

**SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM
SECADOR CICLÔNICO**

JOHNSON CLAY PEREIRA SANTOS

2009

JOHNSON CLAY PEREIRA SANTOS

SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM SECADOR CICLÔNICO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Alimentos, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador
Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

LAVRAS
MINAS GERAIS- BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Santos, Johnson Clay Pereira.

Secagem da borra de café em secador ciclônico / Johnson Clay
Pereira Santos. – Lavras : UFLA, 2009.
60 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.
Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.
Bibliografia.

1. Ciclone. 2. Tempo de residência. 3. Resíduo agroindustrial. I.
Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 664.02842

JOHNSON CLAY PEREIRA SANTOS

SECAGEM DA BORRA DE CAFÉ EM SECADOR CICLÔNICO

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência de Alimentos, para a obtenção do título de “Mestre”.

Profa. Dra. Rosemary Gualberto F. A. Pereira	UFLA
Profa. Dra. Mônica Elisabeth Torres Prado	UFLA
Prof. Dr. Alexandre de Paula Peres	UFLA

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL

Ao meu grande amigo vovô (*in memoriam*),
pelo incentivo.

OFEREÇO

A minha especial família, Juarez, Dinalva, Jeane, Joelma, Jean e Johnny,
pelo amor incondicional e incentivo.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, em especial. Sinto sua presença nos melhores e nos piores momentos da minha vida, sempre me dando força para continuar.

Ao meu orientador, Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, pelo acompanhamento do meu crescimento profissional e pessoal, me mostrando uma visão científica de forma clara e objetiva, sem falar da sua grande paciência comigo em sua orientação.

A minha especial mãe, mulher que vejo como exemplo. Tudo que faço é sempre pensando em agradá-la. Ao meu pai, Juarez, pelo amor e total dedicação, pela ótima educação e ensinamentos concedidos até aqui e pelo apoio e incentivo em todas minhas escolhas. Obrigado por serem minha alegria em todos os momentos e por sempre estarem presentes, mesmo quando distantes fisicamente.

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Ciência dos Alimentos, pela oportunidade.

À Indústria Café Solúvel Brasília, pelo fornecimento da borra de café para as análises da dissertação, nas pessoas do engenheiro Donizete e engenheira Amanda, que sempre me atenderam com muita atenção e simpatia. Obrigado, de coração.

Às professoras Soraia Vilela Borges e Rosemary Gualberto F. A. Pereira, pela coorientação dada para a melhoria e qualidade deste trabalho.

Ao professor Dr. José Guilherme, que tanto contribuiu com seu apoio e ajuda na estatística.

À grande amiga Joyce, pela ajuda constante, apoio, amizade, carona etc., ou seja, ajudou pra caramba.

Aos amigos Felipe, Vanderley, Cleuber e André, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos que mais precisei, valiosos amigos!

A Márcia e Glêndara, que vieram comigo do Tocantins para essa caminhada, duas pessoas a quem não tenho como agradecer pelo incentivo, amizade, companheirismo... sem contar as dicas de ministração de aula que tive com a Glêndara e a ajuda na estatística, com a Márcia.

Aos meus estagiários de iniciação científica, Ana Gabriela, Bruno, Viviane e Bentinho, pela amizade, apoio e ajuda. Às funcionária dos laboratórios, Tina e Creuza, pelo auxílio nas análises e dicas muito importantes. Obrigado mesmo, sem a ajuda dessas pessoas dificilmente realizaria esse trabalho.

Aos colegas de república, Bruno, Renato, Gerson e Rodrigo, pela amizade e apoio.

Ao grande amigo Rafael, que sempre esteve presente e *on line* me ajudando, dando força pra continuar, o meu obrigaduuuuu.

A Brenda, pelo exemplo de vida e alegria.

A Jaqueline, pela força de vontade e exemplo.

Á Luana, pessoa especial que sei que vai ficar sempre na minha vida me auxiliando de todas as formas. Amiga que veio desde o Maranhão, consolidando nossa amizade no Tocantins e nessa fase tão difícil foi presente.

Aqui deixo também o meu grande agradecimento a todas as amizades constituídas durante minha caminhada, no Maranhão, em Tocantins e em Minas.

A minha especial família, que contribuiu para o desenvolvimento deste trabalho, para a minha formação pessoal e profissional, meus sinceros agradecimentos.

Ao DCA e, em especial, à Dra. Mônica pelas sugestões e correções.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de mestrado e à FAPEMIG (PROC. CAG APQ-3415-3.12/07) relativo ao projeto em que este trabalho está inserido. Obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 Café.....	4
2.2 Café solúvel	5
2.2.1 Características gerais	6
2.2.2 Processamento do café solúvel	7
2.2.2.1 Tipos de processamento de café solúvel.....	9
2.3 Resíduos de produtos agrícolas.....	9
2.4 Borra de café.....	11
2.4.1 Potencial Energético	12
2.4.2 Secagem prévia	13
2.5 Secagem.....	14
2.6 Classificação de secadores.....	16
2.7 Ciclone.....	17
2.7.1 Tempo de residência.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Material.....	23
3.2 Caracterização da borra de café	23
3.2.1 Análise granulométrica	23
3.2.2 Densidade aparente	24

