Nascimento e Calil Junior (2009).

$$K = 1,2(1 - \sin \phi_e) \quad (4.4)$$

em que:

K = coeficiente de pressão lateral, adimensional; e,

ϕ_e = efetivo ângulo de atrito interno do produto, grau.

Segundo a DIN 1055-6, o fator 1,2 foi escolhido para garantir que em pequenas alturas do produto armazenado, ou seja, na parte superior do silo, resultem curvas de pressões mais completas.

4.2.9 Análise estatística

O trabalho foi realizado em dois experimentos: um tendo como matéria-prima grãos de café da espécie *Coffea arabica* L. e o outro utilizando grãos de café da espécie *Coffea canephora* Pierre. Cada experimento foi instalado em um esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas o tempo de armazenamento e nas subparcelas um

fatorial $2 \times 4 \times 2$ (dois níveis de torrefação, quatro níveis de granulometria e duas temperaturas de armazenamento), com o número de repetições diferente para cada variável resposta analisada.

Os dados experimentais das propriedades de fluxo analisadas em cada tempo de armazenamento foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey adotando-se um nível de 5 % de probabilidade. Para o tempo de armazenamento os modelos foram escolhidos baseados na significância dos coeficientes de regressão utilizando-se o teste “t”, adotando-se o nível de 1, 5 e 10 %, no coeficiente de determinação, R^2 (obtido pela relação entre a soma de quadrado da regressão e a soma de quadrado do tratamento) e no comportamento em estudo.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.3.1 Ângulo de atrito interno (ϕ_i) e efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e)

Nas Figuras 4.9 e 4.10 pode-se observar a variação dos valores de ângulo de atrito interno (ϕ_i) de café torrado, inteiro e moído, em função do tempo de armazenagem, respectivamente para *Coffea arabica* e *Coffea canephora*. Já nas Figuras 4.11 e 4.12 é apresentado o comportamento do efetivo ângulo de atrito interno de café torrado, inteiro e moído, em função do tempo de armazenagem, para *Coffea arabica* e *Coffea canephora*, respectivamente.

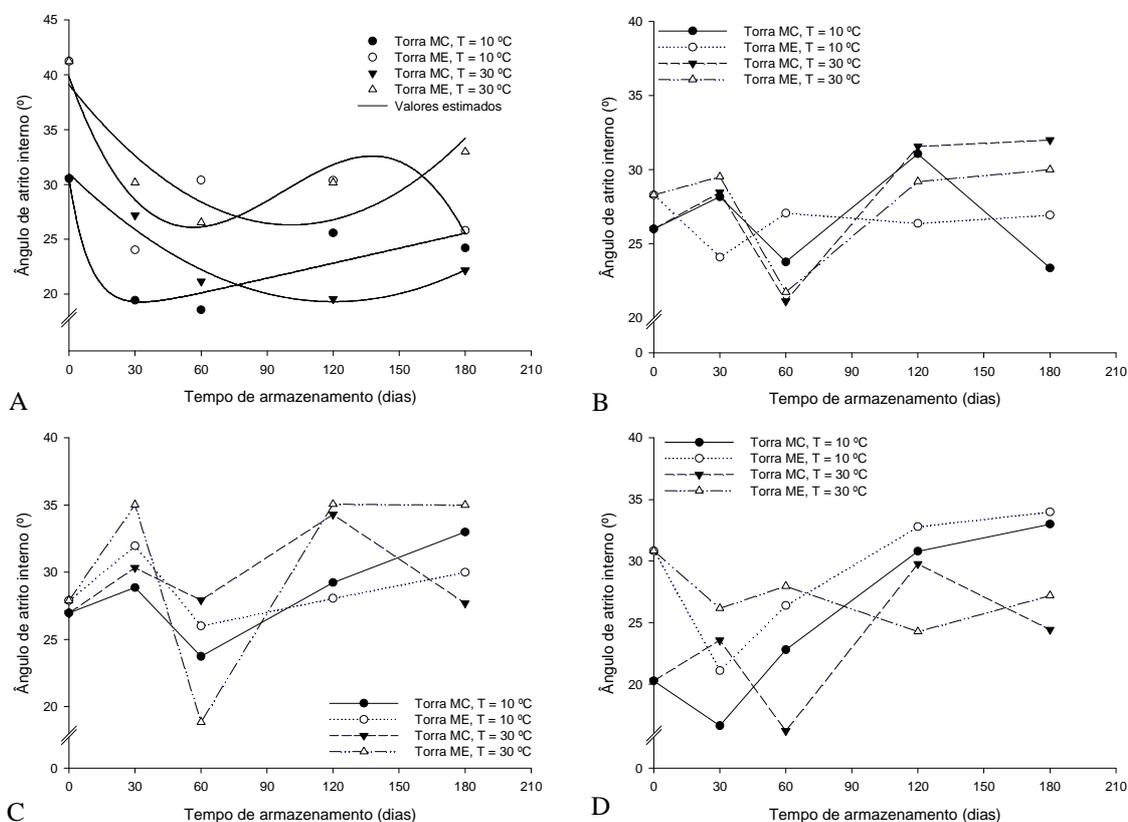


Figura 4.9. Valores médios observados e estimados para o ângulo de atrito interno de *C. arabica* torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

