

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
ESCOLA DE QUÍMICA

*EXTRAÇÃO DE ÓLEO DE CAFÉ COM ETANOL:
ESTUDO CINÉTICO*

PROJETO FINAL DE CURSO

HENRIQUE PLAUDIO GONÇALVES RANGEL
RAFAELLA MAGLIANO BALBI DE FARIA
RAQUEL MASSAD CAVALCANTE

ORIENTADORES

PROFA. SUELY PEREIRA FREITAS
PROFA. SILVIA MARIA CRUZEIRO DA SILVA

RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO DE 2008

EXTRAÇÃO DE ÓLEO DE CAFÉ COM ETANOL: ESTUDO CINÉTICO

HENRIQUE PLAUDIO GONÇALVES RANGEL

RAFAELLA MAGLIANO BALBI DE FARIA

RAQUEL MASSAD CAVALCANTE

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Amaro Gomes Barreto Jr. - D.Sc.

Sonia Couri – D.Sc.

Neusa Arruda Pereira – M.Sc.

Orientadores:

Suely Pereira Freitas – D.Sc.

Silvia Maria Cruzeiro da Silva – D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2008

Rangel, Henrique Plaudio Gonçalves; Faria, Rafaella Magliano Balbi; Cavalcante,
Raquel Massad.

Extração de óleo de café com etanol: estudo cinético /Henrique Plaudio Gonçalves
Rangel, Rafaella Magliano Balbi de Faria, Raquel Massad Cavalcante. Rio de Janeiro:
UFRJ/EQ, 2008.
xii, 60 p.;il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2008.

Orientadores: Suely Pereira Freitas e Silvia Maria Cruzeiro da Silva.

1. óleo de café. 2. extração. 3. etanol 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5.

Suely Pereira Freitas e Silvia Maria Cruzeiro da Silva. I. Título.

Aos nossos pais,
pelo investimento em nossa capacidade e pela torcida diária.

"Para realizar grandes conquistas, devemos não apenas agir, mas também sonhar; não apenas planejar, mas também acreditar."

(Anatole France)

AGRADECIMENTOS

A Deus por fornecer o ânimo e a força necessários para conclusão deste sonho.

A Suely e Silvia pelas valiosas e enriquecedoras discussões que acabaram sendo pedra angular para a concretização deste trabalho.

Aos pais pelo incentivo diário e por, incansavelmente, acreditar em nós.

Aos irmãos (Gabriela, Juninho, Tatá, Rodrigo e Karina) e namorados (Raquel, Henrique e Bruno) por nos presentear com carinhos nos constantes e compreensíveis momentos de ausência.

Aos amigos por tornar os dias na faculdade mais divertidos.

Aos professores pelos ensinamentos que contribuíram para a nossa construção profissional.

Ao Bruno Baião pelas revisões ortográficas e almoços de final de semana.

Aos funcionários por colocarem os tijolos em nossa jornada acadêmica.

À Fazenda São Francisco em São José do Vale do Rio Preto pelo fornecimento das amostras de café.

Ao Alex pela ajuda e predisposição ímpar na realização dos experimentos.

À Juliana pela ajuda nos experimentos de reologia.

À tia Maria pela alegria de todos os dias.

Resumo do Projeto Final de curso apresentado à Escola de Química, UFRJ, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

EXTRAÇÃO DE ÓLEO DE CAFÉ COM ETANOL: ESTUDO CINÉTICO

HENRIQUE PLAUDIO GONÇALVES RANGEL
RAFAELLA MAGLIANO BALBI DE FARIA
RAQUEL MASSAD CAVALCANTE

Fevereiro, 2008

Orientadoras: Profa. Suely Pereira Freitas, D. Sc.
Profa. Sílvia Maria Cruzeiro Da Silva, D. Sc.

RESUMO

O excesso de oferta de grãos de café e de borra proveniente da indústria de café solúvel favorece a diversificação do uso do óleo de café em processos industriais. O óleo de café extraído a partir de grãos de café torrado é utilizado em diferentes produtos alimentícios devido ao elevado teor de compostos voláteis de interesse comercial. Neste trabalho, foi realizado um estudo cinético da extração do óleo de café com etanol comercial a partir dos grãos torrados, 100% Arábica, em diferentes estádios de maturação: Verde, Cereja e Bóia e a partir da borra de café. Para a caracterização dos grãos, da borra e do óleo, foram realizadas análises granulométricas e reológicas. Para o estudo cinético, determinou-se o teor de óleo nas matérias-primas, as concentrações de equilíbrio e as curvas cinéticas de extração. Pode-se concluir que o estágio de maturação dos grãos de café torrado apresentou uma forte correlação com o teor do óleo nas amostras. Entretanto não teve influência significativa na cinética de extração. O café Verde foi o que apresentou maior teor de óleo e coeficiente de difusão ligeiramente superior aos demais. As borras de café apresentaram menor teor de óleo que os grãos de café torrado, porém maior coeficiente de difusão em etanol.

ABSTRACT

The excess of coffee beans and waste from soluble coffee industries favors the diversification of coffee oil uses in industrial processes. The coffee oil extracted from the toasted coffee beans is used in different food products, owing to the high content of volatile compounds of commercial interest. In the present work, it has been performed a kinetic study of coffee oil extraction with commercial ethanol from 100% Arabic toasted beans, in different maturation stages: Green, Cherry and Boia and from coffee waste. Size and rheological analysis were used for the characterization of coffee beans, waste and oil. For the kinetic study, the oil content in the raw material, the equilibrium concentrations and the extraction kinetic curves have been determined. It was concluded that the maturation stages of the coffee beans has presented a strong correlation with the samples oil content, having shown, however, no relevant influence on the extraction kinetics. The Green coffee beans have presented the greatest oil content and a slightly greater diffusion coefficient than the others. The coffee waste has shown less oil content than the coffee beans, but a greater diffusion coefficient in ethanol.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introdução	01
Capítulo 2. Revisão Bibliográfica	04
2.1. Produção e Beneficiamento do Café	04
2.2. Industrialização do Café	09
2.2.1. Café Solúvel	09
2.2.1.1. Resíduos do Processamento do Café Solúvel	10
2.2.2. Extração do Óleo de Café	11
2.2.2.1. Extração por Solvente	11
2.2.2.2. Extração por Prensagem	12
2.2.3. Extração Industrial e Refino de Óleos Vegetais	13
2.3. Fenômenos de Transporte e Estudos Cinéticos	13
2.3.1. Transferência de Massa	13
2.3.2. Estudo da Viscosidade	15
Capítulo 3. Materiais e Métodos	17
3.1. Matérias-Primas	17
3.1.1. Grãos de Café	17
3.1.2. Borra de Café	17
3.1.3. Solvente	18
3.2. Procedimento Experimental	18
3.2.1. Extração do Óleo de Café torrado	18
3.2.1.1. Preparo do grão	18
3.2.1.2. Extração do Óleo	18
3.2.1.3. Determinação da Concentração de Equilíbrio	19
3.2.1.4. Teor de Óleo no Grão de Café	20
3.2.2. Extração do Óleo da Borra de Café	20
3.2.2.1. Preparo da Borra	20
3.2.2.2. Extração do Óleo da Borra	20
3.2.3. Análise Granulométrica	20
3.2.3.1. Diâmetro Médio de Sauter	21
3.2.4. Coeficiente de Difusão: Modelo Matemático	22
3.2.5. Reologia	23

Capítulo 4. Resultados e Discussões	25
4.1. Grãos de Café Torrados	25
4.1.1. Teor de Óleo	25
4.1.2. Concentração de Óleo no Equilíbrio	26
4.1.3. Análise Granulométrica dos Grãos Torrados	26
4.1.4. Cinética	28
4.1.5. Coeficiente de Difusão	29
4.1.6. Viscosidade	31
4.2. Borra de Café	32
4.2.1. Cinética de Secagem	32
4.2.2. Teor de Óleo	34
4.2.3. Concentração no Equilíbrio	35
4.2.4. Análise Granulométrica	36
4.2.5. Cinética	40
4.2.6. Coeficiente de Difusão	40
4.2.7. Viscosidade	42
Capítulo 5. Conclusões e Sugestões	44
Referências Bibliográficas	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama simplificado da etapa de pré-colheita	04
Figura 2.2	Diagrama de blocos da etapa de pós-colheita do café	05
Figura 2.3	Lavagem dos grãos e separação do café Bóia	07
Figura 2.4	Descascador mecânico	07
Figura 2.5	Tanque de fermentação	07
Figura 2.6	Secagem do café no terreiro	08
Figura 2.7	Exemplos de cafés em diferentes estádios de maturação dos frutos	09
Figura 2.8	Diagrama de blocos para produção de café solúvel	10
Figura 2.9	Comportamentos não-newtonianos	16
Figura 3.1	Banho com agitação	19
Figura 3.2	Filtração a vácuo	19
Figura 3.3	Esquema experimental da extração do óleo de café	19
Figura 3.4	Secador de bandejas aeradas	21
Figura 3.5	Conjunto de peneiras com base vibratória	21
Figura 3.6	Reômetro de placas	24
Figura 4.1	Teor de óleo nos grãos de café (extrato etanólico)	25
Figura 4.2	Porcentagem de óleo extraído, no equilíbrio	26
Figura 4.3	Distribuição de tamanho dos grãos moídos nas amostras de café	27
Figura 4.4	Porcentagem mássica acumulada vs diâmetro médio	27
Figura 4.5	Ajuste do Modelo GGS linearizado	27
Figura 4.6	Ajuste do Modelo RRB linearizado	28
Figura 4.7	Cinética da extração de óleo nos grão de café	29
Figura 4.8	Ajuste da equação de Arrhenius linearizada	32
Figura 4.9	Cinética de secagem a 60°C : Borra sem pressão	33
Figura 4.10	Cinética de secagem a 60°C: Borra pressurizada (9 atm)	33
Figura 4.11	Rendimento de extração do óleo de café com etanol	35
Figura 4.12	Teor de óleo na borra e concentração de soluto extraída nas condições de equilíbrio (tempo = 12 horas).	35
Figura 4.13	Distribuição de tamanhos nas amostras de borra sem pressão	36
Figura 4.14	Distribuição de tamanhos nas amostra de borra pressurizada (9 atm)	36
Figura 4.15	Porcentagem mássica acumulada <i>versus</i> diâmetro médio (borra sem pressão)	37

Figura 4.16	Porcentagem mássica acumulada <i>versus</i> diâmetro médio (borra pressurizada)	37
Figura 4.17	Ajuste do Modelo GGS aos pontos experimentais (borra sem pressão)	38
Figura 4.18	Ajuste do Modelo RRB aos pontos experimentais (borra sem pressão)	38
Figura 4.19	Ajuste do Modelo GGS aos pontos experimentais (borra pressurizada)	39
Figura 4.20	Ajuste do Modelo RRB aos pontos experimentais (borra pressurizada)	39
Figura 4.21	Cinética de extração do óleo das borras de café com etanol	40
Figura 4.22	Ajuste do modelo Bingham	43
Figura 4.23	Ajuste da equação de Arrhenius linearizada (borra de café)	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1	Composição em ácidos graxos dos óleos de café extraídos a partir dos grãos torrados	17
Tabela 4.1	Diâmetro médio de Sauter (mm) para os grãos de café torrado e moído	28
Tabela 4.2	Concentrações usadas no cálculo do coeficiente de difusão – café Verde	29
Tabela 4.3	Concentrações usadas no cálculo do coeficiente de difusão – café Bóia	30
Tabela 4.4	Concentrações usadas no cálculo do coeficiente de difusão – café Cereja	30
Tabela 4.5	Coeficiente de Difusão para os grãos de café torrado	30
Tabela 4.6	Viscosidade média do óleo de café torrado	31
Tabela 4.7	Teor de água nas borras de café	34
Tabela 4.8	Solubilidade de óleos vegetais em etanol	34
Tabela 4.9	Diâmetro médio de Sauter (mm) calculados para a borra de café	39
Tabela 4.10	Dados cinéticos: borra sem pressão	41
Tabela 4.11	Dados cinéticos: borra pressurizada	41
Tabela 4.12	Coeficiente de Difusão para o óleo da borra de café em etanol	41
Tabela 4.13	Resultados do reômetro a 20°C: Borra	42
Tabela 4.14	Viscosidade média para cada temperatura: Borra	42

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

De acordo com dados históricos do Brasil, a cultura do café teve grande importância na colonização e desenvolvimento do país, assumindo hoje um importante papel econômico e social. Atualmente, o Brasil ocupa a posição de um dos maiores produtores e exportadores no mercado internacional, correspondendo a 39% da produção mundial de café arábica e 29% de participação nas exportações mundiais. O café é a segunda maior *commodity* em valor de mercado mundial, superado apenas pelo petróleo (SILVA *et al.*, 2002; CARVALHO, 2008; SOCCOL, 2002).

O Brasil e o mundo apresentam hoje um excesso de oferta de grãos de café, o que favorece a diversificação do seu uso em processos industriais. Produz-se hoje no Brasil cerca de 30 milhões de sacas de café por ano. Uma melhoria da qualidade do café, através da redução dos níveis de defeitos do grão, é um recurso seguro para aumentar sua valorização. Essa redução corresponde a uma retirada de 7,6 milhões de sacas de café do mercado. A extração do óleo a partir dos cafés com defeitos pode se tornar uma alternativa atraente para o aproveitamento dos grãos de qualidade inferior (TURATTI, 2008).

O óleo de café extraído a partir dos grãos Verdes é rico em matéria insaponificável. Os esteróis presentes nesta fração são compostos com princípios ativos de interesse para a formulação de cosméticos (LAGO, 2001). O óleo de café extraído a partir dos grãos torrados é utilizado em diferentes produtos alimentícios como realçador do sabor (café instantâneo, café gelado, sobremesas, sorvetes, doces, cafés líquidos em lata, *cappuccinos*, pudins, iogurtes e outros preparos à base de leite) e em especial no preparo do café solúvel, aspergindo-se o óleo sobre o produto seco obtido por atomização (SILVA *et al.*, 2007).

Com o prenúncio do fim da era dos combustíveis fósseis, a sociedade começa a buscar alternativas economicamente competitivas e ambientalmente sustentáveis para a produção de energia. Nesse contexto, o biodiesel vem despertando, recentemente, interesse mundial, em especial pelos países agrícolas. O biodiesel é produzido a partir de matérias-primas renováveis e por ser isento de enxofre e nitrogênio poderá proporcionar uma redução importante no aquecimento global, causado pelos gases do

efeito estufa normalmente liberados na queima de combustíveis fósseis (COSTA *et al.*, 2006).

Pesquisas recentes no Brasil vêm estudando e comprovando a viabilidade de se produzir biodiesel usando matérias-primas alternativas, em especial resíduos agroindustriais. Nesse sentido, a Universidade Federal de Minas Gerais propõe a transesterificação do óleo extraído a partir de grãos de café defeituosos (CAMARGOS, 2005). O café possui algumas vantagens em relação a outras oleaginosas, sobretudo devido ao volume de sua produção, ao custo reduzido do processo de aproveitamento dos grãos defeituosos, cuja separação já ocorre no beneficiamento convencional, e ao fato do café ser uma cultura consolidada, que conta com ampla rede de agricultores e empresários organizados (UFMG, 2005).