3.2.3 Teor de umidade	25
3.2.4 Determinação da composição centesimal	25
3.3 Delineamento experimental	26
3.4 Montagem experimental	27
3.4.1 Ventilador	29
3.4.2 Tubulação	29
3.4.3 Esteira de alimentação	29
3.4.4 Alimentador Venturi	30
3.4.5 Aquecedor e isolamento	32
3.4.6 Ciclone	32
3.4.7 Instrumentação	36
3.4.8 Tempo de residência	37
3.4.9 Vazão de sólidos	37
3.4.10 Massa de sólidos remanescentes	38
3.4.11 Cálculo da vazão de ar no ciclone	38
3.4.12 Secagem em equipamento ciclônico	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Caracterização da borra de café	41
4.1.1 Análise granulométrica	41
4.1.2 Densidade aparente	44
4.1.3 Análise centesimal	45
4.2 Resultados dos experimentos de secagem no ciclone	46
4.2.1 Teor de umidade da borra de café	46
4.2.2 Tempo de residência	49
5 CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas		Dimensão
a	altura do duto de entrada do ciclone	[m]
A	área	[m ²]
b	largura do duto de entrada do ciclone	[m]
b.s.	base seca	-
b.u.	base úmida	-
B	diâmetro do tubo de saída inferior do ciclone	[m]
Cs	relação entre vazão de sólidos e vazão de ar	-
d	diâmetro de uma partícula esférica	[m]
d _p	diâmetro da partícula	[m]
D	diâmetro da coluna cilíndrica do ciclone	[m]
De	diâmetro do tubo de saída do gás	[m]
e	abertura de peneira	[m]
h	altura da seção cilíndrica do ciclone	[m]
hc	altura da seção cônica do ciclone	[m]
H	altura total do ciclone	[m]

Li	distância vertical do topo do ciclone ao duto de entrada	[m]
m	massa	[kg]
S	altura do tubo de saída do gás	[m]
t	tempo	[s]
t_{res}	tempo de residência das partículas	[s]
T	temperatura	[K]
v	volume	[m ³]
W	vazão mássica	[kgs ⁻¹]
x	fração mássica	-
X	teor de umidade do sólido (b.s)	-
X'	teor de umidade do sólido (b.u)	-
Y	umidade absoluta do gás	[kg água/ kg ar seco]
ρ	densidade	[kg m ⁻³]

Subscritos

i	entrada
f	final
p	partícula
pe	peneira
rem	partícula remanescente

Números Adimensionais

Re	número de Reynolds
----	--------------------

LISTA DE TABELAS

		Página
TABELA 1	Características físicas e químicas	6
TABELA 2	Características microbiológicas	7
TABELA 3	Composição química da borra de café (base seca)	12
TABELA 4	Poder calorífico de resíduo celulósico secos	13
TABELA 5	Tempo de residência	22
TABELA 6	Valores utilizados para análise de efeito	26
TABELA 7	Dimensões do ciclone	34
TABELA 8	Análise granulométrica do café	43
TABELA 9	Composição centesimal da borra de café	46
TABELA 10	Resultados experimentais de secagem de borra de café em relação à umidade final.	47
TABELA 11	Resumo da análise de efeito da temperatura do ar e da relação entre as vazões de sólido e do ar no teor de umidade da borra de café após a secagem no ciclone	48
TABELA 12	Resultados de secagem de borra de café em diferentes tipos de secadores	49
TABELA 13	Resultados experimentais de secagem de borra de café em relação ao tempo de residência	50
TABELA 14	Resumo da análise de efeito do tempo de residência da borra de café.	52

LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1	Fluxograma do processamento do café solúvel	8
FIGURA 2	Ciclones	17
FIGURA 3	Esquema do escoamento em um ciclone	20
FIGURA 4	Esquema da montagem experimental	28
FIGURA 5	Vista do ventilador na parte externa da planta experimental	29
FIGURA 6	Detalhe da esteira	30
FIGURA 7	Alimentador venturi com dimensões em milímetros	31
FIGURA 8	Alimentador venturi.	31
FIGURA 9	Detalhe do aquecedor de ar com conjunto de resistências	32
FIGURA 10	Geometria do ciclone	33
FIGURA 11	Ciclone	34
FIGURA 12	Detalhe da parte superior do ciclone	35

FIGURA 13	Vista superior do sistema experimental	35
FIGURA 14	Distribuição granulométrica da borra de café com teor de umidade de 50% (b.u).	42
FIGURA 15	Distribuição granulométrica da borra de café com teor de umidade de 60% (b.u).	42
FIGURA 16	Distribuição granulométrica da borra de café com teor de umidade de 65% (b.u).	43
FIGURA 17	Análise granulométrica da borra de café	44
FIGURA 18	Densidade aparente da borra de café	45