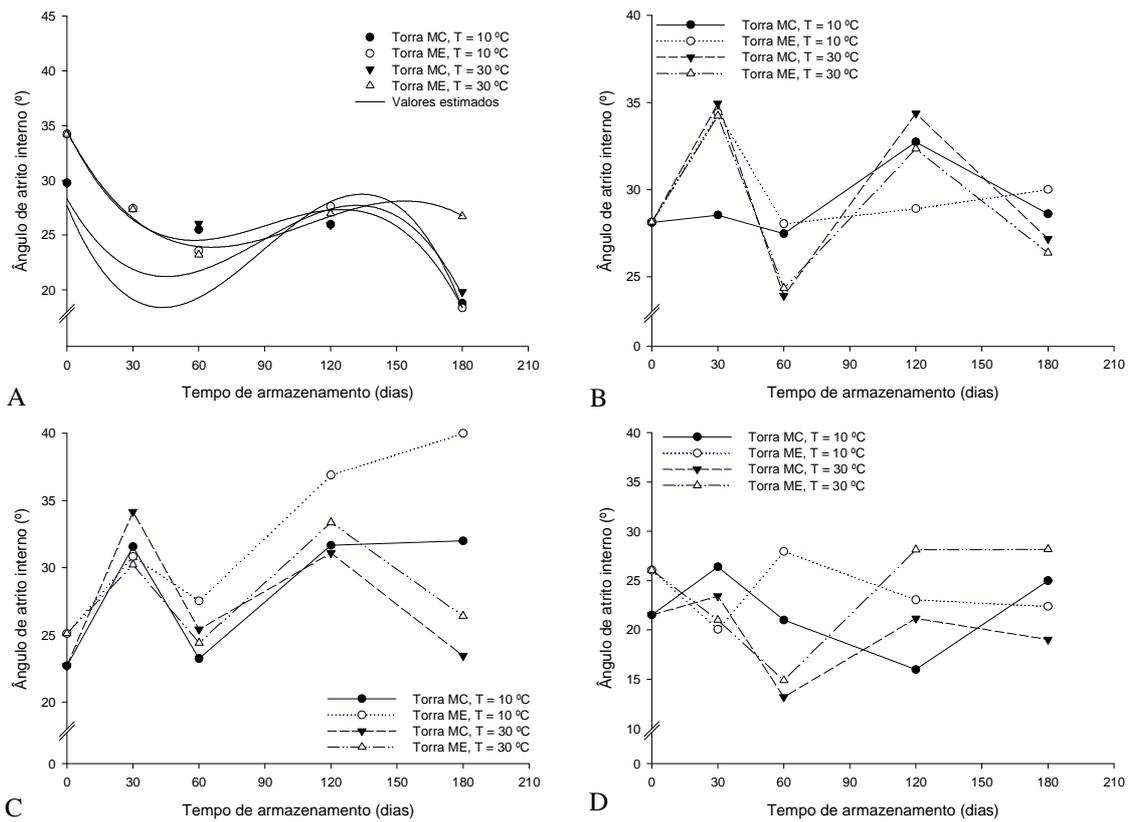


Figura 4.10. Valores médios observados e estimados para o ângulo de atrito interno de *C. canephora* torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

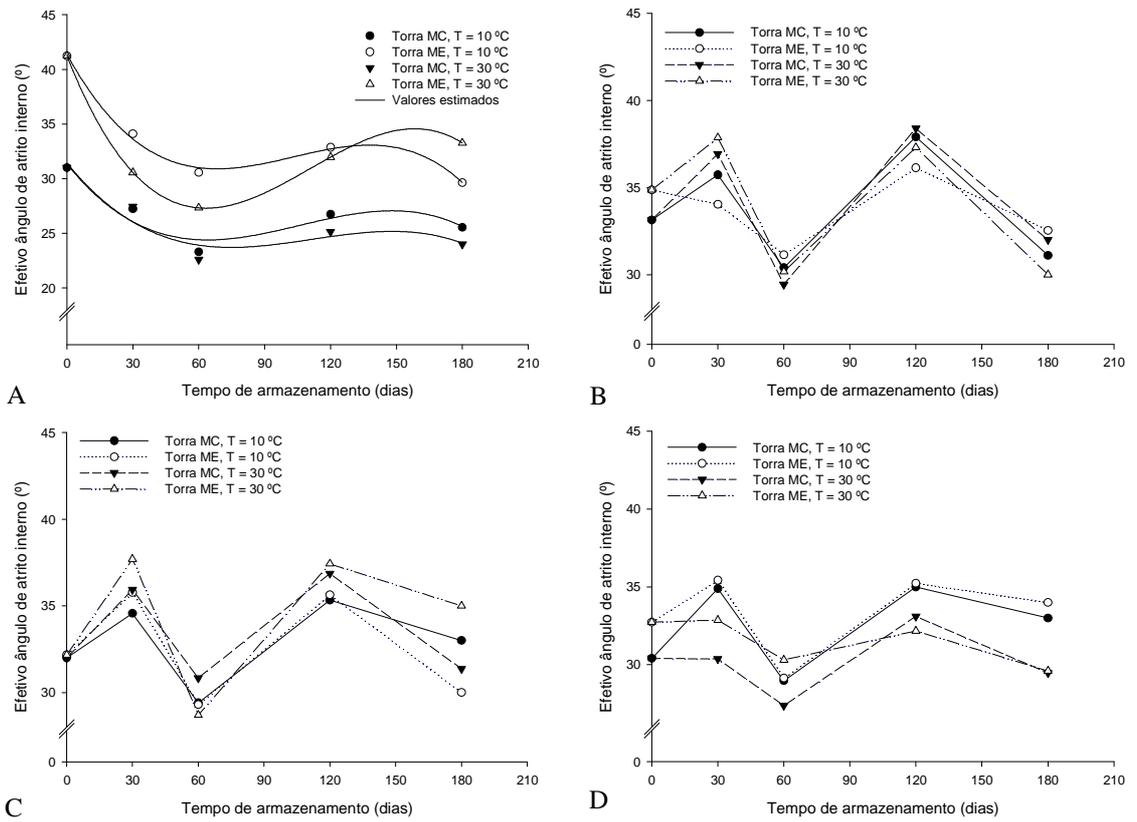


Figura 4.11. Valores médios observados e estimados para o efetivo ângulo de atrito interno de *C. arabica* torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