No caso do óleo de grãos defeituosos de café, a produção de biodiesel permitiria ganhos de dois modos. A remoção dos grãos defeituosos do mercado diminuiria a oferta de café de baixa qualidade provocando um aumento de seu preço no mercado internacional. Por sua vez, o custo de produção do café seria reduzido se o biodiesel produzido fosse utilizado na própria fazenda, evitando-se assim, custos com a compra de diesel de petróleo (CAMARGOS, 2005).

Considerando as inúmeras inquietações no que se refere às questões ambientais resultantes da produção de alimentos é fundamental a busca de alternativas sustentáveis para aproveitamento de resíduos agroindustriais. Neste sentido, estudos de síntese do biodiesel, a partir do óleo da borra de café, vêm sendo conduzidos, mas os estudos ainda são escassos. A presença de terpenos neste óleo dificulta a reação de transesterificação. A remoção destes compostos é uma forma para viabilizar técnica e economicamente o processo. Esse estudo ganha importância por utilizar um resíduo industrial gerado em grande quantidade, aumentando a preservação ambiental e reduzindo custos com matéria-prima (CAMARGOS, 2005).

O processo convencional de obtenção de óleos vegetais é realizado por prensagem da matéria-prima seguida de extração com hexano. Esse solvente é inflamável e mais denso que o ar, colocando em risco empregados e comunidades próximas à fábrica. Por essa razão, o processo de extração de óleos vegetais é considerado, pelos órgãos de proteção ambiental, como um dos maiores responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Para superar essas dificuldades (FREITAS *et al.*, 2007), avaliou-se o uso do

etanol para extração e fracionamento simultâneo de óleos vegetais alcançando resultados promissores.

A obtenção de etanol a partir da cana-de-açúcar coloca o Brasil em uma posição privilegiada para eliminar o uso de derivados de petróleo na extração de óleos vegetais. O etanol, além de ser obtido de fontes renováveis, não é tóxico e independe do mercado internacional do petróleo.

Diversos estudos do comportamento termodinâmico e cinético podem ser encontrados na literatura envolvendo a extração de óleos vegetais com n-hexano e éter de petróleo. Entretanto são escassos os dados para extração de óleos vegetais com etanol. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar a cinética do processo de extração do óleo em etanol comercial, a partir dos grãos torrados e da borra de café. Neste estudo, foram usados grãos de café 100% arábica colhidos em diferentes estádios de maturação: Verde, Cereja e Bóia.

Os objetivos específicos foram:

- i. caracterização granulométrica das partículas e ajuste de modelos clássicos para a função distribuição acumulada de tamanho;
- ii. determinação do teor de óleo nas amostras;
- iii. estudo do comportamento reológico do óleo;
- iv. estudo cinético experimental;
- v. determinação do coeficiente de difusão do óleo no grão torrado e na borra, aplicando métodos de regressão não linear.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO E BENEFICIAMENTO DO CAFÉ

O processo de produção do café no campo pode ser dividido em duas etapas: a etapa pré-colheita e a pós-colheita. No diagrama de blocos da Figura 2.1 estão indicadas as etapas de pré-colheita (RICCI, *et al*, 2003). Nessas etapas, destaca-se a importância de fatores como preparo do solo e mudas, controle de pragas, plantas daninhas e irrigação na obtenção das condições ótimas de cultivo.

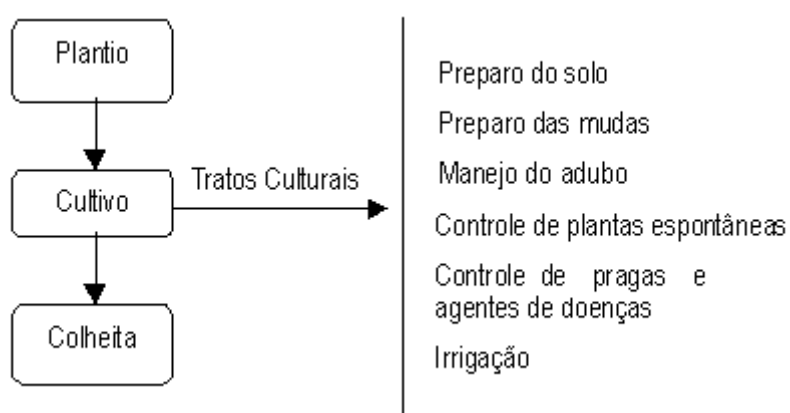


Figura 2.1: Diagrama simplificado da etapa de pré-colheita

A colheita do café pode ser realizada de forma manual, semi-mecanizada e mecanizada. A colheita manual pode ser do tipo seletiva, coletando-se a dedo somente os frutos maduros ou do tipo concentrada, derriçando-se todos os frutos de cada ramo no chão, em panos ou em peneiras. Por outro lado, a colheita semi-mecanizada utiliza derriçadeiras portáteis ou tracionadas, desprovidas de recolhedores. A mecanizada é feita com máquinas colhedeiras completas automotrizes ou tracionadas por trator (NUNES, *et al*, 2005).

As operações de pós-colheita do café envolvem diversas etapas até o ensacamento, que são importantes para a preservação das características sensoriais e de segurança como pode ser observado na Figura 2.2 (RICCI, *et al*, 2006).

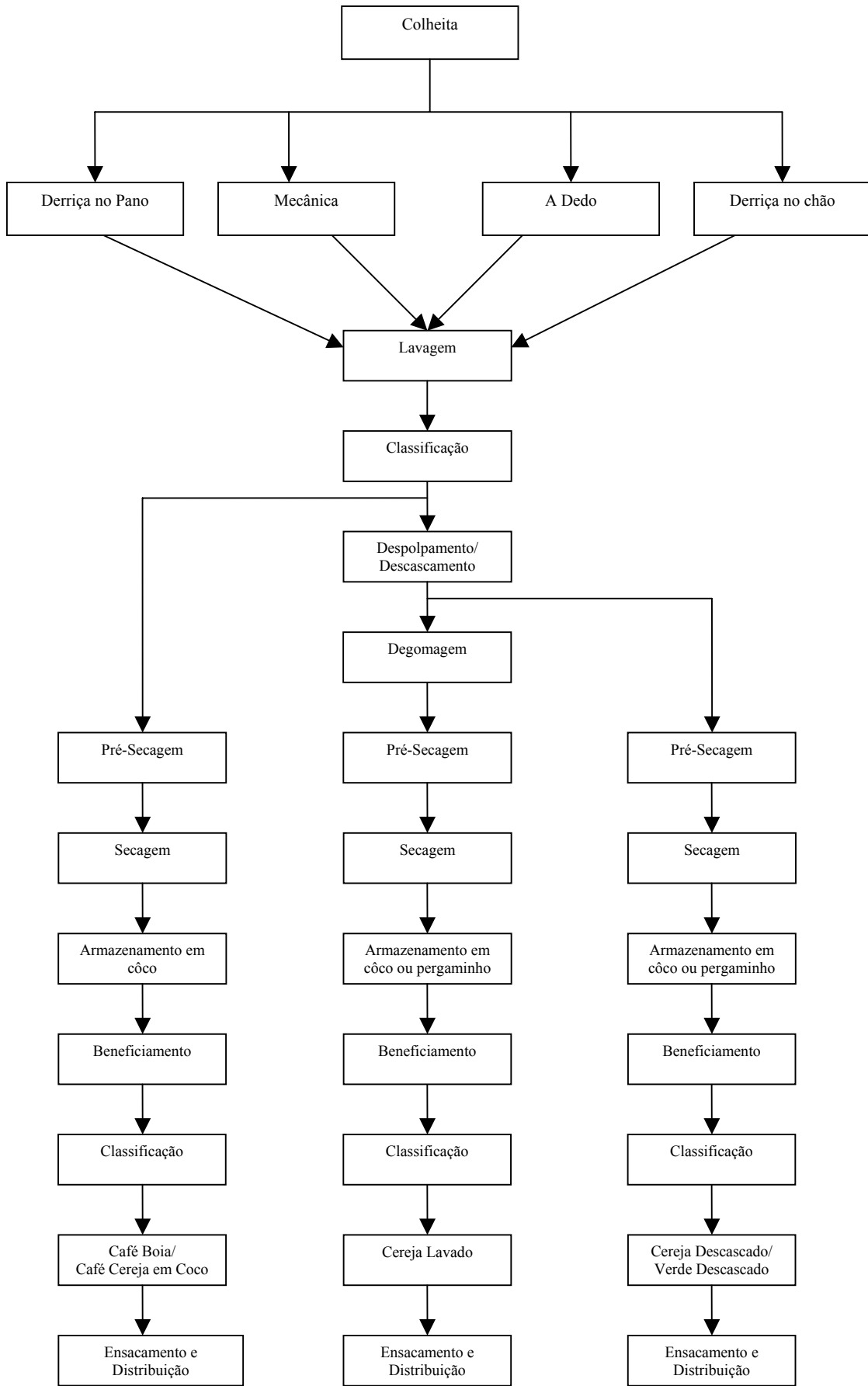


Figura 2.2: Diagrama de blocos da etapa de pós-colheita do café

A etapa de pós-colheita compreende (RICCI, *et al*, 2006):

(a) *limpeza* - O café deve ser submetido ao processo de limpeza e separação das impurezas, que pode ser feito por peneiramento manual (abanação), ventilação forçada ou por separadores de ar e peneira (máquinas de pré-limpeza).

(b) *lavagem e separação* - Mesmo com a retirada das impurezas, o café, em geral, passa pelo lavador ou separador hidráulico que promove a separação de acordo com o estágio de maturação dos frutos, que apresentam densidades diferentes. Os frutos com graus diferentes de maturação, se mantidos juntos, resultam em bebida de qualidade inferior. O estágio ideal de maturação para a colheita do café é quando os frutos estão maduros, assemelhando-se a cerejas. Como a maturação ocorre de maneira não uniforme, devido às várias floradas emitidas pelo cafeeiro, são coletados simultaneamente grãos Verdes, Cerejas e Passas ou Bóia. O café Bóia, é aquele que atinge sua maturação completa ainda no pé. Após a colheita, o “Bóia” é separado por diferença de densidade do Cereja e do Verde. Essa separação é realizada em lavadores mecânicos para que se diminua ao máximo a possibilidade de se misturar grãos de outro grau de maturação junto ao lote de café Bóia. Esse é seco, de preferência em terreiros, para atingir suas características ideais de corpo e aroma (FAZENDA DA ONÇA, 2008).

(c) *descascamento/despolpamento* - Após a retirada do café Bóia, os grãos Verdes e Cerejas são encaminhados para o descascador onde serão previamente separados por pressão. Após descascamento, o café Cereja é encaminhado para a etapa de degomagem ou fermentação natural a fim de se eliminar o excesso de mucilagem (FAZENDA DA ONÇA, 2008). A fermentação natural ocorre por ação de enzimas naturalmente presentes nos grãos e/ou por enzimas produzidas pela microflora natural que o café recolhe do ambiente. Esse tipo de fermentação é de duração longa, de 18 a 36 horas, sendo influenciada, principalmente pela temperatura ambiente. Esse procedimento é denominado de Processamento por Via Úmida, no entanto, existe também o processamento do café sem a retirada da casca ou mucilagem da Cereja chamado de Processamento por Via Seca. Após lavagem e descascamento, que deve ocorrer no mesmo dia da colheita, o café segue imediatamente para o local de pré-secagem (terreiro).



Figura 2.3: (a) Lavagem dos grãos (b) separação do café bóia



Figura 2.4: Descascador mecânico



Figura 2.5: Tanque de fermentação

(d) *secagem* - Essa operação é de grande importância, tanto no aspecto de segurança, como no de qualidade do café. A secagem pode ser totalmente feita em terreiros ou completada com auxílio de secadores mecânicos;



Figura 2.6: Secagem do café no terreiro

(e) *beneficiamento* - É uma operação pós-colheita que transforma, pela eliminação das cascas e separação dos grãos, o fruto seco (coco ou pergaminho) em grãos de café que recebem a denominação de café Beneficiado. A operação de beneficiamento deve ser realizada o mais próximo possível da época de comercialização, para que o produto possa manter suas características originais;

(f) *armazenamento* - O café em coco é armazenado na propriedade enquanto o café beneficiado em armazéns-padrão. Na propriedade, o café em coco pode ser armazenado a granel em tulhas de madeira ou ainda ensacado em depósito de alvenaria, desde que esses locais sejam conservados secos, ensolarados e bem ventilados, visando uma baixa umidade. Nos armazéns-padrão, o café Beneficiado é armazenado numa estrutura que permite uma conservação ideal do produto, mantendo as condições apropriadas, como uniformidade de ventilação, luminosidade, temperatura e umidade.

Ao final do processo de pós-colheita, obtêm-se diferentes tipos de café que são classificados em função da maturidade dos grãos e do tipo de beneficiamento. Algumas classificações mais tradicionais são: café Bóia, café Verde Descascado, café Cereja Degomado, café Cereja Descascado, café Cereja em Coco.



Figura 2.7: Exemplos de cafés em diferentes estádios de maturação dos frutos

2.2. INDUSTRIALIZAÇÃO DO CAFÉ

2.2.1. Café Solúvel

Dados da Associação Brasileira da Indústria do Café (2007) revelam uma expansão substancial no consumo de café solúvel no mercado interno. Foi contabilizado um aumento de 2,6% no consumo de café nas diversas formas de torrado e moído, enquanto o solúvel alcançou a marca de 7,9% no mesmo período. Essa tendência do mercado brasileiro também é observada nos principais mercados internacionais, estimando-se que em 2015 cerca de 52% do consumo mundial de café ocorra sob a forma de solúvel. A produção do café solúvel, de uma forma resumida, envolve as seguintes etapas (LAGO *et al.*, 2006):

(a) *torrefação* – Realça o sabor e aroma do grão de café, já que o grão cru não apresenta gosto agradável.

(b) *moagem* – Reduz o tamanho dos grãos a fim de facilitar o processo de extração.

(c) *extração* – Extrai os compostos solúveis, em uma coluna extratora, através da injeção de água a uma temperatura entre 150°C a 190°C.

(d) *evaporação* – Concentra a solução em um sistema de evaporação de três estágios.

(e) *secagem e aglomeração* – Obtém-se o pó seco e granulado ou café solúvel.

O café solúvel é uma alternativa para o consumo diário pela rapidez e praticidade, no entanto, a qualidade da sua bebida ainda é muito inferior à bebida do café filtrado (SANZ *et al.*, 2002). Isso ocorre devido às perdas de aromas durante seu processamento nas etapas de extração, concentração e secagem. Normalmente, essências naturais

aquosas e oleosas (óleo de café) são reincorporadas ao produto final durante a etapa de aglomeração, a fim de conferir melhores características sensoriais. Dessa forma, a demanda pelo óleo de café torrado tem sido estimulada pelo mercado de café solúvel. A Figura 2.8 representa um diagrama de blocos do processo de produção do café solúvel.