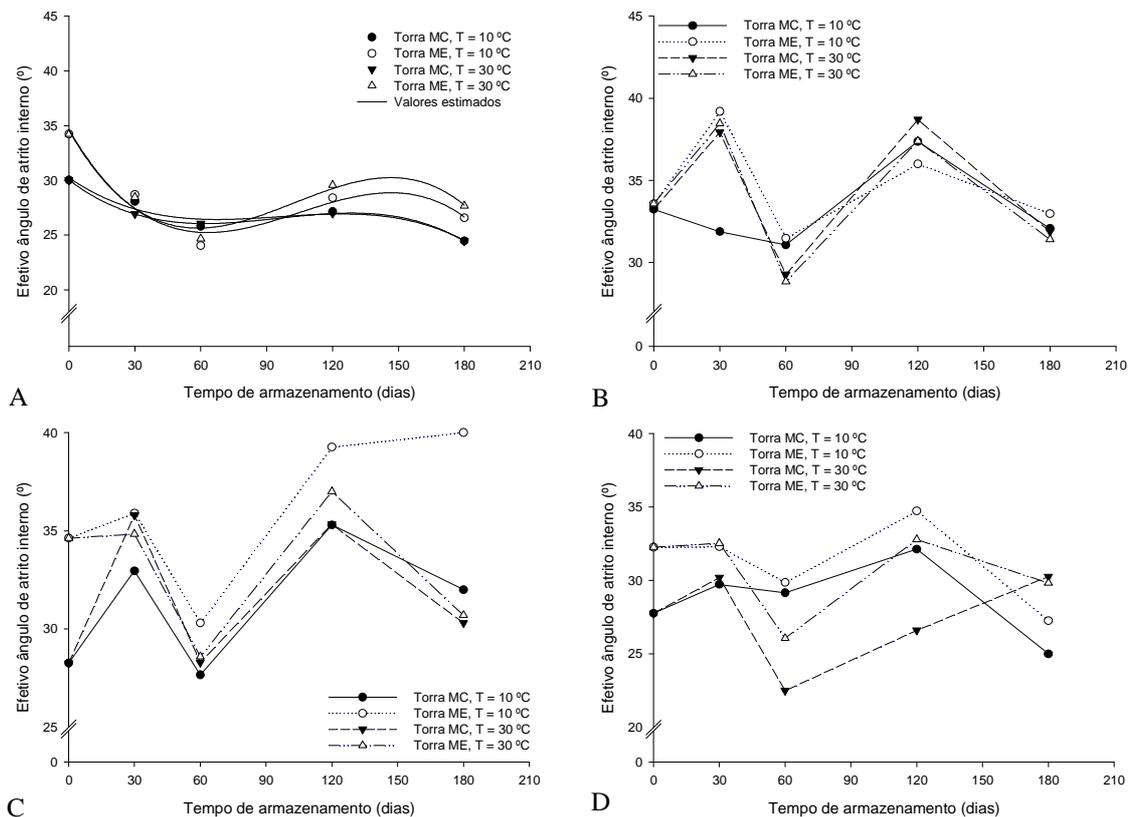


Figura 4.12. Valores médios observados e estimados para o efetivo ângulo de atrito interno de *C. canephora* torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

Observando-se as Figuras 4.9 a 4.12, nota-se que o café torrado inteiro, independentemente da espécie avaliada, apresenta comportamento distinto do café torrado e moído. Ao passo que estes têm um incremento nos valores de ϕ_i e ϕ_e da colheita para os 30 dias de armazenamento, o café torrado inteiro tem um decréscimo a partir da colheita.

Durante os 30 primeiros dias, como o grão de café não foi moído, ele possui maior capacidade de preservar seus constituintes e também seu teor de água devido à barreira física proveniente das células intactas ou com baixo grau de rompimento. Já a moagem permite a quebra dessa barreira, aumentando a velocidade das trocas entre o produto e o ambiente que o envolve, levando ao efeito de aglomeração devido à absorção de água do ambiente. Isto ocorre de maneira abrupta no início devido ao baixo teor de água após a torrefação (produto mais higroscópico), tendo maior absorção de umidade nessa fase. Assim, a aglomeração diminui a escoabilidade do café, aumentando os valores de ϕ_i e ϕ_e .

Ao longo do armazenamento, há aumento e decréscimo de ϕ_i e ϕ_e , com tendência de seus valores se tornarem próximos uns aos outros ao final de 180 dias de armazenamento. Essa variação é explicada por diferentes aspectos. A primeira é de que amostras mais úmidas apresentam uma maior força de coesão entre as partículas ou componentes individuais que compõem a massa, tendendo a agregar estas partículas e, conseqüentemente, aumentando o atrito interno. Outro aspecto é de que, em certos produtos, há um aumento da rugosidade da superfície com maiores teores de água, acarretando em uma maior resistência ao deslizamento de uma partícula da massa de produto contra a outra, conseqüentemente, aumentando ϕ_i e ϕ_e (MOHSENIN, 1986; BARYEH, 2001). De acordo com Duffy e Puri (1996), o comportamento inverso (decréscimo de ϕ_i e ϕ_e) é devido ao fato de que, para teores de água elevados, principalmente para produtos pulverulentos, ocorre a formação de uma camada superficial que atua como um lubrificante durante a aplicação da força de cisalhamento, diminuindo, assim, o atrito interno na zona de cisalhamento.

Analisando-se as Figuras 4.9 a 4.12, observa-se que, quanto maior o tamanho das partículas do café, menores são os valores de ϕ_i e ϕ_e , em um tempo de armazenamento constante. Geldart; Abdullah; Verlinden (2009) reportaram que, quanto maior a partícula, menor é o número total de partículas na massa do produto, diminuindo assim as forças de coesão entre produto/produto.

De modo geral, as amostras mais intensamente torradas (ME) apresentam maiores valores de ϕ_i e ϕ_e durante o período de armazenamento. Segundo Medeiros e Lannes (2010), o maior grau de torrefação acarreta no aumento da friabilidade das partículas do produto, ou seja, estes se tornam mais susceptíveis de se esfarelarem, formando assim partículas menores.

Segundo Calil Junior e Cheung (2007), para produtos granulares o ângulo de atrito interno é aproximadamente igual ao ângulo de atrito efetivo, entretanto, não sendo uma verdade absoluta, pois isto pode depender da forma das partículas e de outros fatores. No presente trabalho estes valores foram distintos.

Em razão ao observado nos valores de ϕ_i e ϕ_e nos 30 primeiros dias de armazenamento para as amostras torradas e que sofreram a moagem, não foi possível adequar equações que representem de maneira satisfatória este comportamento. Assim, na Tabela 4.2 são apresentados os modelos ajustados aos dados observados de ϕ_i e ϕ_e de café torrado e inteiro.

Tabela 4.2. Modelos ajustados aos valores experimentais de efetivo ângulo de atrito interno (ϕ_e) e ângulo de atrito interno (ϕ_i) dos grãos inteiros de *C. arabica* e *C. canephora*, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e armazenados em duas temperaturas, em função do tempo de armazenamento (t), com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2 , %)

<i>Coffea arabica</i>			
Torra	Temperatura (°C)	Equação	R^2
MC	10	$\phi_i = 17,3512 + 13,1847 \exp(-0,1041t) + 0,0455t$	87,59
		$\phi_e = 31,3699^{**} - 0,2549t + 0,0029t^2 - 8,97 \cdot 10^{-6}t^3$	90,81
	30	$\phi_i = 30,9822^* - 0,1943^{**}t + 0,0008^{**}t^2$	96,34
		$\phi_e = 31,4379^{**} - 0,2485t + 0,0025t^2 - 7,48 \cdot 10^{-6}t^3$	90,59
ME	10	$\phi_i = 39,8082^{***} - 0,5631t + 0,0070t^2 - 2,41 \cdot 10^{-5}t^3$	75,87
		$\phi_e = 41,3799^{**} - 0,3672^{***}t + 0,0040^{***}t^2 - 1,30 \cdot 10^{-5}t^3$	99,45
	30	$\phi_i = 39,0836^* - 0,2535^{**}t + 0,0013^{**}t^2$	77,87
		$\phi_e = 41,2281^* - 0,5083^*t + 0,0056^*t^2 - 1,69 \cdot 10^{-5}t^3$	99,99
<i>Coffea canephora</i>			
Torra	Temperatura (°C)	Equação	R^2
MC	10	$\phi_i = 27,6968 - 0,4808t + 0,0073t^2 - 2,75 \cdot 10^{-5}t^3$	51,43
		$\phi_e = 30,2502^{**} - 0,1385t + 0,0016t^2 - 5,50 \cdot 10^{-6}t^3$	94,47
	30	$\phi_i = 28,3272 - 0,3558t + 0,0053t^2 - 1,99 \cdot 10^{-5}t^3$	57,51
		$\phi_e = 30,0393^* - 0,1535^*t + 0,0018^*t^2 - 6,43 \cdot 10^{-6}t^3$	99,99
ME	10	$\phi_i = 34,5518^{**} - 0,4094t + 0,0052t^2 - 1,88 \cdot 10^{-5}t^3$	98,42
		$\phi_e = 34,6369^{**} - 0,3480t + 0,0039t^2 - 1,25 \cdot 10^{-5}t^3$	93,86
	30	$\phi_i = 34,4802^{**} - 0,3759^{***}t + 0,0041t^2 - 1,24 \cdot 10^{-5}t^3$	97,99
		$\phi_e = 34,5570^{**} - 0,3510t + 0,0042t^2 - 1,36 \cdot 10^{-5}t^3$	95,40

* Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste “t”

** Significativo a 5 % de probabilidade pelo teste “t”

*** Significativo a 10 % de probabilidade pelo teste “t”

4.3.2 Ângulo de atrito com a parede

As Figuras 4.13 e 4.14 descrevem o comportamento do ângulo de atrito com o material de parede (ϕ_w) de café torrado, inteiro e moído, em função do tempo de armazenagem, respectivamente para *Coffea arabica* e *Coffea canephora*.

Observa-se que o café torrado inteiro, independentemente da espécie avaliada e do material de parede empregado, apresenta valores inferiores de ϕ_w aos do café torrado e moído, com valores de ϕ_w variando entre 8,1 a 23,0°; 18,3 e 30°; 15,0 e 29,1°; 11,2° e 27,8°; respectivamente para o café inteiro, moído fino, médio e grosso. Este resultado está associado à rugosidade dos grãos de café inteiro. Estas amostras por terem sido preservadas intactas após a torrefação tem menor rugosidade quando comparada com as amostras moídas, uma vez que a moagem acarreta na quebra do produto em partículas menores de formatos distintos, aumentando a aderência do produto ao material de parede e, finalmente, incrementando ϕ_w .

Analisando as Figuras 4.13 e 4.14, verifica-se que, de modo geral, as amostras de café torradas ao nível ME possuem maiores valores de ϕ_w que as amostras torradas ao nível MC. Espera-se que produtos com maiores teores de água (torra MC) apresentem maior dificuldade em escoar, ou seja, tenham maiores valores de ϕ_w . Entretanto, o comportamento inverso foi obtido neste trabalho, possivelmente devido ao aumento da friabilidade das partículas do produto, ou seja, estes se tornam mais susceptíveis de se esfatarem quando torrados mais intensamente, formando assim partículas menores, que por sua vez incrementam a aderência produto/parede (MEDEIROS & LANNES, 2010).

Ainda com relação às Figuras 4.13 e 4.14, percebe-se que quanto menor o tamanho das partículas do café, maiores são os valores de ϕ_w . Lopes Neto *et al.* (2007), avaliando três rações com granulometrias distintas, também concluíram que menores granulometrias levam a maiores valores de ϕ_w , em função do alto contato entre a superfície específica das partículas e parede, aumentando a aderência do produto à superfície das paredes.