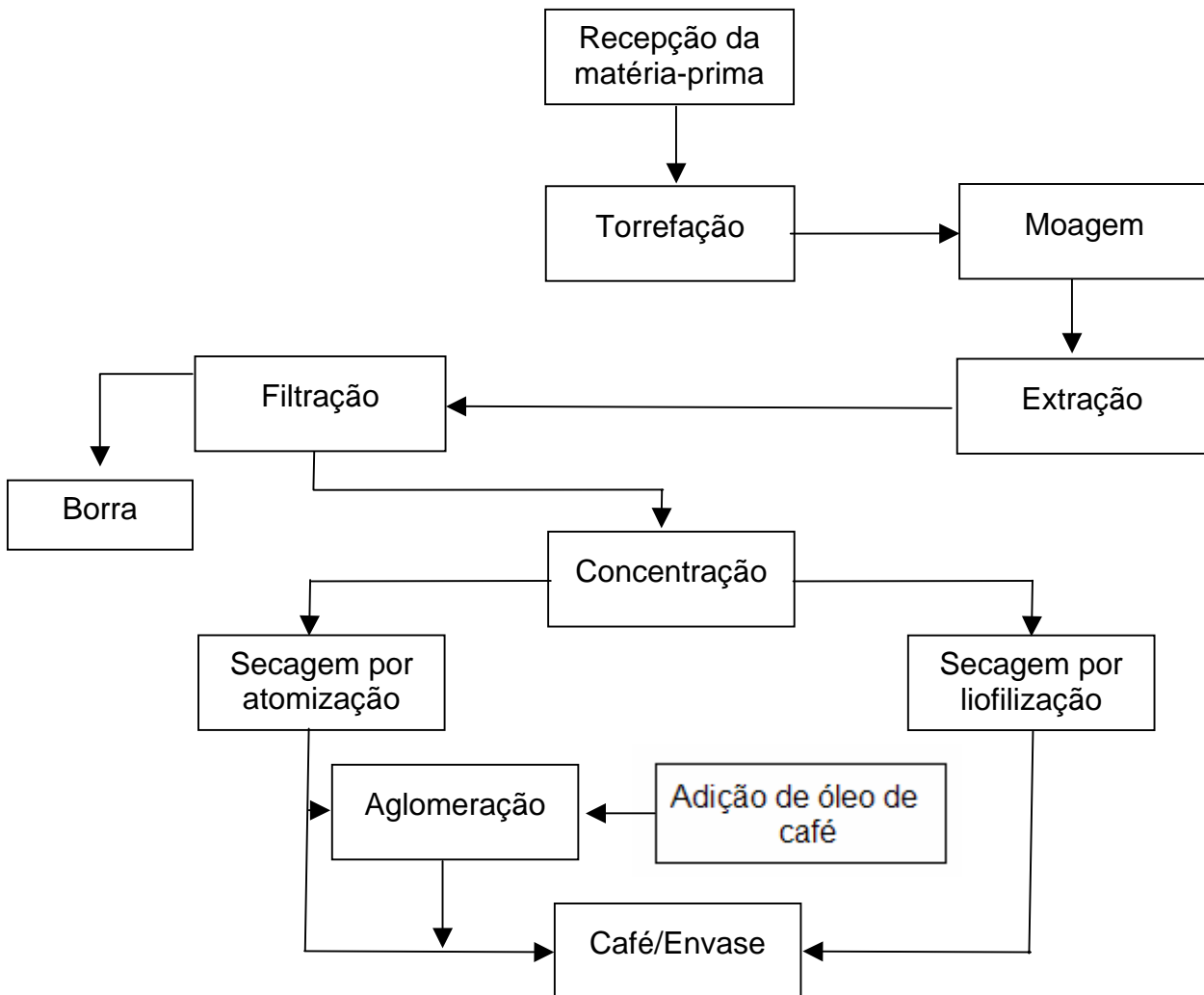


Figura 2.8: Diagrama de blocos para produção de café solúvel

2.2.1.1. Resíduos do Processamento do Café Solúvel

Devido à abertura comercial, criou-se um ambiente competitivo e receptivo às tecnologias que priorizam a preservação do meio ambiente. Nesse contexto, o aproveitamento de resíduos e subprodutos gerados na atividade industrial passou a ser uma meta de todas as empresas de transformação. Com o aumento do consumo de café solúvel, o aproveitamento sustentável da borra de café vem sendo incorporado pelos

países produtores através de tecnologias alternativas que agregam maior valor a esse sub-produto (MARQUES *et al.*, 2008).

Antigamente, a borra de café era descartada como um resíduo industrial sem valor algum. Atualmente, nas indústrias de processamento de café solúvel, a borra de café é utilizada na própria fábrica para geração de energia através do processo de combustão em caldeiras. A queima desses resíduos é importante no sentido de minimizar os custos e reduzir os problemas ambientais (NETO *et al.*, 2008). No entanto, essa borra apresenta, em sua composição, substâncias de interesse alimentício e industrial como lipídios, proteínas e fibras e estas são desperdiçadas no processo de queima (ARAUJO *et al.*, 2005).

Em média, para cada tonelada de café Verde obtém-se 480 kg da borra. Enquanto o café solúvel possui 0,1% de lipídios, em base seca, a borra possui cerca de 20% de óleo. Uma estimativa mostrou que as plantas de produção de café solúvel no Brasil geravam, aproximadamente, 34 toneladas de borra por dia, o que representa um potencial para a produção diária de 1,5 toneladas do óleo de café (FREITAS *et al.*, 2006). Dessa forma, a extração do óleo seria uma alternativa para a utilização dessa borra que teria aplicação no próprio processamento de café solúvel, na etapa de aglomeração. Como a quantidade de óleo gerado é elevada para essa etapa, outra aplicação desse óleo seria a síntese de biodiesel.

2.2.2. Extração do Óleo de Café

A extração do óleo de café é normalmente realizada de duas maneiras: com uso de solventes ou por prensagem.

2.2.2.1. Extração por Solvente

É o nome dado a qualquer processo de separação em que um dos componentes (espécie) de uma mistura é transferido para o extrato. Uma característica que deve ser ressaltada em uma extração é o equilíbrio de concentrações da espécie (soluto) contida tanto na fase sólida quanto na fase líquida. Ao manter em contato o solvente e a matéria-prima, observa-se uma redução da fração mássica do soluto na fase sólida e um aumento da fração mássica do soluto na fase líquida (RITTNER, 1991). Isso se deve, após o enchimento dos poros por solvente, à transferência do óleo da fase sólida para a líquida, até que se atinja o equilíbrio.

A extração de óleos vegetais pode ser realizada por uma série de solventes orgânicos. Para a extração de óleo de café a partir dos grãos torrados ou crus e da borra de café, o solvente utilizado industrialmente é o n-hexano (derivado de petróleo). A busca de alternativas para substituição desse solvente na extração de óleos vegetais tem como meta principal a preservação do meio ambiente e do homem, tendo em vista a toxicidade do n-hexano. O uso do álcool etílico como alternativa aos solventes fósseis apresenta boas perspectivas comerciais, uma vez que o etanol pode ser obtido a partir de diferentes fontes vegetais, a preços competitivos. Além disso, o álcool apresenta baixa toxicidade e, embora também inflamável, é menos perigoso que o n-hexano (FREITAS, *et al.*, 2006).

Os principais problemas a serem considerados com relação à extração usando álcool etílico são (RITTNER, 1991):

- A baixa solubilidade dos óleos em álcool;
- O baixo fluxo difusivo do óleo a partir do material a ser extraído;
- O processo requer altas razões solvente/sólido com uma conseqüente produção de micelas diluídas, aumentando o custo de separação.

Parte dos problemas mencionados acima para o uso do etanol pode ser contornada através da aplicação de tecnologia adequada, ligeiramente diferente da utilizada com n-hexano, e adoção de algumas modificações que podem permitir o uso de álcool como solvente, em plantas já existentes (RITTNER, 1991).

Os resultados reportados na literatura para a extração do óleo de café arábica, utilizando hexano ou éter de petróleo, apresentaram em média 16 ± 1 % de óleo em base seca (CAMARGOS, 2005).

2.2.2.2. Extração por Prensagem

O método de extração a frio do óleo de café utiliza prensas contínuas do tipo parafuso sem fim. Os resultados obtidos na literatura (CAMARGOS, 2005) para a extração do óleo a partir de grãos de café arábica crus (4%) e grãos torrados (10,5%) demonstram que a eficiência de extração do óleo de grãos torrados é quase três vezes superior à eficiência de extração para grãos crus. Isso provavelmente ocorre devido a dois fenômenos: i) perda de massa do grão durante a torra, onde a quantidade de óleo presente no mesmo é mantida, pois o óleo não é volátil, ii) quebra da estrutura celular pelo calor da torra, facilitando a liberação do óleo durante a prensagem. Como esperado,

o rendimento do processo de prensagem é inferior quando comparado à extração do óleo com n-hexano.

2.2.3. Extração Industrial e Refino de Óleos Vegetais

A extração em larga escala do óleo vegetal apresenta diversas etapas. A primeira consiste no pré-tratamento do grão. O grão é quebrado e condicionado com vapor para facilitar a extração. Logo em seguida, é prensado na forma de flocos que são então alimentados nos extratores. Na extração com solvente, os flocos são alimentados em conjunto com o solvente, que é repetidamente evaporado e condensado. Após o término da extração, a mistura óleo/solvente é separada em uma bateria de evaporadores e a seguir o óleo encaminhado a uma unidade de refino enquanto o solvente é reciclado. O solvente adsorvido na torta é removido no tostador (CAMARGOS, 2005).

O refino tem por objetivo separar dos óleos brutos, as substâncias indesejáveis, as quais afetam as propriedades organolépticas e a estabilidade do óleo. O refino compreende as seguintes etapas principais: degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização (BAILEY, 1996).

Na etapa de degomagem, removem-se, por centrifugação, os fosfatídeos ou gomas, ceras e substâncias coloidais que podem causar escurecimento do óleo quando aquecido.

Na etapa de neutralização, são removidos os ácidos graxos livres, normalmente existentes no óleo bruto, empregando-se uma solução de hidróxido de sódio.

No processo de branqueamento, eliminam-se os pigmentos indesejáveis usando-se substâncias adsorventes, como carvão ativo e argilas especiais.

Na desodorização, as substâncias de baixo peso molecular são removidas por arraste com injeção de vapor direto e alto vácuo. Essas substâncias voláteis, que normalmente estão presentes nos óleos brutos, são as responsáveis pelo sabor e odor indesejáveis no produto.

2.3. FENÔMENOS DE TRANSPORTE E ESTUDOS CINÉTICOS

2.3.1. Transferência de massa

Fourier, em 1822, propôs uma equação constitutiva para prever a condução de calor nos materiais. A formulação apresentada por Fourier foi também empregada por

Fick para modelar o transporte difusivo e por Newton para a deformação de determinados fluidos quando submetidos a uma força cisalhante (BIRD, STEWART AND LIGHTFOOT, 1980; MEJLBRO, 1996).

$$q = K \frac{dT}{dn}; \quad (\text{Lei de Fourier})$$

$$J = D \frac{dC}{dn}; \quad (\text{Lei de Fick})$$

$$\tau = \mu \frac{dv}{dn}; \quad (\text{Lei de Newton})$$

Essas equações, de estrutura idêntica, relacionam o fluxo de calor, massa e quantidade de movimento com o gradiente de temperatura, concentração e velocidade, respectivamente. Substituindo-se as leis de Fourier, Fick e Newton nas equações simplificadas de balanço de energia, massa e movimento, obtêm-se as equações diferenciais de transporte de calor (Eq. 2.1), massa ((Eq. 2.2) e movimento (Eq. 2.3), respectivamente:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 (T) \quad [\text{Eq.2.1}]$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 (C) \quad [\text{Eq.2.2}]$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \mu \nabla^2 (v) \quad [\text{Eq.2.3}]$$

onde:

q, J e τ representam os fluxos de calor, de massa e de quantidade de movimento (tensão de cisalhamento), respectivamente;

T, c e v – temperatura, concentração e velocidade, respectivamente;

K, D e μ - são coeficientes de transporte e representam a condutividade térmica, o coeficiente de difusão e a viscosidade, respectivamente.

n – representa a direção normal ao escoamento

2.3.2. Estudo da Viscosidade

O termo reologia foi introduzido pelo professor Bingham para definir o “estudo do escoamento ou deformação da matéria”. Esta definição foi aceita quando a American Society of Rheology foi fundada em 1929. O conhecimento de reologia é essencial nos dias de hoje nos mais variados campos envolvendo profissionais atuantes em indústrias de tintas, detergentes, óleos, plásticos, etc., bem como profissionais acadêmicos com interesse em diversas áreas.

A reologia tem como objetivo prever a força necessária para causar uma dada deformação ou escoamento em um corpo, ou então, prever a deformação ou escoamento resultante da aplicação de um dado sistema de forças em um corpo. Dessa maneira, a reologia nos permite analisar quantitativamente o comportamento de um fluido em interação com um sistema de processamento, através da formulação e resolução de equações que descrevem o processo.

A viscosidade é a propriedade dos fluidos que mede a resistência ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão. Ou seja, mantendo-se a força de cisalhamento, quanto maior a viscosidade, menor a velocidade em que o fluido se movimenta. Um fluido é chamado de Newtoniano quando segue a Lei de Newton da viscosidade.

Os fluidos que não obedecem a equação de Newton são ditos não-newtonianos. A equação 2.4 é uma generalização da lei de Newton para representar os fluidos não-newtonianos.

$$\tau = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad [Eq.2.4]$$

onde η é função da taxa de deformação.

Se η decresce com a taxa de deformação, o comportamento do fluido é dito pseudoplástico; se η aumenta é denominado dilatante.

Existem numerosos modelos e equações empíricas para relacionar a tensão cisalhante e a variação da velocidade no estado estacionário, como, por exemplo, o modelo de Bingham e a Lei da Potência (FOX *et al.*, 2001).

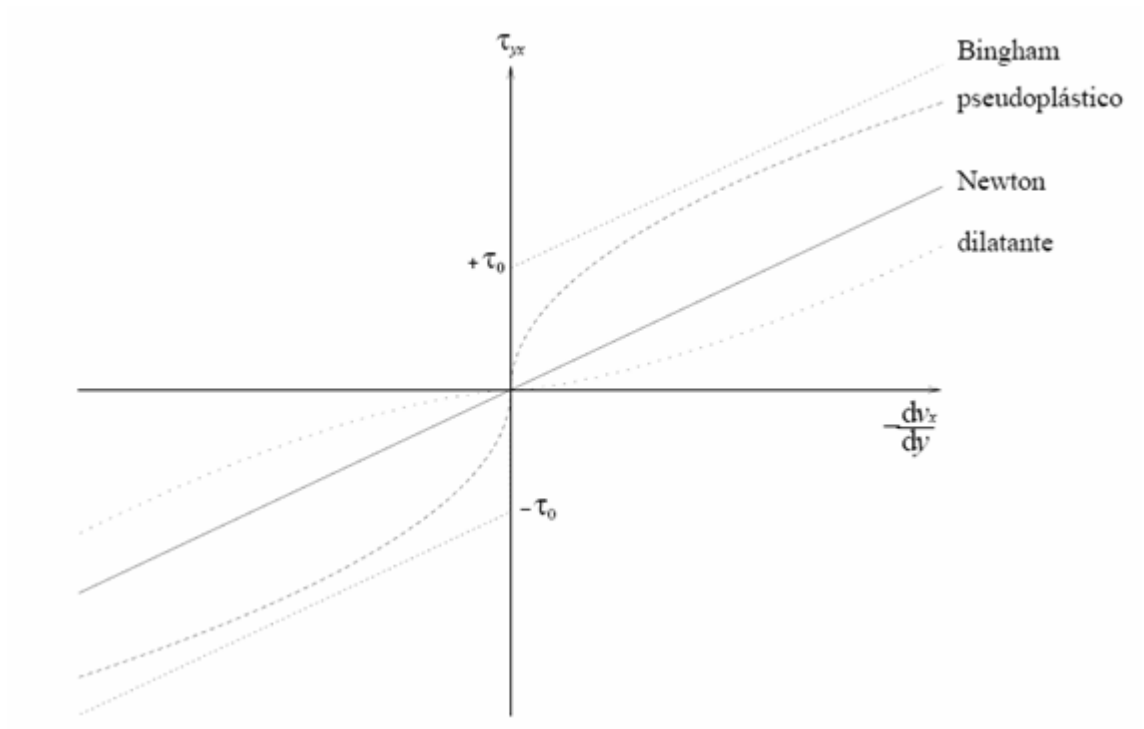


Figura 2.9: Comportamentos não-newtonianos

Modelo de Bingham

$$\tau = -\mu \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0; \text{ se } |\tau| > \tau_0 \quad [Eq.2.5]$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0; \text{ se } |\tau| < \tau_0$$

Um fluido é dito plástico de Bingham quando permanece rígido se a tensão cisalhante aplicada é menor do que a tensão τ_0 , mas comporta-se como um fluido Newtoniano quando a tensão aplicada excede τ_0 (FOX *et al.*, 2001).