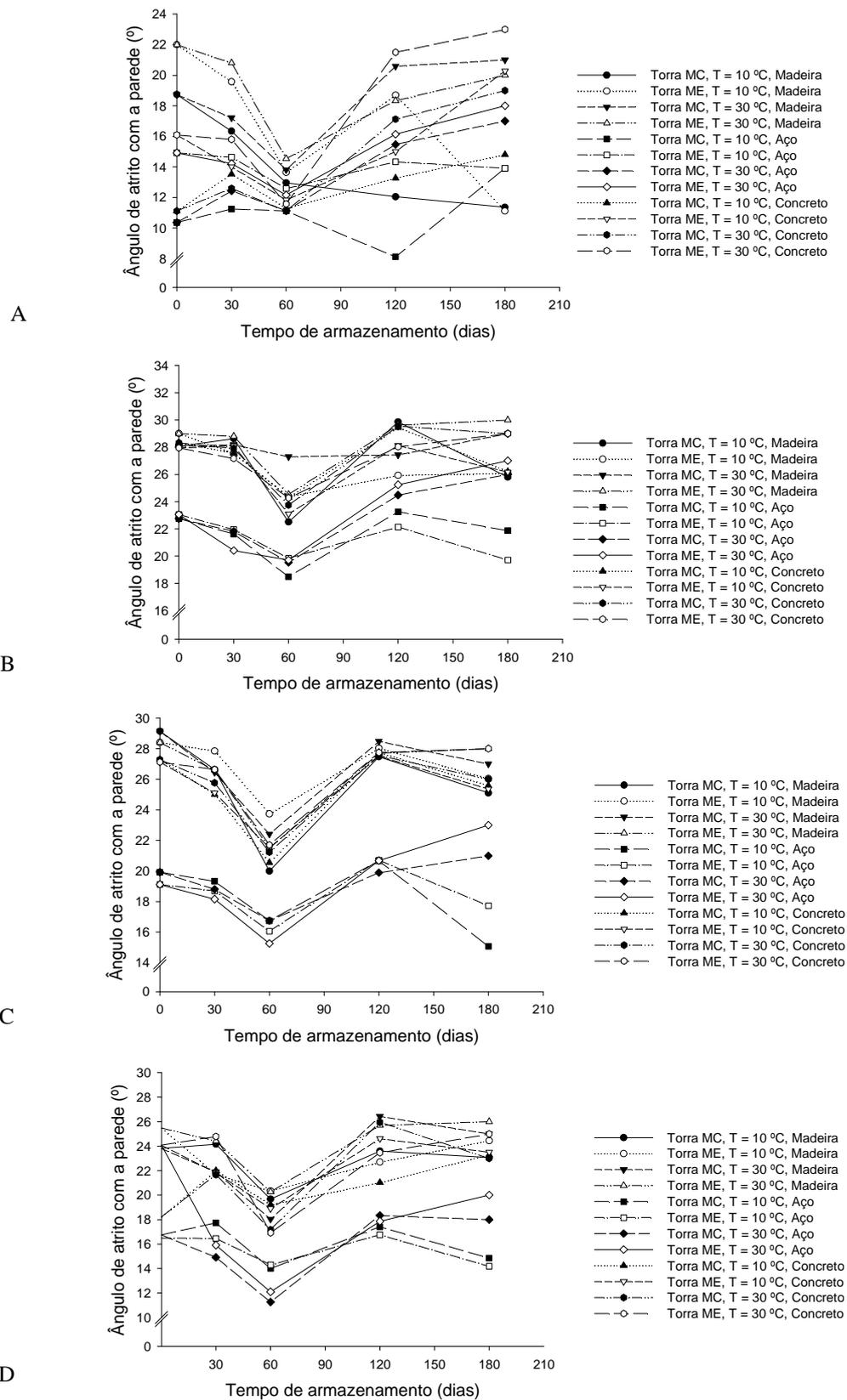


Figura 4.13. Valores observados de ângulo de atrito com o material de parede de *C. arabica* torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

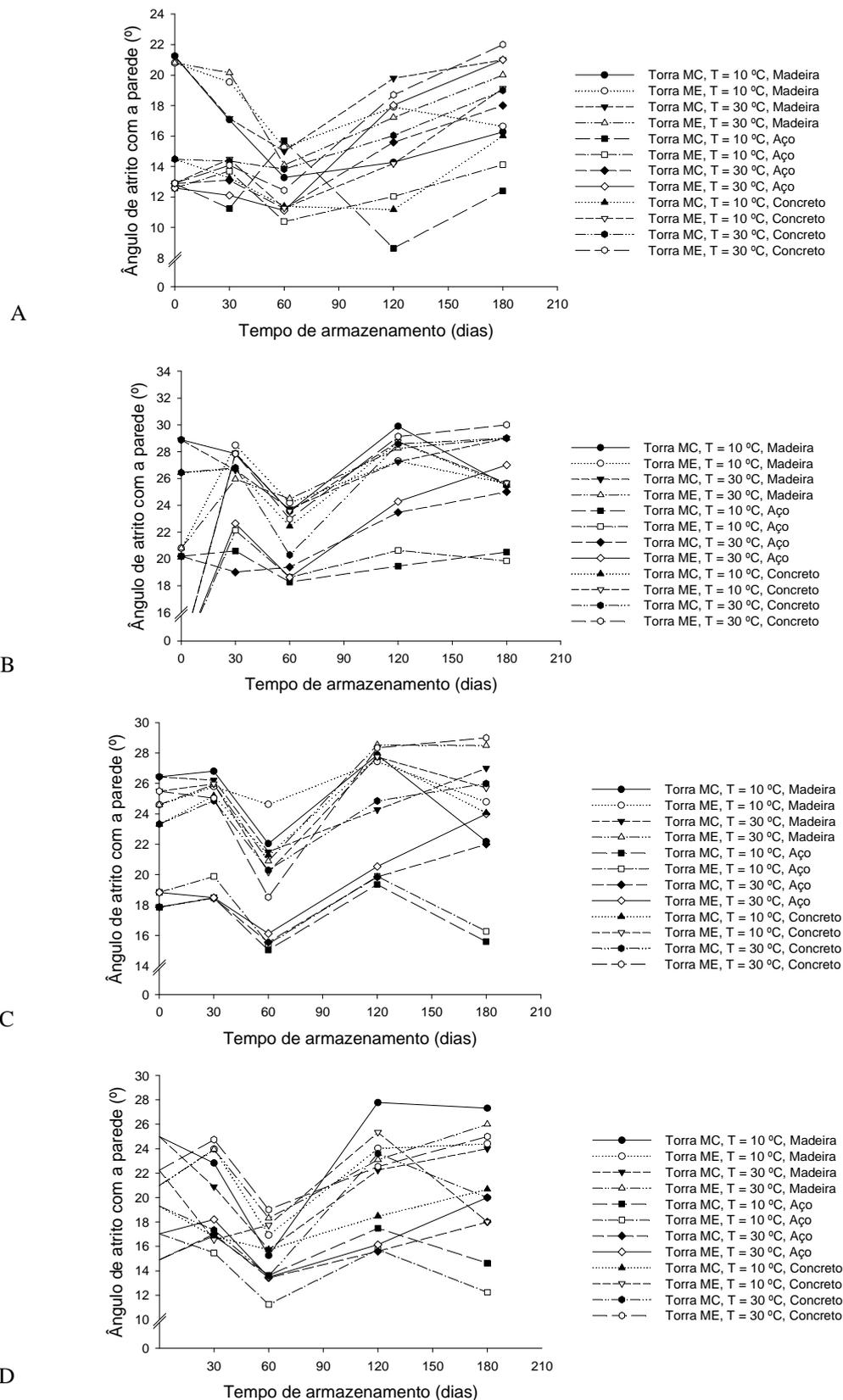


Figura 4.14. Valores observados de ângulo de atrito com o material de parede de *C. canephora* torrado, granulometria inteira (A), fina (B), média (C) e grossa (D), ao longo do armazenamento a 10 e 30 °C.