Lei da Potência

$$\tau = -m \left| \frac{dv_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{dv_x}{dy} \quad [Eq.2.6]$$

se

$n = 1$ reduz-se à lei de Newton

$n < 1$ pseudoplástico

n > 1 dilatante

CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATÉRIAS-PRIMAS

3.1.1. Grãos de Café

Foram utilizadas grãos de café, 100% arábica, colhidos em diferentes estádios de maturação: café Bóia, café Verde e café Cereja. Todas as amostras foram fornecidas pela Fazenda São Francisco localizada em São José do Vale do Rio Preto. Os grãos foram colhidos, classificados e secos na safra de 2006 e, após repouso em silos, foram torrados na própria fazenda conforme padrões internacionais. Após a torra, os grãos foram embalados sob vácuo em sacos laminados e congelados até seu uso.

A composição em ácidos graxos dos óleos extraídos dos grãos de café torrado fornecidos pela Fazenda São Francisco foi avaliada na Embrapa Agroindústria de Alimentos usando métodos padrões AOCS (2000).

Tabela 3.1: Composição em ácidos graxos dos óleos de café extraídos a partir dos grãos torrados

Ácidos graxos (%)	Cereja	Verde	Bóia	Literatura
C16:0 Palmítico	31,55	33,97	33,06	32,10 a 33,20
C18:0 Esteárico	6,79	7,10	7,68	7,50 a 8,20
C18:1 Oleico	14,28	9,48	9,11	8,20 a 12,50
C18:2 Linoleico	40,37	43,03	42,69	42,60 a 46,20
C18:3 Linolênico	1,35	1,40	1,22	0,90 a 1,40
C20:0 Araquídico	2,36	2,49	2,73	2,60 a 3,30
Relação saturados/insaturados	0,73	0,81	0,82	~ 0,80

Fonte: FREITAS *et al.*, 2004

3.1.2. Borra de café

Foram utilizadas borras de café resultantes do preparo de café com água quente (90°C) em duas pressões: pressão ambiente (cafeteira doméstica) e sob pressão de 9 atm (padrão da máquina de café expresso comercial). As borras de café foram obtidas a

partir de uma mistura comercial realizada pelo produtor de grãos de café Cereja, Verde e Bóia, do mesmo fornecedor dos grãos torrados.

3.1.3. Solvente

Utilizou-se como solvente etanol absoluto PA (VETEC).

3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.2.1. Extração do Óleo de Café torrado

3.2.1.1. Preparo do grão

Os grãos de café torrados foram triturados, cada amostra separadamente, utilizando-se moinho de facas (BRABENDER).

3.2.1.2. Extração do óleo

As amostras trituradas, 20 gramas de cada tipo de grão, foram pesadas em balança analítica (BIOPRECISA, 4 casas decimais), colocadas em um erlenmeyer de 200 ml de capacidade e misturadas com 60 gramas de etanol. As suspensões foram incubadas em banho termostatizado entre 65 e 67 °C, sob agitação de aproximadamente 20 rpm, na pressão atmosférica (Figura 3.2). O tempo de contato entre as fases variou de 10 a 30 minutos em intervalos de 5 minutos entre cada ensaio, para avaliar a cinética de extração. Todos os ensaios foram realizados em duplicata.

Os principais parâmetros da extração do óleo de café com etanol, razão solvente/carga (p/p) e temperatura foram selecionados a partir de experimentos já otimizados por LAGO & FREITAS (2006).

Após extração, a mistura foi filtrada a pressão reduzida e a quente usando-se um funil de Büchner acoplado a um Kitassato (Figura 3.2), separando-se a micela (mistura de etanol e óleo) da fibra desengordurada (torta). O solvente presente na micela foi separado e recuperado por destilação a 600 mm Hg a 60°C, em rotaevaporador (QUIMIS).

O óleo foi colocado a 60°C em uma estufa para a evaporação do etanol. A torta desengordurada foi também colocada em estufa a 60°C por uma hora. Todas as frações obtidas, óleo de café e torta, foram pesadas em balança analítica.



Figura 3.1: banho com agitação



Figura 3.2: Filtração a vácuo

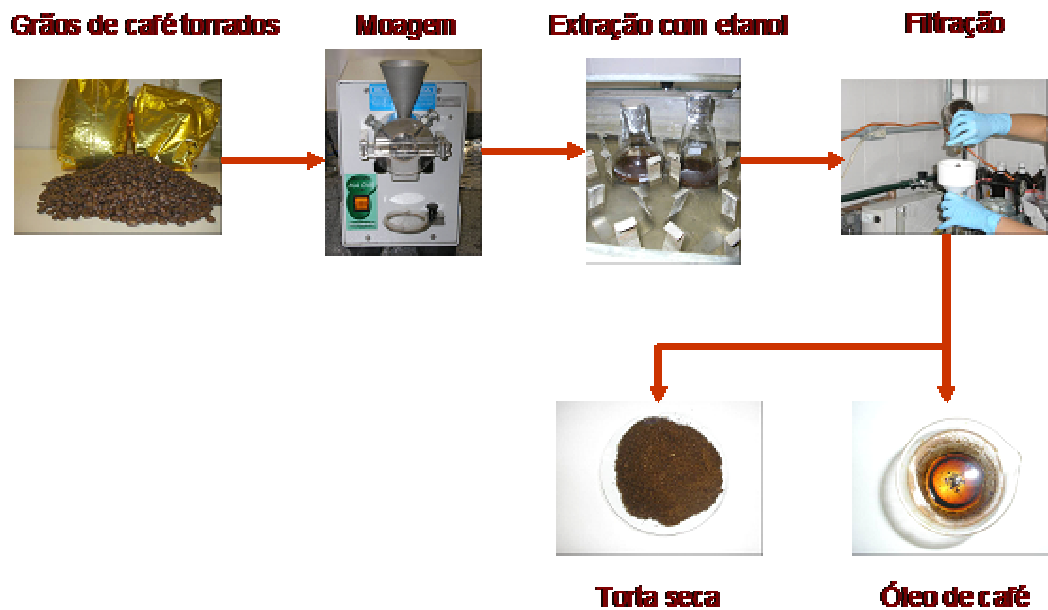


Figura 3.3: Esquema experimental da extração do óleo de café

3.2.1.3 Determinação da Concentração de Equilíbrio

A concentração do soluto no equilíbrio das fases (líquida e sólida) foi determinada conduzindo-se ensaios semelhantes aos descritos anteriormente (mesmas condições de extração), modificando-se apenas o tempo de contato do solvente com o grão de café moído. O tempo de contato foi suficientemente grande (12 horas) para assegurar o equilíbrio termodinâmico (FREITAS *et al*, 2007).

3.2.1.4 Teor de Óleo no Grão de Café

O teor de soluto (fração lipídica) no grão de café foi determinado utilizando-se excesso de etanol (relação solvente carga de 10:1) (LAGO & FREITAS, 2006) e um tempo de contato de aproximadamente 28 horas. Nessas condições, ocorre a extração total do óleo presente em cada amostra. Os demais parâmetros foram mantidos iguais aos das extrações descritas no item 3.2.1.2.

3.2.2. Extração do Óleo da Borra de Café

3.2.2.1. Preparo da Borra

As amostras foram secas a 60°C em secador de bandejas (MACANUDA) com fluxo de ar até peso constante por aproximadamente 24 horas. Foi realizado o acompanhamento da cinética de secagem, retirando-se uma pequena amostra a cada 1 hora, durante 8 horas (Figura 3.4).

3.3.2.2. Extração do Óleo da Borra

Após a completa secagem das amostras, essas foram submetidas à extração com etanol absoluto, mantendo-se o mesmo procedimento adotado para as amostras de grãos de café.

3.2.3 Análise Granulométrica

A análise granulométrica da borra seca e dos grãos de café triturados foi conduzida pesando-se 100 gramas de cada amostra. Utilizou-se um conjunto de peneiras vibratórias com aberturas de 14, 28, 32, 48 e 100 mesh Tyler. O conjunto foi mantido por cerca de 10 minutos, sob agitação constante (Figura 3.5). Cada peneira foi previamente pesada e, após a agitação, o peso de cada fração foi determinado em balança semi-analítica (METTLER, 2 casas decimais).



Figura 3.4: Secador de bandejas aeradas



Figura 3.5: Conjunto de Peneiras com base vibratória

3.2.3.1 Diâmetro Médio da Sauter

O diâmetro médio da Sauter foi calculado pelas equações 3.1 e 3.2.

$$d_{sauter} = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{d_i}} \quad [\text{Eq.3.1}]$$

$$d_{sauter} = \frac{1}{\int \frac{x_i}{d_i}} \quad [\text{Eq.3.2}]$$

onde:

x_i é a fração mássica e d_i é o diâmetro médio correspondente.

Na equação (3.1), d_i é calculado pela média entre as aberturas inferior e superior da peneira e na equação 3.2, pelo modelo empírico, ajustado conforme descrição abaixo:

Os modelos RRB (Rosin-Rammler-Bennett) e GGS (Gates-Gaudin-Schuhmann) foram usados para representar os dados experimentais. Os modelos foram linearizados e os dados experimentais foram ajustados a cada modelo (MASSARANI, 2002). O coeficiente de correlação referente a cada modelo foi determinado através de uma regressão linear.

Modelo GGS:

$$Y = \left(\frac{d}{k}\right)^m \quad [\text{Eq.3.3}]$$

Modelo RRB:

$$Y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{k}\right)^m\right] \quad [\text{Eq.3.4}]$$

Onde:

Y é a fração mássica acumulada;

d é o diâmetro médio da partícula;

k e m são os parâmetros a determinar.

3.2.4. Coeficiente de Difusão: Modelo Matemático

O cálculo do coeficiente de difusão foi estimado supondo geometria esférica dos grãos de café moído e que as partículas não oferecem nenhuma resistência externa à transferência de massa. Adicionalmente, utilizou-se a consideração de que esse coeficiente é independente da concentração de soluto na amostra.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{ef} \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad [\text{Eq.3.5}]$$

$$\text{c.i.} \longrightarrow C(r,0) = C_0 \quad [\text{Eq.3.6}]$$

$$\text{c.c.1} \longrightarrow \left(\frac{\partial C}{\partial r} \right)_{0,\forall t} = 0 \quad [\text{Eq.3.7}]$$

$$\text{c.c.2} \longrightarrow C(R,t) = C_{eq} \quad [\text{Eq. 3.8}]$$

Onde, $C(r,t)$, C_0 e C_{eq} são as concentrações em diferentes posições r no grão no instante de tempo t , a concentração inicial supostamente uniforme e a concentração de equilíbrio, respectivamente. A resolução dessa equação, com as condições especificadas, é dada por (BROOKER *et al.*, 1992):

$$\frac{C(t) - C_{eq}}{C_0 - C_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right) \quad [Eq.3.9]$$

Onde, \bar{C} é o valor médio da concentração dentro da esfera em um dado instante de tempo t .

3.2.5. Reologia

O comportamento reológico dos óleos de café torrado e da borra de café foi realizado em um reômetro de cone e placa, Brookfield Ultra/DVD III (Figura 3.6), nas temperaturas de 20, 30, 37, 50 e 60°C. Os dados obtidos de tensão de cisalhamento e taxa de deformação foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, usando-se o modelo clássico representado pela lei de potência (Eq. 3.10). A relação entre a viscosidade e a temperatura foi avaliada pela equação de Arrhenius (Eq. 3.11).

$$\tau = \tau_0 + k(\dot{\gamma})^n \quad [Eq.3.10]$$

$$\mu = \mu_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad [Eq.3.11]$$

onde:

τ - tensão de cisalhamento (Pa ou dina/cm²);

$\dot{\gamma}$ - taxa de deformação (s⁻¹);

k - índice de consistência;

n - número de potência;

μ - viscosidade (Pa.s ou poise);

E_a é a energia de ativação;

R é a constante dos gases;

T é a temperatura (K).



Figura 3.6: Reômetro de placas

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Grãos de Café Torrados

4.1.1. Teor de Óleo

O teor de óleo para os três diferentes tipos de grãos estudados está apresentado na Figura 4.1. Este resultado foi expresso pela relação entre a massa de óleo obtida com etanol e a massa da amostra, em base seca.

O café torrado a partir dos grãos Verdes foi o que apresentou maior teor de óleo. Esse resultado pode ser explicado pelo fato do óleo estar mais protegido pela parede celular, mais íntegra no momento da torra dos grãos ($T > 240^{\circ}\text{C}$) evitando a perda de óleo. Isso é esperado, pois durante o amadurecimento a parede celular dos vegetais sofre uma hidrólise parcial causado pelas enzimas endógenas. Entretanto, o café Bóia, o mais maduro dos grãos, apresentou maior teor de óleo que o café Cereja. Nesse caso, ocorre a perda de compostos voláteis, incluindo a água, no fruto sem redução da massa de óleo.

Resultados similares para o teor de óleo em grãos de café torrado foram reportados na literatura por FREITAS *et al.* (2006) e LAGO (2001). Nestes estudos os autores encontraram, respectivamente, valores entre 16 a 18% e 14 a 20%.

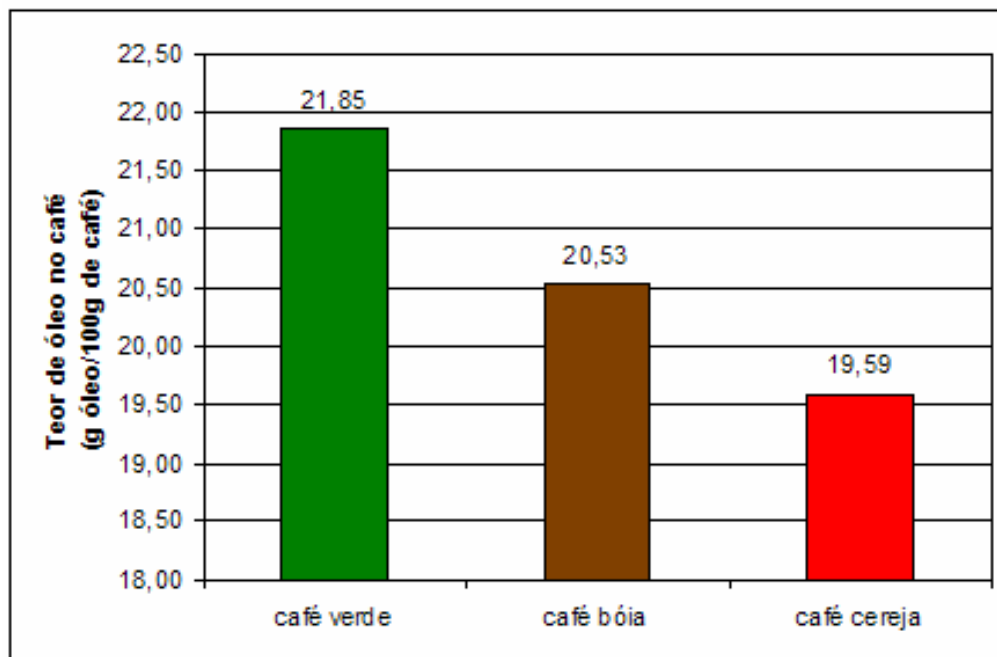


Figura 4.1: Teor de óleo nos grãos de café (extrato etanólico)

4.1.2. Concentração de Óleo no Equilíbrio

A Figura 4.2 apresenta a porcentagem de óleo extraída no equilíbrio (tempo infinito). Os dados foram obtidos nas mesmas condições usadas para o estudo cinético.