As amostras armazenadas à temperatura de 30 °C, de modo geral, obtiveram valores superiores de ϕ_w em vista ao café armazenado a 10 °C (Figuras 4.11 e 4.12). Essa tendência também é relacionada ao teor de água presente nas amostras: produtos com maior teor de água (cafés armazenados a 30 °C) possuem uma maior força de coesão entre as partículas ou componentes individuais que compõem a massa, tendendo a agregar estas partículas e, conseqüentemente, aumentar o ângulo de atrito com a parede. Outro fator, também relacionado ao ângulo de atrito interno e ao efetivo ângulo de atrito interno, é de que um aumento da rugosidade da superfície do produto devido aos maiores teores de água leva a uma maior resistência ao deslizamento de uma partícula da massa de produto contra a outra, aumentando ϕ_w .

Ao longo do armazenamento, nota-se aumento e decréscimo de ϕ_w , sem comportamento definido. A variação relatada é devida às mesmas razões explanadas anteriormente para o ângulo de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno.

Ainda avaliando as Figuras 4.13 e 4.14, especificamente entre os materiais de parede (madeira, aço ou concreto), os valores de ϕ_w são superiores quando o material de parede analisada é a madeira, seguida do concreto e por fim pelo aço. Essa diferença está relacionada à rugosidade da superfície dos materiais avaliados. Silva *et al.* (2003) verificaram os coeficientes de atrito de grãos de arroz em casca, descascado e polido em função dos mesmos materiais de parede utilizados neste trabalho, concluindo que os coeficientes de atrito foram maiores quando o material utilizado foi a madeira, seguido do concreto e aço, corroborando com os resultados apresentados. Esses autores vincularam essa diferença à rugosidade da superfície do material, sendo 0,64; 3,22 e 3,56 μm para o aço, concreto e madeira, respectivamente.

4.3.3 Coeficientes de atrito interno e externo

O coeficiente de atrito interno (μ_i'), que relata a relação entre a força de atrito e a força normal sobre a superfície da massa de café, aumentou ao longo do armazenamento, variando entre 0,2217 e 0,8765.

Assim como ocorrido para o ângulo de atrito interno, os valores de μ_i' foram, de maneira geral, maiores para as amostras torradas ao nível ME (0,2661 a 0,8391), moídas fina (0,3865 a 0,6985) e armazenadas a 30 °C (0,2345 a 0,8765), quando comparadas com a torra MC (0,2217 a 0,6985), às granulometrias média (0,3411 a 0,8391), grossa (0,2345 a 0,6745) e inteira (0,2217 a 0,8765) e à temperatura de 10 °C (0,2217 a

0,8765). Este comportamento, tal como explicado na seção 4.3.2, é devido ao aumento da friabilidade do café torrado ME, à força de coesão das partículas de café e ao teor de água do produto.

Os valores de coeficiente de atrito externo (μ_e'), que reporta a relação entre a força de atrito e a força normal sobre a superfície do material utilizado na construção da parede do silo, se alteraram devido ao material utilizado, ao nível de torrefação, à granulometria do café e ao longo do armazenamento. Para estes três últimos fatores, o comportamento foi similar ao observado para μ_i' .

Independentemente da espécie de café avaliada, da temperatura de armazenagem, do nível de torrefação e do grau de moagem realizado, os valores de μ_e' foram superiores para a madeira, seguida pelo concreto e aço, resultado semelhante ao encontrado por Silva *et al.* (2003) trabalhando com grãos de arroz em casca, descascado e polido. Tal fato, conforme explanado na seção anterior, deve-se à rugosidade da superfície do material. A faixa de valores de μ_e' encontra-se entre 0,1964 a 0,5774; 0,1425 a 0,5095; 0,1964 a 0,5774; respectivamente para os materiais madeira, aço e concreto.

4.3.4 Função fluxo

De acordo com Jenike (1980), a função fluxo pode ser classificada de acordo com determinados valores-limites ou índices, visto ser esta propriedade relação direta entre a pressão de consolidação e a resistência inconfina (resistência ao deslizamento). Para a análise do comportamento de fluxo do produto em suas diferentes condições de torra, granulometria e armazenagem, os valores limites da Função Fluxo apresentados por Jenike (1964) são utilizados (Tabela 4.3).

Tabela 4.3. Análise da fluidez, de acordo com Jenike (1964)

Função Fluxo (FF)	Resultado
$FF < 2$	Produtos muito coesivos, não fluem
$2 < FF < 4$	Produtos coesivos
$4 < FF < 10$	Produtos que fluem facilmente
$FF > 10$	Produtos de fluxo livre

Quando os resultados são comparados com a Tabela 4.3, conclui-se que os grãos de café torrados e mantidos inteiros podem ser considerados como de fluxo livre ($FF > 10$), independentemente da espécie avaliada, do nível de torrefação e da temperatura de armazenagem.

A granulometria do café moído, no entanto, apresentou um comportamento distinto ao observado para as amostras inteiras. Os valores da Função Fluxo decresceram ao passo que a moagem se tornava mais intensa (granulometria fina), indicando que quanto maior o grau de moagem do café, maior será a dificuldade do produto em escoar. De acordo com os valores encontrados, o café moído grosso pode ser classificado como produto que flui facilmente ($4 < FF < 10$), ao passo que o café moído médio alterna entre esta classificação e como produto coesivo ($2 < FF < 4$) ao passar do tempo de armazenamento. Já as amostras moídas fina são classificadas somente como produto coesivo.

A torrefação e a temperatura de armazenagem influenciaram o fluxo do produto. De modo geral, as amostras torradas ao nível MC obtiveram maiores valores desta propriedade que as torradas ao nível ME, fato este intimamente ligado ao teor de água do produto. Por outro lado, as amostras armazenadas a 10 °C apresentaram maiores valores de FF que as armazenadas a 30 °C. Este fato se deve à baixa temperatura que acarreta em menor interação com o ambiente e, conseqüentemente, menor adsorção de água do café durante o armazenamento.