A porcentagem de óleo no café Verde foi o maior valor encontrado, ratificando a menor perda de óleo no processo de torra. A concentração de óleo extraída no equilíbrio para os grãos de café Cereja e Bóia foi próxima (Figura 4.2). Esse resultado foi similar aos valores encontrados por FREITAS & LAGO (2007), para a concentração de equilíbrio (14 a 16 g/100g) durante a extração do óleo de café a partir de grãos secos (antes da torra).

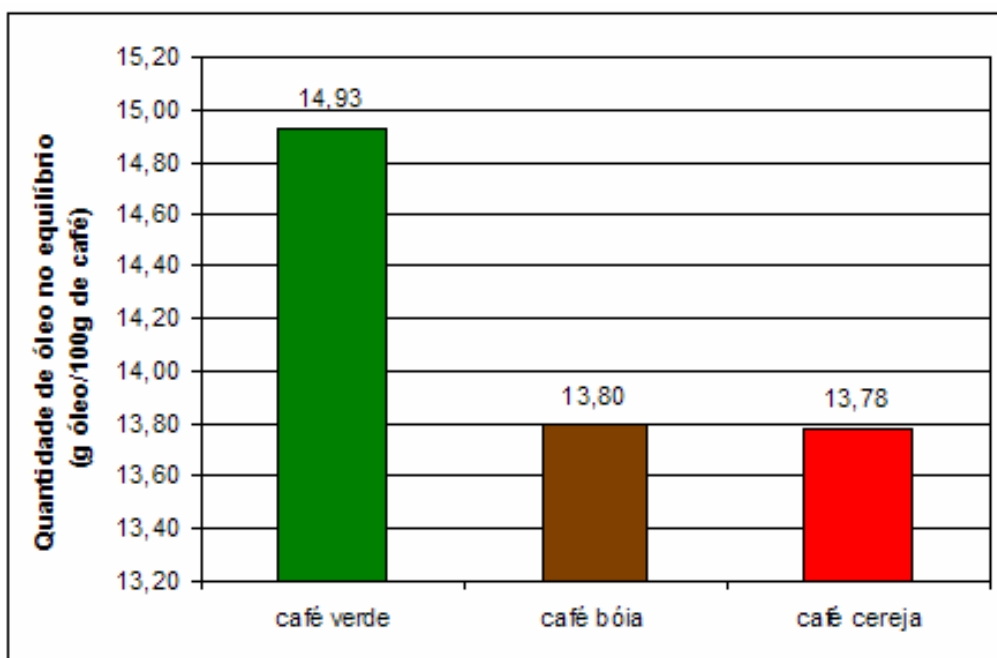


Figura 4.2: Porcentagem de óleo extraído, no equilíbrio:
razão solvente/carga = 3; T = 65 °C, t=12 horas

4.1.3. Análise Granulométrica dos grãos torrados

A distribuição granulométrica e a distribuição acumulada de tamanho dos grãos de cafés moídos estão apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4. Como pode ser observado as partículas apresentaram tamanho entre 0,05 e 1,2 mm, sendo que 99% das partículas tem diâmetro inferior a 1 mm. Portanto, a distribuição de tamanho dos grãos encontra-se dentro da faixa usada para a extração comercial de óleos vegetais com hexano (RITTNER, 1991). Essa faixa de partícula foi utilizada no estudo já que esse parâmetro

pouco influencia na extração, sendo a relação solvente/carga o principal parâmetro (FREITAS *et al*, 2004).

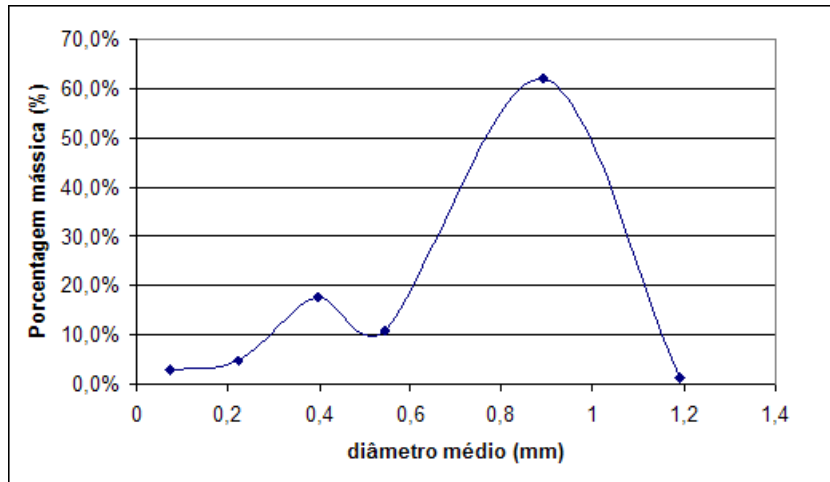


Figura 4.3: Distribuição de tamanho dos grãos moídos nas amostras de café

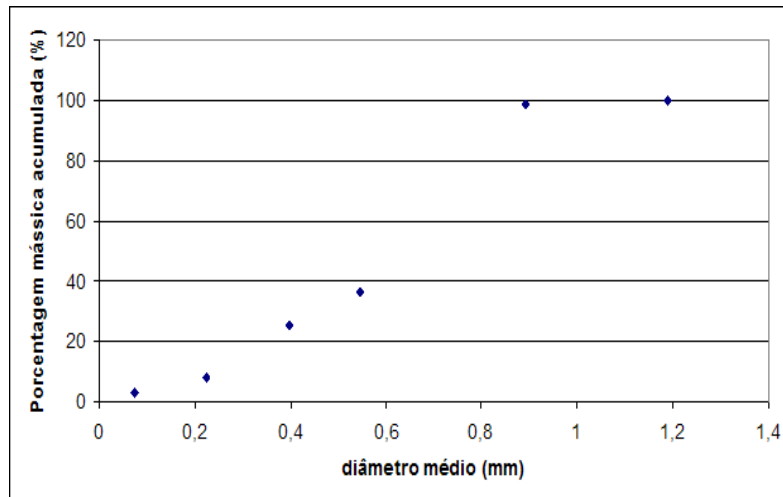


Figura 4.4: Porcentagem mássica acumulada vs diâmetro médio

Nas figuras 4.5 e 4.6 estão representados os ajustes dos pontos experimentais aos modelos GGS, e RRB, respectivamente. Os coeficientes angular e linear das retas fornecem os parâmetros desejados (m e k).

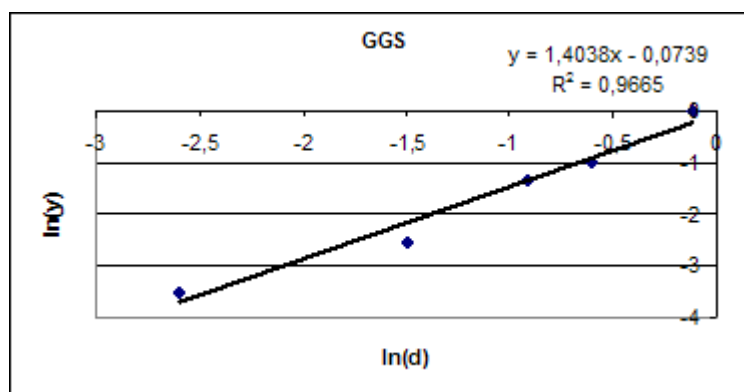


Figura 4.5: Ajuste do Modelo GGS linearizado

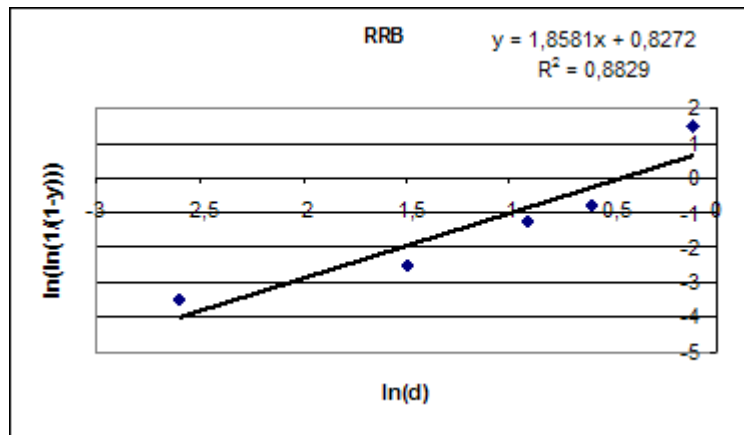


Figura 4.6: Ajuste do Modelo RRB linearizado

O modelo GGS apresentou o melhor ajuste com coeficiente de regressão igual a 0,97, entretanto, o modelo RRB foi o que apresentou diâmetro médio mais próximo do valor estimado pelo método discreto. Os valores encontrados para os parâmetros do modelo RRB, k e m , foram 0,64 e 1,86 respectivamente, originando a função distribuição acumulada menor que representado pela equação (4.1).

$$Y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{0,64}\right)^{1,86}\right] \quad [\text{Eq. 4.1}]$$

Na tabela 4.1 estão apresentados os resultado calculados para o diâmetro médio de Sauter usando os dois métodos clássicos: o diferencial e o discreto, este usa os dados médios obtidos em peneira.

Tabela 4.1: Diâmetro médio de Sauter (mm) para os grãos de café torrado e moído

d _{SAUTER} (Método diferencial)		d _{SAUTER} (Método discreto)
GGs	RRB	
0,29	0,35	0,51

4.1.4. Cinética

As curvas cinéticas, obtidas pela extração do óleo de café a partir dos grãos torrados, estão apresentadas na Figura 4.7. Como esperado, observa-se inicialmente um

crescimento exponencial com valor assintótico a partir de 25 minutos de incubação para as três curvas. LAGO & FREITAS (2007) encontraram um tempo de 20 minutos para extração do óleo de café seco (não torrado) com etanol comercial, a partir do qual a quantidade de óleo extraída era pouco representativa.

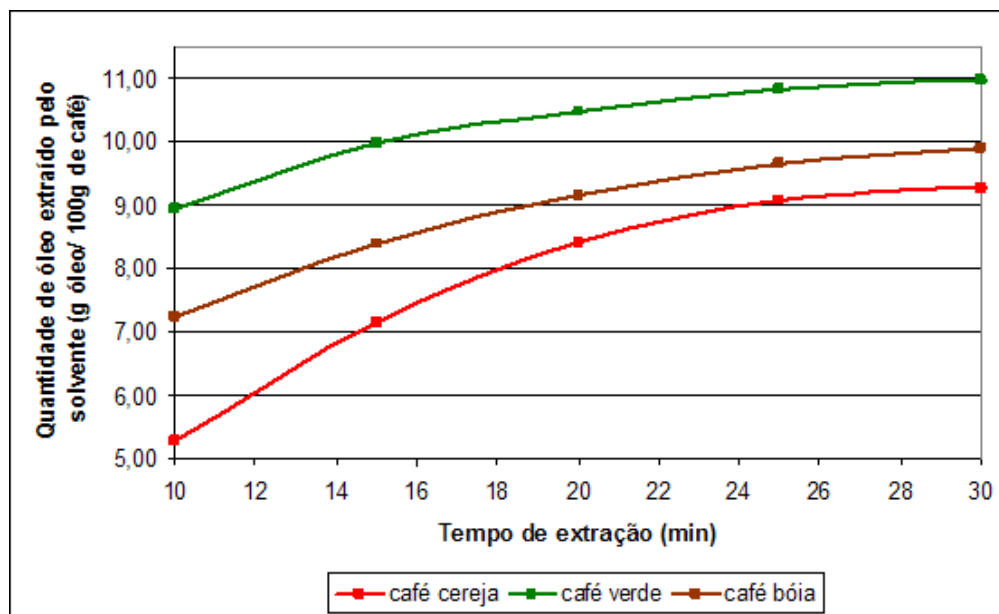


Figura 4.7: Cinética da extração de óleo nos grão de café

4.1.5. Coeficiente de Difusão

O coeficiente de difusão foi calculado tomando como base a concentração de soluto que permanece na fase sólida. Esses valores foram calculados subtraindo-se a quantidade de óleo transferida para a fase líquida do teor inicial de óleo em cada amostra (tabelas 4.2, 4.3 e 4.4).

Tabela 4.2: Concentrações usadas no cálculo do coeficiente de difusão – café Verde

Café Verde				
Tempo (min)	C(t) (g _{óleo} /100g de café)	C ₀ (g _{óleo} /100g de café)	C _{eq} (g _{óleo} /100g de café)	Erro absoluto
10	12,92			
15	11,87			
20	11,38	21,85	6,92	2,010
25	11,01			
30	10,88			

Tabela 4.3: Concentrações usadas no cálculo do coeficiente de difusão – café Bóia

Café Bóia				
Tempo (min)	C(t) (g _{óleo} /100g _{de café})	C ₀ (g _{óleo} /100g _{de café})	C _{eq} (g _{óleo} /100g _{de café})	Erro absoluto
10	13,30			
15	12,14			
20	11,36	20,53	6,73	0,41
25	10,88			
30	10,63			

Tabela 4.4: Concentrações usadas no cálculo do coeficiente de difusão – café Cereja

Café Cereja				
Tempo (min)	C(t) (g _{óleo} /100g _{de café})	C ₀ (g _{óleo} /100g _{de café})	C _{eq} (g _{óleo} /100g _{de café})	Erro absoluto
10	14,32			
15	12,44			
20	11,18	19,59	5,80	0,92
25	10,53			
30	10,31			

Os coeficientes de difusão, determinados a partir dos dados de concentração versus tempo e do raio médio das partículas, foram estimados por regressão não linear utilizando-se um método de otimização (*Solver*) disponível no Excel 2003. Este método estimou o parâmetro da regressão minimizando o erro absoluto. Em todos os casos, considerou-se os três primeiros termos da série (Eq. 3.9) uma vez que os termos subsequentes são de ordem de grandeza inferior ao erro absoluto do ajuste.