4.3.5 Coeficiente *K*

Os valores do coeficiente *K* estão apresentados na Tabela 4.4 e 4.5, respectivamente para *Coffea arabica* e *Coffea canephora*. Foram calculados apenas os coeficientes de acordo com o efetivo ângulo de atrito interno em detrimento aos materiais de parede usados (madeira, concreto e aço), uma vez que a rugosidade das mesmas pouco influencia na determinação de *K* (NASCIMENTO & CALIL JUNIOR, 2009).

Tabela 4.4. Valores do coeficiente K dos grãos de *Coffea arabica*, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 – fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 – inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	0,5441	0,5641	0,5928	0,5820	0,5140	0,5611	0,5511	0,4091
30	10	0,4992	0,5192	0,5134	0,6509	0,5284	0,4986	0,5043	0,5272
	30	0,4789	0,4958	0,5934	0,6471	0,4634	0,4662	0,5488	0,5897
60	10	0,5928	0,6109	0,6188	0,7253	0,5796	0,6127	0,6158	0,5897
	30	0,6103	0,5850	0,6484	0,7388	0,5970	0,6237	0,5946	0,6490
120	10	0,4629	0,5060	0,5117	0,6602	0,4924	0,5009	0,5077	0,5488
	30	0,4546	0,4800	0,5447	0,6903	0,4728	0,4706	0,5611	0,5647
180	10	0,5802	0,5464	0,5464	0,6828	0,5547	0,6000	0,5290	0,6067
	30	0,5641	0,5754	0,6097	0,7119	0,6000	0,5117	0,6073	0,5418

Tabela 4.5. Valores do coeficiente K dos grãos de *Coffea canephora*, em dois níveis de torra (MC – média clara; ME – moderadamente escura) e em quatro granulometrias diferentes (0 – fina, 1 – média, 2 – grossa e 3 – inteira) ao longo do armazenamento em duas temperaturas

Tempo (dias)	Temperatura (°C)	MC				ME			
		0	1	2	3	0	1	2	3
0	-	0,5423	0,6317	0,6409	0,5994	0,5365	0,5180	0,5594	0,5249
30	10	0,5665	0,5470	0,6048	0,6354	0,4416	0,4964	0,5588	0,6237
	30	0,4623	0,4981	0,5964	0,6565	0,4535	0,5146	0,5547	0,6280
60	10	0,5808	0,6428	0,6152	0,6777	0,5736	0,5946	0,6024	0,7113
	30	0,6133	0,6311	0,7408	0,6733	0,6213	0,6256	0,6727	0,6992
120	10	0,4717	0,5066	0,5617	0,6527	0,4947	0,4405	0,5163	0,6293
	30	0,4497	0,5060	0,6627	0,6558	0,4711	0,4778	0,5500	0,6079
180	10	0,5629	0,5641	0,6929	0,7030	0,5470	0,4287	0,6502	0,6633
	30	0,5665	0,5946	0,5952	0,7036	0,5748	0,5873	0,6030	0,6428

Pela análise das Tabelas 4.4 e 4.5, percebe-se o comportamento inverso relatado para o efetivo ângulo de atrito interno de acordo com os fatores granulometria, tempo de armazenamento, temperatura de armazenamento e nível de torrefação. Este fato é esperado, uma vez que o coeficiente K é dependente daquela propriedade de fluxo.

Observando-se as Tabelas 4.4 e 4.5, nota-se que o coeficiente K aumenta com o tamanho das partículas e têm maiores valores no nível de torrefação MC. Dessa forma, o café torrado ao nível MC e inteiro requer estruturas de armazenagem que suportem maior pressão. Especificamente para o café torrado e moído, menores graus de moagem levam a necessidade de estruturas que absorvam maior pressão durante as operações pós-colheita. Caso o produto seja armazenado a 30 °C, também haverá a necessidade de silos com maior capacidade de suportar as pressões desempenhadas pelo mesmo.

Os valores do coeficiente K variaram entre 0,4497 e 0,7408; 0,4091 e 0,7113; 0,4091 e 0,7253; 0,4091 e 0,7408; 0,4091 e 0,7388; 0,4416 e 0,6213; 0,4287 e 0,6428; 0,5043 e 0,7408; respectivamente para as amostras de café torradas ao nível MC e ME, armazenadas a 10 e 30 °C, de granulometria inteira, fina, média e grossa.

4.4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas condições em que foi realizado o experimento, conclui-se que:

1. Os valores de ângulo de atrito interno e o efetivo ângulo de atrito interno variaram em função da granulometria e do nível de torrefação, não apresentando comportamento definido ao longo do armazenamento;
2. O nível de torrefação e a granulometria influenciaram nos valores de ângulo de atrito com a parede, em que torras mais intensas e menor granulometria levam a maiores valores desta propriedade;
3. A amostra de madeira foi o material que possibilitou maiores valores de ângulo de atrito com a parede, seguida das amostras de concreto e de aço liso;
4. O coeficiente de atrito interno foi afetado pelos fatores avaliados, em que a torrefação ME, maior grau de moagem e maior temperatura de armazenamento implicaram em maiores valores dessa propriedade, assim como para o coeficiente de atrito externo;
5. O coeficiente de atrito externo alterou-se em função do material de parede empregado, apresentando maiores valores para a madeira, seguido do concreto e aço;
6. As amostras de café mantidas inteiras são caracterizadas como de fluxo livre; para as amostras de café moídas, quanto maior o grau de moagem, mais o produto se aproxima de fluxo de produto coesivo;
7. Os valores do coeficiente K apresentaram comportamento inverso à apresentada pelo efetivo ângulo de atrito interno, sendo que as amostras de café torradas MC, inteiras e armazenadas a 30 °C as que necessitam de estruturas de armazenagem que suportem maiores pressões.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIC. 2012. Exportações do Agronegócio Brasileiro – Total. Disponível em: <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=49>>. Acesso em: 22 de novembro de 2013.

BARTH, G. M. P. A leitura do café: suas possíveis relações matemáticas e a perspectiva de gênero. **Educar**, Curitiba, s/v, n. 35, p. 153-164, 2009.

BARYEH, E. A. Physical properties of bambara groundnuts. **Journal of Food Engineering**, London, v. 47, n. 4, p. 321-326, 2001.