Tabela 4.5: Coeficiente de Difusão para os grãos de café torrado

Tipo de Grão	Coeficiente de difusão (m ² /s)
Verde	1,32E-11
Bóia	1,09E-11
Cereja	7,95E-12

Como pode ser visto na tabela 4.5, o maior coeficiente de difusão (1,32 E-11) foi observado para os grãos de café Verde. Este resultado deve-se, principalmente, ao maior teor de óleo encontrado nestes grãos que nos demais. FRANCO *et al.* (2007) obtiveram

valores similares para o coeficiente de difusão de óleo de *Rosa rubiginosa* em etanol 96% (1,2 E-11 a 2,2 E-10), usando uma relação solvente/carga entre 15:1 e 50:1, valor bem superior aos valores usados neste trabalho (3:1). Por outro lado, a difusividade de óleos vegetais em solventes tradicionais (n-hexano) é da ordem de 10^{-8} a 10^{-9} m²/s, cerca de 10^{-2} vezes maior que os valores obtidos para extração com etanol (FRANCO *et al.*, 2007; RITTNER, 1991).

Apesar dos resultados cinéticos serem menos favoráveis para o etanol, este solvente além de renovável é menos poluente e, portanto, ambientalmente mais recomendado que os derivados de petróleo. Como mostrado por FREITAS & LAGO (2007), melhores resultados podem ser alcançado em temperaturas da ordem de 70°C. Entretanto, esta temperatura é muito próxima do ponto de ebulição do etanol e pode acarretar perda de solvente por evaporação. RITTNER (1991) sugere que o processo de extração de óleos vegetais seja conduzido em pressões da ordem de 1,5 atm e temperatura de 80°C. Nesse caso, o emprego de etanol é economicamente vantajoso se comparado com o uso de n-hexano.

4.1.6. Viscosidade

Na faixa de temperatura estudada, os óleos de café extraídos dos grãos torrados e moídos apresentaram comportamento de fluido newtoniano. Os resultados de viscosidade, média de cinco determinações, podem ser visualizados na tabela 4.6 na faixa e temperatura de 20 a 50°C:

Tabela 4.6: Viscosidade média do óleo de café torrado

Temperatura (°C)	Média da viscosidade (cP)
20	227,68
30	111,98
40	58,57
50	40,73

Com poucas exceções, os óleos vegetais apresentam comportamento newtoniano com viscosidade fortemente dependente da temperatura (SANTOS, 2005). A energia de ativação, que é o principal parâmetro da equação de Arrhenius, foi estimada a partir do ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados aplicada aos dados experimentais. O valor obtido (5733,7) para E_a/R (SI) foi similar ao reportado por BARRETO *et al* (2007) para óleo de soja extraído com etanol (5287).

$$\ln\left(\frac{v_0}{v}\right) = \frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right) \quad [\text{Eq.4.2}]$$

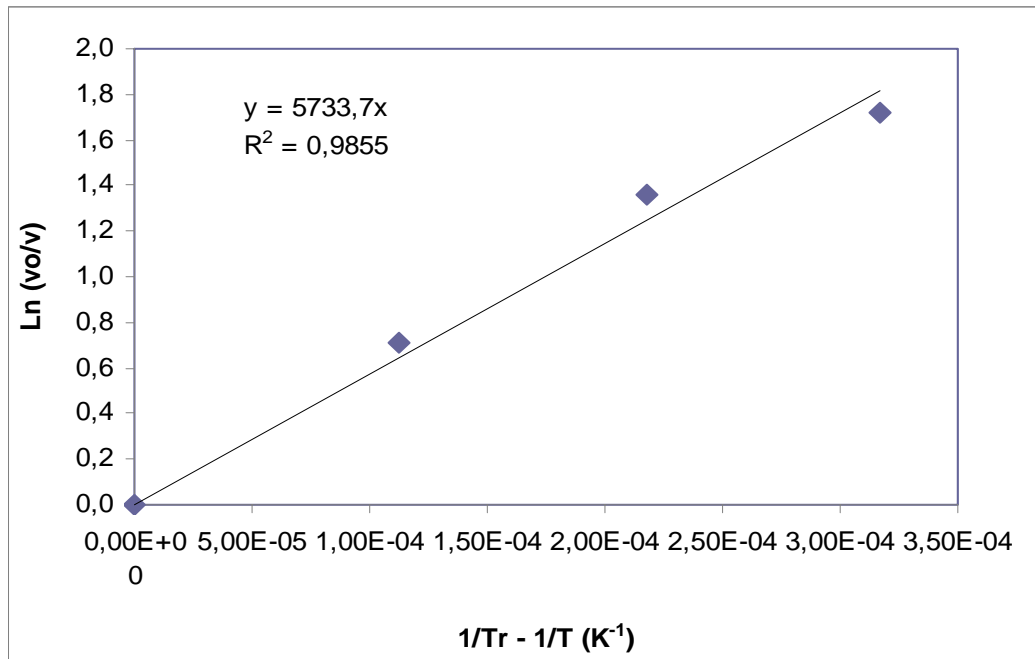


Figura 4.8: Ajuste da equação de Arrhenius linearizada

4.2. Borra de Café

4.2.1. Cinética de Secagem

Nas figuras 4.9 e 4.10 estão apresentados os dados experimentais relativos às perdas de água das borras de café durante a secagem usando uma corrente de ar a 60°C. Os experimentos foram realizados em duplicata.

Pode-se concluir, para as duas borras analisadas, que o equilíbrio foi alcançado após 200 minutos de secagem. Não se observou, a partir desse tempo, uma perda relevante de água nas amostras. O tempo total de secagem foi de 1300 minutos, para garantir o equilíbrio termodinâmico entre as partículas e a corrente de ar aquecida. O teor de água residual, após secagem, foi cerca de 3%.

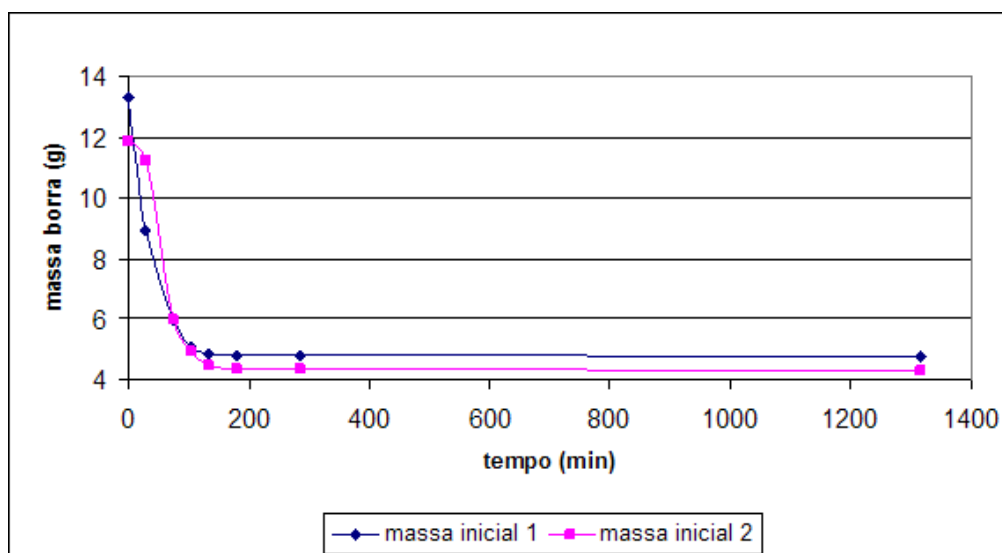


Figura 4.9: Cinética de secagem a 60°C: Borra sem pressão

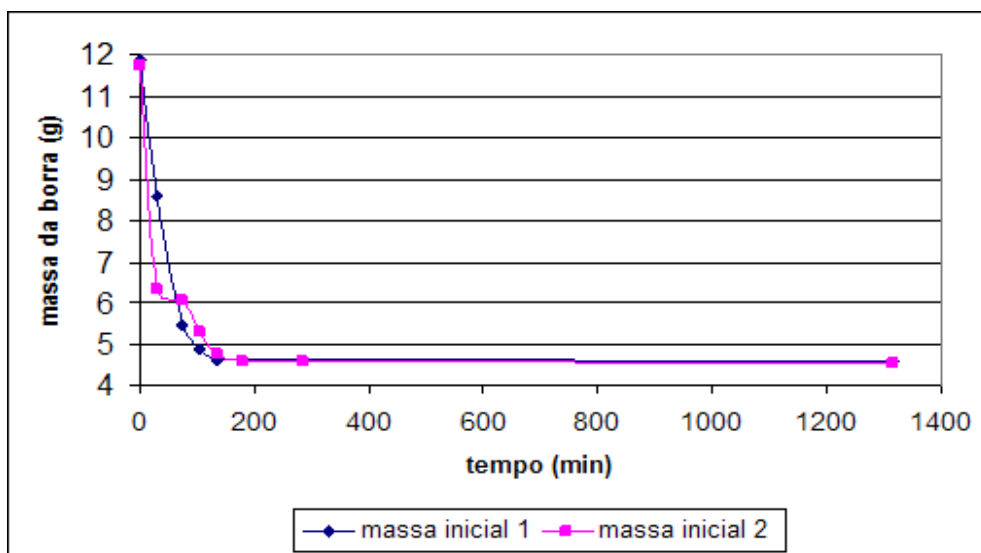


Figura 4.10: Cinética de secagem a 60°C: Borra pressurizada (9 atm)

A tabela 4.7 mostra a porcentagem de água removida das amostras. O valor obtido é típico de borras industriais (60 a 65%) como reportado por LAGO & FREITAS (2007). A remoção da água antes da extração com etanol é fundamental uma vez que a solubilidade dos óleos vegetais reduz muito na presença de água (FRANCO *et al.*, 2007; RITTNER, 1991).

Tabela 4.7: Teor de água nas borras de café

Fração de água na amostra (%)		
	Borra sem pressão	Borra pressurizada
E1	64,20	61,30
E2	63,60	61,30

Tabela 4.8: Solubilidade de óleos vegetais em etanol

Etanol (%)	Solubilidade a 75 °C (%)	Solubilidade a 85 °C (%)
91,5	7	10
94,0	10	16
95,4	15	25
96,0	24	miscível
98,0	miscível	miscível

Fonte: RITTNER, 1991.

4.2.2. Teor de Óleo

Como esperado, a borra de café obtida em máquinas de expresso (9 atm) apresentam menor teor de óleo que a borra obtida em cafeteiras domésticas (sem pressão). O teor de óleo nos café torrados (19,6 a 21,9 g/100g) foi maior que nas borras (13,7 a 16,7 g/100g), indicando que, em ambos os casos, no preparo do café expresso (9 atm) e no café sem pressão, ocorrem perdas de óleo para a fase aquosa. Entretanto, o rendimento de extração do óleo da borra foi mais alto (93 a 96%) que nos grãos torrados (67 a 70%) como pode ser observado na Figura 4.11. Esse resultado comprova que a difusão do óleo da borra é facilitada devido ao rompimento da estrutura celular durante o preparo do café ($T= 90^{\circ}\text{C}$). Além disso, o maior teor de óleo presente nos grãos provoca uma saturação do solvente, limitando o transporte

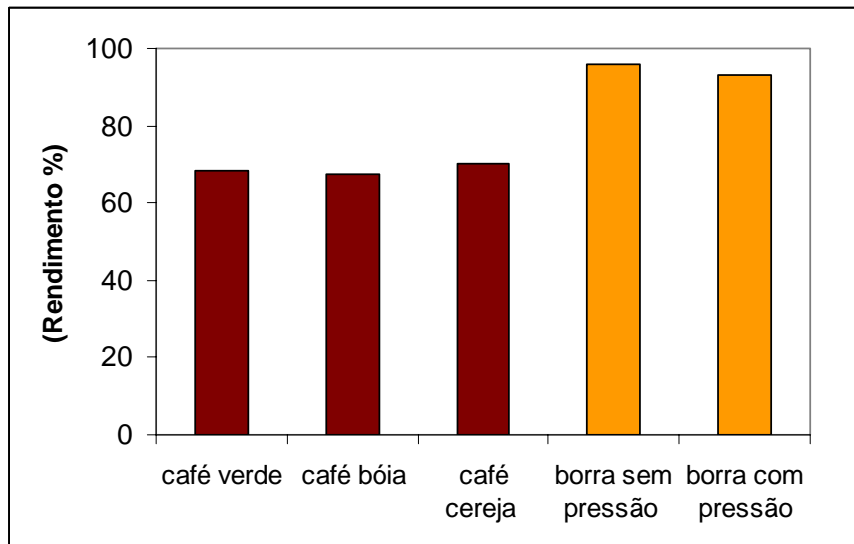


Figura 4.11: Rendimento de extração do óleo de café com etanol

4.2.3. Concentração no Equilíbrio

Nas condições de equilíbrio (tempo considerado infinito), a quantidade de óleo extraída da borra sem pressão foi maior. Isto ocorre devido ao maior teor de óleo presente nesta amostra (figura 4.12).

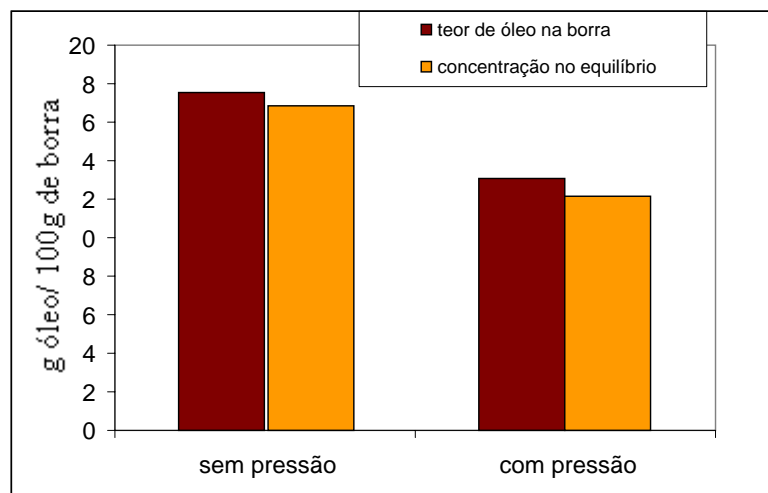


Figura 4.12: teor de óleo na borra e concentração de soluto extraída nas condições de equilíbrio (tempo = 12 horas).

4.2.4. Análise Granulométrica da borra

A análise granulométrica foi conduzida para as duas amostras, pois no processo tradicional de preparo do café expresso o tempo de moagem é menor que para o café usado em cafeteiras domésticas, gerando, conseqüentemente, amostras com granulometrias diferentes. Os gráficos da porcentagem mássica em função do diâmetro médio (calculado pela média aritmética dos orifícios inferior e superior da peneira) estão apresentados na figura 4.13 para a borra obtida sem pressão e na figura 4.14 para a borra pressurizada. As partículas apresentaram mesma faixa de tamanho (0,05 a 1,20 mm).

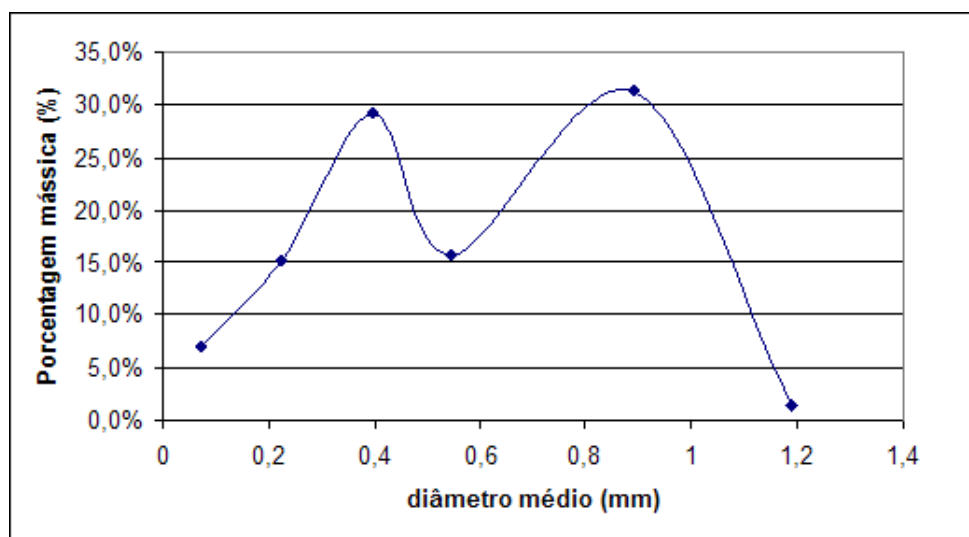


Figura 4.13: Distribuição de tamanhos nas amostras de borra sem pressão.

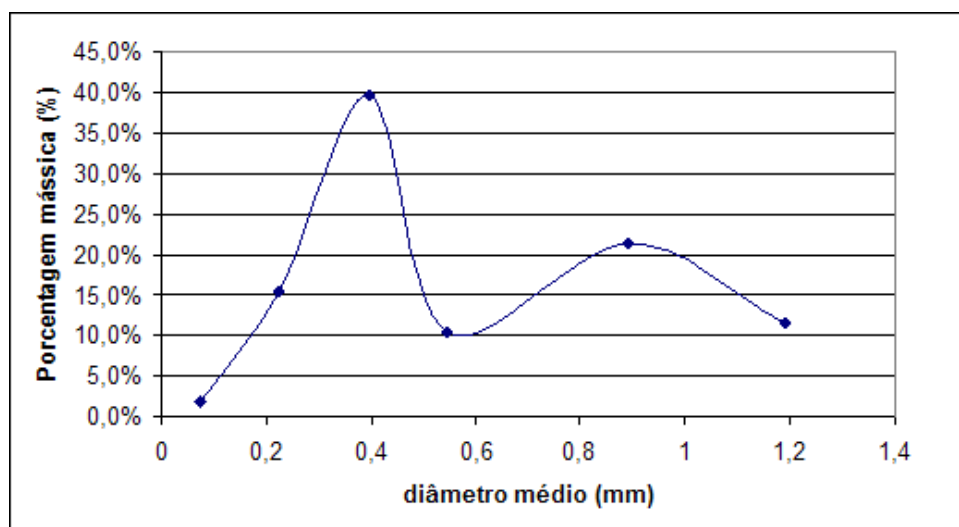


Figura 4.14: Distribuição de tamanhos nas amostra de borra pressurizada (9 atm).

As figuras 4.15 e 4.16 apresentam a distribuição de tamanho acumulada em função do diâmetro médio, para a borra sem pressão e borra pressurizada, respectivamente. Os mesmos modelos usados para o café torrado foram adotados para ajuste dos pontos experimentais.

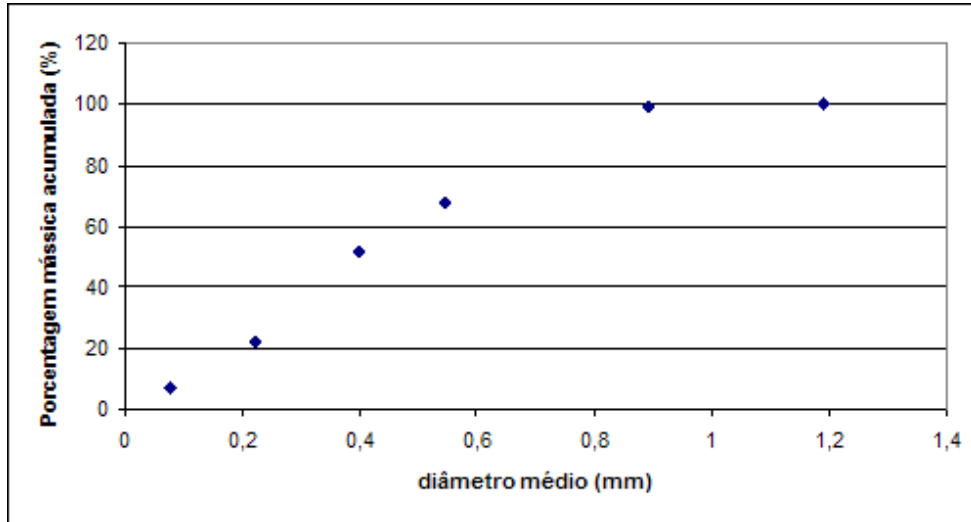


Figura 4.15: Porcentagem mássica acumulada *versus* diâmetro médio (borra sem pressão)

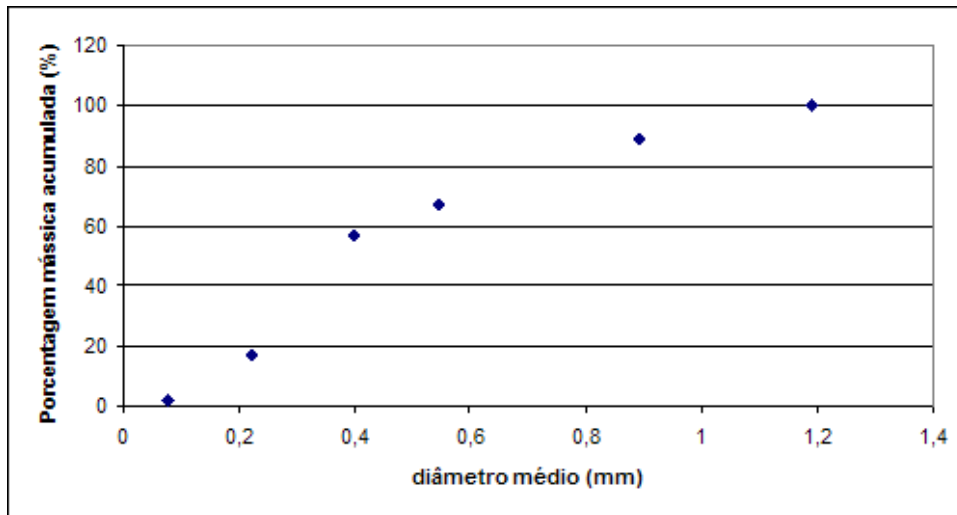


Figura 4.16: Porcentagem mássica acumulada *versus* diâmetro médio (borra pressurizada)

Nas figuras 4.17 e 4.18 estão apresentadas as curvas ajustadas aos pontos experimentais para os modelos GGS e RRB linearizados, respectivamente. Os modelos GGS e RRB apresentaram coeficientes de correlação elevados (0,99 e 0,96). O modelo

selecionado, RRB, teve seus parâmetros k e m estimados e iguais a 0,45 e 1,59, respectivamente.

$$Y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{0,45}\right)^{1,59}\right] \quad [\text{Eq.4.3}]$$

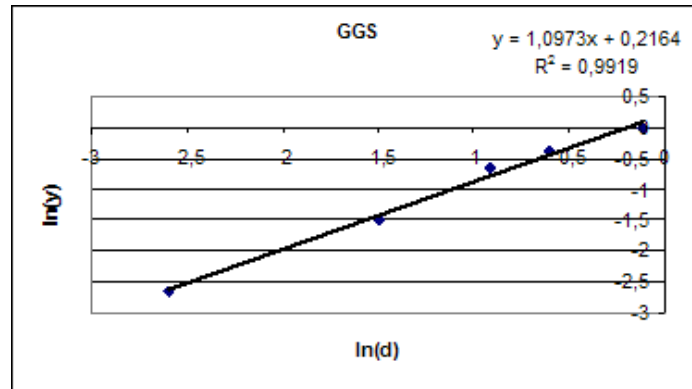


Figura 4.17: Ajuste do Modelo GGS aos pontos experimentais (borra sem pressão)

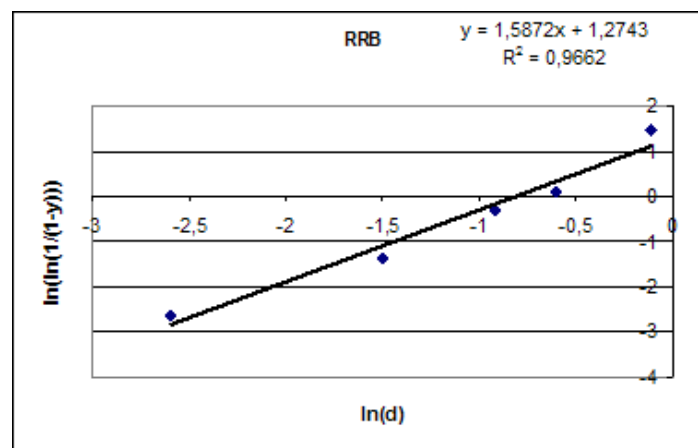


Figura 4.18: Ajuste do Modelo RRB aos pontos experimentais (borra sem pressão)

Nas figuras 4.19 e 4.20 estão apresentadas, para a borra pressurizada, as curvas de ajustes dos pontos experimentais aos modelos GGS, e RRB, respectivamente.

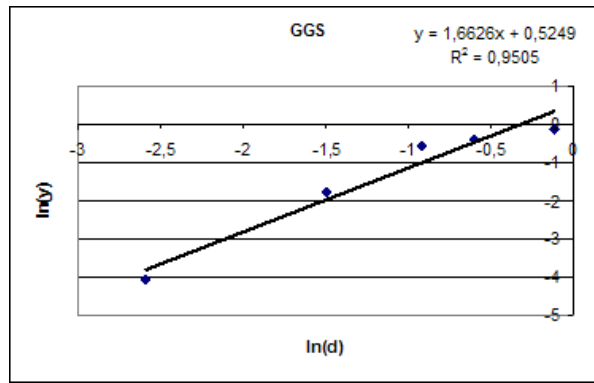


Figura 4.19: Ajuste do Modelo GGS aos pontos experimentais (borra pressurizada)

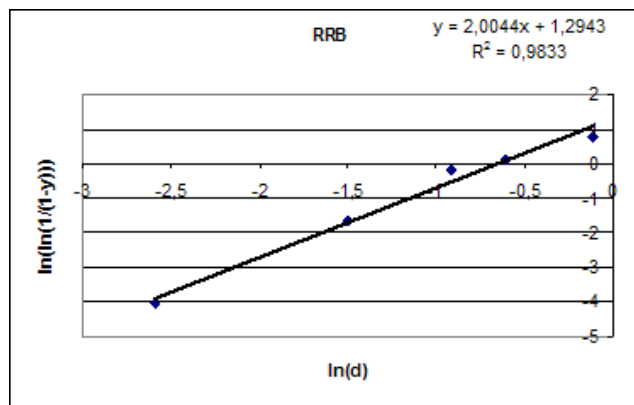


Figura 4.20: Ajuste do Modelo RRB aos pontos experimentais (borra pressurizada)

Usando-se o modelo RRB, calculou-se o diâmetro médio de Sauter para a distribuição de partículas da borra pressurizada e da borra sem pressão. A tabela 4.9 mostra os resultados obtidos para os diâmetros médios de Sauter pelos dois diferentes métodos já apresentados anteriormente (item 3.2.3.1). O modelo RRB apresentou menor diferença entre os d_{Sauter} calculados pelos dois métodos e foi selecionado para representar a distribuição de tamanho acumulada. O diâmetro médio da borra sem pressão é menor (cerca de 35%). Isto se deve ao maior tempo de moagem desta amostra (padrão comercial).

Tabela 4.9: Diâmetro médio de Sauter (mm) calculados para a borra de café

Borra de Café	d_{SAUTER} (Método diferencial)		d_{SAUTER} (Método discreto)
	GGs	RRB	
Borra sem pressão	0,07	0,19	0,33
Borra pressurizada	0,23	0,3	0,41

Os parâmetros m e k foram estimados para o modelo RRB, representado pela equação 4.4.

$$Y = 1 - \exp\left[-\left(\frac{d}{0,52}\right)^{2,01}\right] \quad [\text{Eq.4.4}]$$

4.2.5. Cinética

As curvas cinéticas, obtidas para extração do óleo da borra de café com etanol estão apresentadas na Figura 4.21. As curvas apresentaram comportamento similar aos dos grãos torrados alcançando um valor assintótico após 25 minutos, a partir do qual o rendimento de extração do óleo não sofre uma variação significativa. LAGO & FREITAS (2007) relatam um valor de 50 minutos para atingir o mesmo patamar de extração do óleo de café a partir de borras industriais (obtidas no preparo do café solúvel). Isto indica que a estrutura das partículas é mais preservada no preparo do café solúvel.

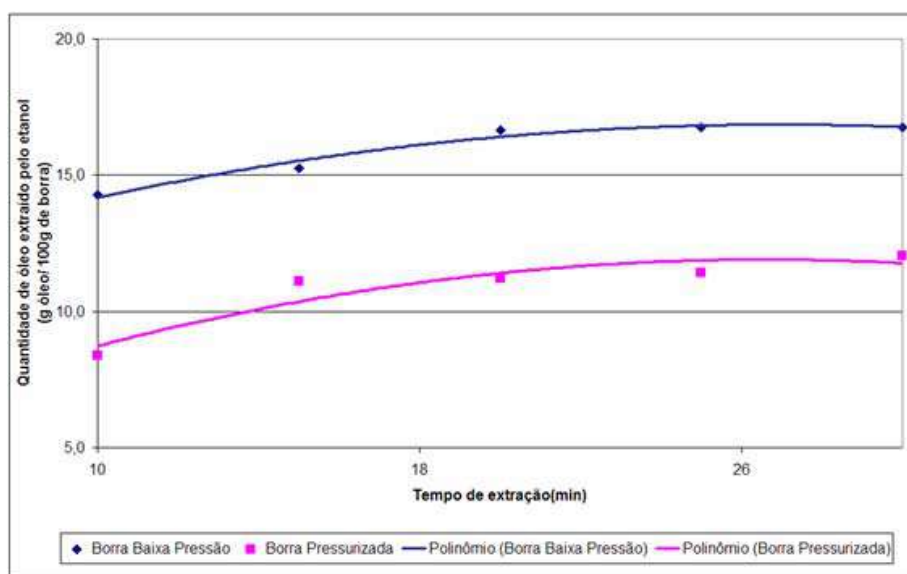


Figura 4.21: Cinética de extração do óleo das borras de café com etanol

4.2.6. Coeficiente de Difusão

O coeficiente de difusão para a borra foi calculado seguindo o mesmo procedimento adotado para os grãos de café. As tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os resultados para as duas amostras.