BMHB - British Materials Handling Board. **Draft code of practice for the design of silos, bins, bunkers and hoppers**. Inglaterra, 1985. 101p.

BORTOLIN, B. Café: a questão do blend. **Inovação Uniemp**, v. 1, n. 3, p. 42-44, 2005.

BOUMANS, G. 1985. **Grain handling and storage**. Elsevier Science Publishers B.V. 436p.

BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para análises de sementes**. Brasília, 2009. 399 p.

CALIL JÚNIOR, C. **Recomendações de fluxo e de cargas para o projeto de silos verticais**. São Carlos, USP, 1990. 198p.

CALIL JUNIOR, C.; CHEUNG, A. B. **Silos: pressões, fluxo, recomendações para o projeto e exemplos de cálculo**. São Carlos, Escola de Engenharia de São Carlos – 2007.

DUFFY, S. P.; PURI, V. M. Flowability parameters and flow functions for confectionery sugar and detergent powder at two moisture contents. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 12, n. 5, p. 601-606, 1996.

GAGGERO, M. R.; TREIN, C. R.; IPPOLITI, G. Influência de sistemas de preparo e pastejo nas características físicas do solo. **Revista do Programa de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 1, n. 1, p. 1-16, 2002.

GELDART, D.; ABDULLAH, E. C.; VERLINDEN, A. Characterisation of dry powders. **Powder technology**, Filadélfia, v. 190, n. 1-2, p. 70-74, 2009.

JENIKE, A. W. **Storage and flow of silos**. Bulletin 123. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 89p.

JENIKE, A. W.; JOHANSON, J. **Flow factor Tester and consolidating bench operating instructions**. Jenike & Johanson, Inc, North Billerica, Massachusetts – USA, 1979. 40p.

- JENIKE, A. W. **Storage and flow of solids**. Salt Lake City: University of Utah, 1980. 197p.
- KNOWLTON, T. M.; KLINZING, G. E.; YANG, W. C.; CARSON, J. W. The importance of storage, transfer and collection. **Chemical Engineering Progress**, v. 90, n. 4, p. 44-54, 1994.
- LOPES NETO, J. P.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R.; LOPES, F. F. M. Propriedade de fluxo e característica de escoabilidade de rações avícolas para dimensionamento de silos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 3, p. 851-859, 2007.
- MEDEIROS, M. L.; LANNES, S. C. S. Propriedades físicas de substitutos de cacau. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 30, n. supl. 1, p. 243-253, 2010.
- MILANI, A. P. **Determinação das propriedades de produtos armazenados para projetos de pressões e fluxo em silos**. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 285 p.
- MOHSEIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- NAKA, S. **Determinação das propriedades físicas dos grãos de mamona ‘Guarani’ visando armazenagem em silos verticais**. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP. 2010.
- NASCIMENTO, F. C.; CALIL JUNIOR, C. A relação entre as pressões horizontais e verticais em silos elevados: o parâmetro K. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, São Carlos, v. 11, n. 52, p. 17-37, 2009.
- ROBBERTS, T. C. **Food Plant Engineering Systems**. New York: CRC Press, 2002. p. 268.
- SILVA, F. S. **Propriedades físicas dos grãos de café como subsídio em projetos de equipamentos e de silos utilizando a metodologia de Jenike**. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2003.
- SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, R. M.; AFONSO JÚNIOR, P. C. Efeito do beneficiamento nas propriedades físicas e mecânicas dos grãos de arroz de distintas variedades. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 33-41, 2003.
- SILVA, F. S.; CORRÊA, P. C.; CALIL JÚNIOR, C.; GOMES, F. C. Comparação de diferentes equipamentos e metodologias para determinação dos coeficientes de atrito estático e dinâmico de grãos de café com pergaminho. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n. 10, p. 58-65, 2008.
- VARGAS-ELÍAS, G. A. **Avaliação das propriedades físicas e qualidade do café em diferentes condições de torrefação**. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. 2011.

CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com os resultados obtidos nas condições em que foi realizado este trabalho, relata-se como principais conclusões que:

1. A técnica de granulometria a laser não é adequada para a análise granulométrica de café torrado e moído;
2. A granulometria afetou significativamente o teor de água de café, independentemente da espécie e nível de torrefação;
3. O nível de torrefação apresentou relação indireta significativa com o teor de água de café, em que quanto maior o grau de torra, menores são os valores desta propriedade física;
4. Os valores de ângulo de repouso de café torrado, inteiro e moído, decrescem com o aumento da granulometria e com um menor nível de torrefação;
5. As propriedades massa específica unitária, aparente e porosidade têm comportamento proporcional com o incremento do grau de moagem de café, menor nível de torrefação e menor tempo de armazenamento;
6. A partir dos 120 dias de armazenamento, ocorreu perda de coloração do café, visualizada pelas coordenadas L^* , a^* e b^* , bem como pelos índices colorimétricos ângulo hue e croma;

7. A atividade de água de café torrado, independentemente da espécie avaliada, do nível de torrefação e da granulometria, incrementou ao longo do armazenamento;
8. O modelo de Sigma-Copace foi o que melhor representou o equilíbrio higroscópico para a sorção do café torrado;
9. A redução do teor de água incorre em um aumento da entalpia e entropia diferencial de sorção, bem como da energia livre de Gibbs;
10. A teoria da compensação entalpia-entropia pode ser satisfatoriamente aplicada ao fenômeno de sorção, sendo este controlado pela entropia;
11. Os ângulos de atrito interno e efetivo ângulo de atrito interno variaram significativamente devido à granulometria e ao nível de torrefação, não apresentando comportamento definido ao longo do armazenamento;
12. O nível de torrefação e a granulometria influenciaram diretamente no ângulo de atrito com a parede, em que torras mais intensas e menor granulometria levam a maiores valores desta propriedade;
13. A madeira foi o material de parede que possibilitou maiores valores de ângulo de atrito com a parede, seguida do concreto e do aço;
14. As amostras de café inteiras são caracterizadas como de fluxo livre, sendo que quanto maior o grau de moagem, mais o produto se aproxima de fluxo de produto coesivo, e;
15. As amostras de café torradas média clara, inteiras e armazenadas a 30 °C são as que necessitam de estruturas de armazenagem que suportem maiores pressões, relatadas pelos valores do coeficiente K.