Tabela 4.10: Dados cinéticos: borra sem pressão

Borra Baixa Pressão				
Tempo (min)	C(t) (g _{óleo} /100g _{de café})	C ₀ (g _{óleo} /100g _{de café})	C _{eq} (g _{óleo} /100g _{de café})	Erro absoluto
10	3,29			
15	2,31			
20	0,90	17,56	0,70	0,36
25	0,80			
30	0,80			

Tabela 4.11: Dados cinéticos: borra pressurizada

Borra Pressurizada				
Tempo (min)	C(t) (g _{óleo} /100g _{de café})	C ₀ (g _{óleo} /100g _{de café})	C _{eq} (g _{óleo} /100g _{de café})	Erro absoluto
10	4,69			
15	1,99			
20	1,88	13,09	0,90	1,36
25	1,68			
30	1,04			

Tabela 4.12: Coeficiente de Difusão para o óleo da borra de café em etanol

Coeficiente de difusão (m ² /s)	
Borra sem pressão	3,06 E-11
Borra pressurizada	2,85 E-11

Os valores obtidos para os coeficientes de difusão do óleo da borra foram de mesma ordem de grandeza (tabela 4.12). Entretanto, os resultados foram maiores (cerca de três vezes) que aqueles obtidos para os grãos de cafés torrados e moídos, indicando uma maior facilidade para extração do óleo da borra. Isto ocorre devido à ruptura da parede celular durante o preparo da bebida ($T = 90^{\circ}\text{C}$). Os resultados são bem menores que aqueles obtidos para extração com hexano (FRANCO *et al.*, 2007).

4.2.7. Viscosidade

Os resultados de viscosidade para o óleo de café extraído da borra a 20°C podem ser visualizados na tabela 4.13:

Tabela 4.13: Resultados do reômetro a 20°C: borra

Taxa de deformação (1/seg)	Tensão de cisalhamento (Dina/cm ²)	Viscosidade (cP)
1,14	2,19	192,11
1,90	2,92	153,68
2,66	3,40	127,82
3,42	3,97	116,08
4,18	4,49	107,42
4,94	4,95	100,20
5,70	5,60	98,25

Diferente dos resultados obtidos com o óleo de café extraído dos grãos, o óleo da borra se comportou como um fluido não newtoniano a 20°C, já que a viscosidade depende da taxa de deformação aplicada. Entretanto, para temperaturas acima de 30°C, o óleo se comportou como fluido newtoniano. Neste caso, foi determinada uma viscosidade média para cada temperatura, como pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 4.14: Viscosidade média para cada temperatura: borra

Temperatura (°C)	Vscosidade (cP)*
30	56.40
37	36.73
50	23.10
60	18.11

* média de cinco determinações

O Modelo ajustado de Bingham (Eq.4.5) indica que, na temperatura de 20°C, o fluido se comporta como um sólido a baixas taxas de deformação ($\tau < 1,46$ dina/cm²) e, após um dado valor, a viscosidade permanece constante e igual a 72,27 cP.

$$\tau = \tau_o + \mu \frac{dv}{dy} \quad [\text{Eq.4.5}]$$

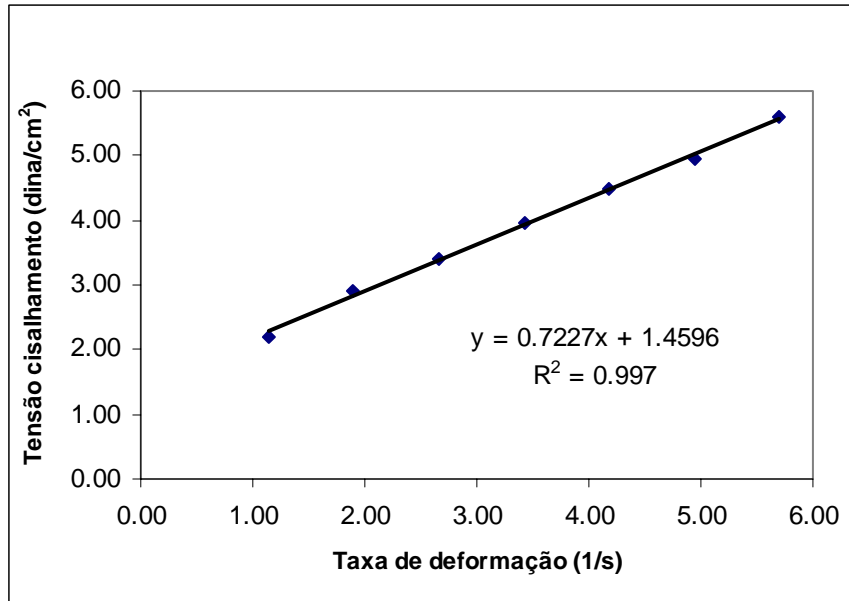


Figura 4.22: Ajuste do modelo de Bingham

Com os dados da tabela 4.14 obteve-se a energia de ativação ajustando-se a equação de Arrhenius linearizada (Eq.4.2), aos pontos experimentais pelo método dos mínimos quadrados. A Energia de ativação do óleo da borra foi menor que do óleo extraído dos grãos. Isto ocorreu devido, provavelmente, a remoção prévia das ceras presentes no óleo da borra.

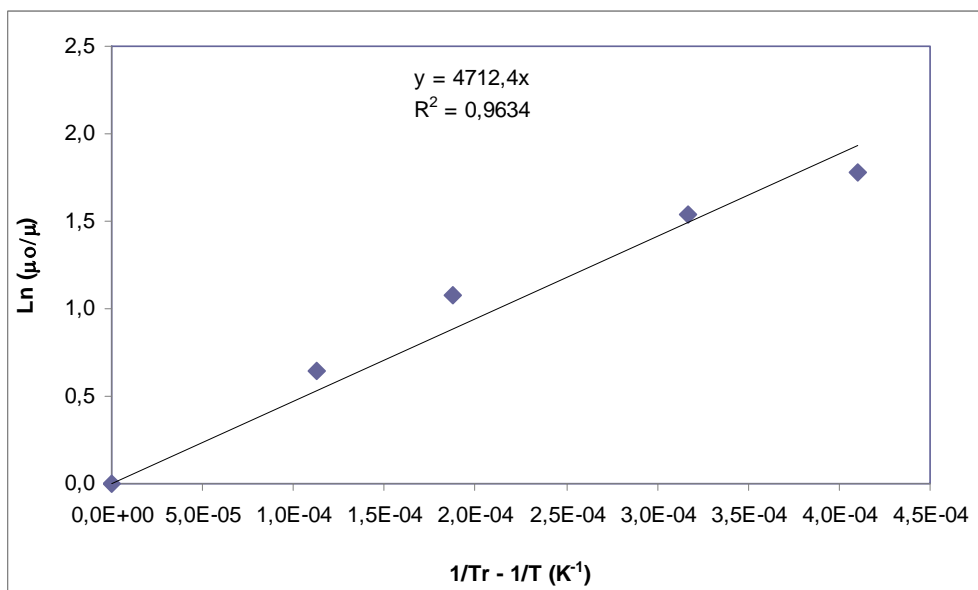


Figura 4.23: Ajuste da equação de Arrhenius linearizada (borra de café)

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O café torrado a partir dos grãos Verdes é mais rico em lipídeos que os grãos Cereja e Bóia indicando que o tecido vegetal dos grãos Verdes reduz a perda de óleo no momento da torra. O teor de óleo nas duas borras foi menor que nos grãos de café torrado, indicando a transferência parcial do óleo para a fase aquosa, tanto no preparo do café expresso quanto do café sem pressão. A borra pressurizada contém um menor teor de óleo, indicando uma maior perda de óleo no preparo de café expresso (9 atm).

A distribuição de tamanhos dos grãos de café moído e das borras apresentou a mesma faixa de tamanho, entre 0,05 e 1,2mm, com 99% das partículas com diâmetro inferior a 1mm, dentro da faixa usada para a extração comercial de óleos vegetais com hexano. O modelo RRB foi o que mais se adequou à distribuição de tamanhos dos grãos de café e da borra.

Os óleos dos grãos torrados e da borra se comportam como fluido newtoniano para temperaturas acima de 20°C com viscosidade fortemente dependente da temperatura.

As curvas cinéticas obtidas pela extração do óleo dos grãos de café e das borras apresentaram crescimento exponencial com valor assintótico a partir de 25 minutos. Os coeficientes de difusão do óleo de café em etanol para os grãos de café e para as borras foram da ordem de 10^{-11} m²/s, cerca de 10^{-2} vezes menor que os valores obtidos para a difusividade de óleos vegetais em solventes tradicionais como o hexano. Os coeficientes de difusão do óleo de café proveniente das borras foi cerca de três vezes maior que o do óleo proveniente dos grãos de café torrados, indicando maior facilidade de extração do óleo da borra.

No caso da borra a baixa solubilidade do óleo em etanol não limitou o processo de difusão (rendimento de extração no equilíbrio entre 93 e 96 %) de forma tão acentuada quanto nos casos dos grãos torrados (rendimento de extração no equilíbrio entre 67 e 70%).

O rendimento de extração do óleo de café a partir dos grãos torrados pode ser melhorado aumentando-se da razão solvente/carga ou elevando-se a temperatura de extração.

Pela grande oferta de borra resultante do processamento de café solúvel, sugere-se o estudo da viabilidade técnica de obtenção de biodiesel a partir de óleo de café extraído da borra por diferentes rotas tecnológicas variando-se o catalisador (básico ou ácido) e/ou o álcool (etanol ou metanol).

Experimentos preliminares, realizados neste estudo, indicaram a necessidade de eliminação da fração insaponificável e dos pigmentos, transferidos da borra para o óleo, que prejudicam a reação e qualidade do combustível. A remoção destes compostos pode ser realizada com terra branqueadora, por filtração do óleo aquecido, ou por fracionamento em etanol com separação da gordura usando centrífugas com sistema de resfriamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, N. C.; LOPES, R. L. T. *Sistema Brasileiro de Respostas Técnicas – Ministério da Ciência e Tecnologia*. CETEC – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, 2005.
- BAILEY, A. E. *Edible Oil & Fat Products: Oils and Oil Seeds*. 5^a. ed. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1996. 708 p., v.2.
- BARRETO, A.G.; SILVA, S.M.C. da; PEREIRA, J.O. Comportamento reológico de óleos vegetais não refinados. In: *Anais do Simpósio Latino Americano de Ciência de Alimentos*, Campinas, set, 2007.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Fenômenos de Transporte*, Editorial Reverté S.A., 1980.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p.
- CAMARGOS, R. R. S. *Avaliação da Viabilidade de Se Produzir Biodiesel Através da Transesterificação de Óleo de Grãos de Café Defeituosos*. 2005. 105. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UFMG, Belo Horizonte.
- CARVALHO, G. *Perspectivas para o mercado de café*. Campinas, Embrapa, [2005], 54 slides, color.
- CARRÍN, M. E.; CRAPISTE, G. H. *Mathematical Modeling of Vegetable Oil-Solvent Extraction in a Multistage Horizontal Extractor*. *Journal of Food Engineering*. Bahia Blanca, v 85, p. 418-425, 2008.
- COSTA, B. J.; OLIVEIRA, S. M. M. *Produção de Biodiesel – Dossiê Técnico*. Instituto de Tecnologia do Paraná – TECPAR, 2006.
- FAZENDA DA ONÇA. Disponível em: http://www.fazendaonca.com.br/semem_xic.asp. Acesso em: 09 de janeiro de 2008.
- FRANCO, D.; SINEIRO, J.; PINELO, M.; NÚÑEZ, M.J. *Ethanol extraction of Rosa rubiginosa soluble substances: Oil solubility equilibria and kinetic studies*. *Journal of Food Engineering*, San Tiago de Compostela, v. 79, p. 150–157, 2007.
- FREITAS, S.P. FREITAS-SILVA, O; MIRANDA, I.C.; COELHO, M.A.Z. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 27(suplemento especial): v. 14-17, 2007.

- FREITAS, S.P.; SILVA-FREITAS, O.; RODRIGUES, V.S.; TASSINARI, P. *Extração de óleo de café com etanol comercial: Avaliação da composição em ácidos graxos*. In: XIII Seminário Latino Americano Y Del Caribe, Montevideu, 2004.
- FREITAS, S. P.; MONTEIRO, P. L.; LAGO, R. C. A. *Extração Do Óleo Da Borra De Café Solúvel Com Etanol Comercial*. Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/ppt-download/extração-do-óleo-da-borra-de-café-solvel-com-etanol-comercial3452.pdf>. Acesso em: 11 de janeiro de 2008.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 5ª ed. Rio de Janeiro, Ed LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2001. 504 p.
- LAGO, R.C.A. *Lipídios em Grãos de Café*. B.CEPPA, Curitiba, v. 19, n. 2, p. 319-340, 2001.
- LAGO, R.C.A.; FREITAS, S.P. *Extração dos Óleos de Café Verde e da Borra de Café com Etanol Comercial*. Comunicado Técnico no. 92, Embrapa, 2006.
- MARQUES, I. P.; FERNANDES, L. A. P. Jr.; ROMEIRO, G. A.; SALGADO, E. C.; COELHO, A. C.; PINTO, M. F. *Conversão à Baixa Temperatura e Extração da Borra de Café Solúvel*. Disponível em: <https://sec.sbq.org.br/cd29ra/resumos/T0374-1.pdf>. Acesso em: 10 de janeiro de 2008.
- MASSARANI, G. 1997. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ. E-papers 2ª edição, 2002.
- MEJLBRO, L., *The Complete Solution of Fick's Second Law of Diffusion with Time-Dependent Diffusion Coefficient and Surface Concentration*. In: Durability of Concrete in Saline Environment. *Proceedings*. P. Sandberg (Ed.) Lund, Maio 1996. p. 127-158
- NETO, C. P.; FERREIRA, M. C. *Secagem De Borra De Café Em Leito De Jorro*. Disponível em: http://www.propg.ufscar.br/publica/vicic/C_TECNOLOGIA/TE032.html. Acesso em: 11 de janeiro de 2008.
- NUNES, A. M. L.; SOUZA, F. F.; COSTA, J. N. M.; SANTOS, J. C. F.; PEQUENO, P. L. L.; DA COSTA, R. S. C.; VENEZIANO, W. *Cultivo do Café Robusta em Rondônia*. Sistema de Produção 5. Embrapa, dez. 2005.

- RICCI, M. S. F.; NEVES, M. C. P., NANNETTI, A. N.; MOREIRA, C. F.; AGUIAR-MENEZES, E. L.; SILVA, E.; *et al.* *Cultivo de Café Orgânico*. Sistema de Produção 2 – 2ª Edição. Embrapa, dez. 2006.
- RITTNER, H. *Extraction of Vegetable Oils With Ethyl Alcohol*. International Meeting on Fats and Oils, Campinas, [1991]. p. 17-30.
- SANTOS, J. C. O.; SANTOS, I. M. G.; SOUZA, A. G. Effect of heating and cooling on rheological parameters of edible vegetable oils. *Journal of food engineering*, v. 6, p. 401- 405, 2005.
- SILVA, F. M.; SALVADOR N.; PÁDUA, T. S. I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2002, Poços de Caldas, Embrapa Café, p. 281-329.
- SILVA, I.C.C. da; OLIVEIRA, A.; CABRAL, L.M.C.; FREITAS, S.P. *Estudo da Viabilidade Econômica da Introdução do Processo de Pervaporação em uma Indústria de Café Solúvel*. In. Anais do CONGRESSO IBERO-AMERICANO EM CIENCIAS E TECNOLOGIA DE MEMBRANA, Fortaleza, 2007.
- SOCCOL, C. R. I Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2002, Poços de Caldas, Embrapa Café, p. 83-98.
- TURATTI, J. M. *Extração e Caracterização de Óleo de Café*. O Cafezal, Disponível em: <http://www.coffeebreak.com.br/ocafezal.asp?SE=8&ID=402>. Acesso em: 10 de janeiro de 2008.
- UFMG. *Café é Matéria-Prima para Obtenção do Biodiesel*. Disponível em: <http://www.ufmg.br/online/arquivos/001287.shtml>. Acesso em: 14 de janeiro de 2008.