RESUMO

SANTOS, Johnson Clay Pereira. **Secagem da borra de café em secador ciclônico**. 2009. 60 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos Alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Devido à abertura comercial, criou-se um cenário competitivo de exigências com a preservação do meio ambiente. As empresas passaram a se preocupar com o aproveitamento de resíduos e subprodutos gerados pela própria atividade. A borra de café, subproduto da indústria do café solúvel, anteriormente descartada e sem valor comercial, é atualmente vista como combustível sólido, fonte de óleo essencial e insumo para alimentação animal. Para que se obtenha maior eficiência no uso deste resíduo como combustível para queima em caldeiras, é necessário que a borra tenha seu teor de umidade reduzido, em operação de secagem. O ciclone, tradicionalmente utilizado para limpeza de gases, foi aqui utilizado como secador. Este trabalho teve como objetivo o estudo do processo de secagem e do tempo de residência médio das partículas de borra de café em um ciclone com geometria voltada à secagem. As partículas de borra de café secas no ciclone eram introduzidas no sistema por um alimentador Venturi. Uma esteira elétrica foi utilizada, no intuito de controlar a vazão mássica de sólidos. O agente de secagem utilizado foi ar, admitido com auxílio de um soprador e aquecido por um conjunto de resistências. As variáveis independentes utilizadas foram a temperatura e a relação entre as vazões de borra de café e do ar. Obtiveram-se relações inversamente proporcionais entre a temperatura e o teor de umidade final da borra de café e entre a relação entre as vazões de borra de café e do ar e o teor de água final da borra. Para o tempo de residência, não foi observada uma tendência clara entre a relação entre as vazões de borra de café e de ar e o tempo de residência.

Comitê Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa – UFLA (Orientador),
Soraia Vilela Borges –UFLA, Rosemary Gualberto F. A. Pereira -UFLA

ABSTRACT

SANTOS, Johnson Clay Pereira Santos. **Drying Coffee Spent Ground in Cyclonic Dryer**. 2009. 60 p. Dissertation (Master Program in Food Science) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

Due to trade liberalization, competitive scenery was created in relation to the exigencies with the environment preservation. Industries began to worry about the waste treatment and by-products generated by the in activity. The coffee spent ground, by-product of the coffee industry, previously discarded without commercial value, is now seen as solid fuel, a source of essential oil and food stocks for animals. In order to improve boiler efficiency in the use of coffee spent ground as fuel it is necessary that this product presents low moisture content, obtained in a drying operation. The cyclone, traditionally used for gas cleaning, was used as a dryer. This work aimed to study the process of drying and the average residence time of coffee spent ground particles in a cyclone with geometry focused on drying. The particles dried in cyclone, were admitted in the experimental system by a Venturi feeder. An electric conveyor belt was used in order to control solids mass flow. The drying agent was air, admitted by a blower and heated by a set of resistances. The studied variables were temperature and the relationship between the flow of coffee spent ground and of air. An inversely proportional relationship between temperature and final moisture content of the coffee spent ground was observed. The relationship between the flow of coffee spent ground and air content was inversely proportional to final moisture. For the average residence time of coffee, there was no clear trend between the relationship between the flow of coffee spent ground and air and residence time.

Guidance Committee: Jefferson Luiz Gomes Corrêa – UFLA (Orientador),
Soraia Vilela Borges –UFLA, Rosemary Gualberto F. A. Pereira -UFLA

1 INTRODUÇÃO

As primeiras tentativas de se obter um extrato seco de café solúvel foram feitas no século XIX, nos Estados Unidos. O produto era caro, de baixa qualidade e altamente higroscópico. Em 1930, o governo brasileiro incentivou a produção de café solúvel para absorver o excesso de café na safra. O processo foi desenvolvido pela Nestlé que, em 1938, obteve um produto de sabor mais agradável, cor clara, composto de 50% de sólidos solúveis de café e 50% de maltodextrina. Em 1950, a General Foods aperfeiçoou o processo tecnológico e obteve um produto com 100% de sólidos solúveis de café (Adans & Dougan, 1985).

O mercado de café solúvel no Brasil tem se desenvolvido muito nos últimos anos. Em 2002, foram produzidas no país cerca de 70 mil toneladas desse produto, das quais 86% foram destinadas ao mercado externo. É o maior exportador mundial de café solúvel, respondendo por 48% no mercado internacional, seguido pela Colômbia (11%); Equador (8%) e Malásia (7,5%). O Brasil é também o segundo maior produtor mundial de café solúvel, responsável por 20% da produção total, precedido pelos Estados Unidos, com 30% (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social-BNDES, 2008). Portanto, também de resíduos provenientes da agroindústria de café. A borra de café é um subproduto da indústria do café solúvel, que antigamente 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 deste resíduo é importante no sentido de minimizar os custos (utilizando esses subprodutos em outras etapas do processo) e reduzir os problemas ligados a poluição ambiental.

Devido à abertura comercial, criou-se um ambiente competitivo de exigências com a preservação do meio ambiente, passando as empresas a se preocupar com o aproveitamento de resíduos e subprodutos gerados pela própria atividade. Com o aumento do consumo de café, o destino da borra de café solúvel tornou-se uma preocupação mundial (Lago & Antoniassi, 2001).

O processo de preparação do café solúvel gera uma quantidade substancial de resíduos (borra). 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 feita em 1977 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 (Adans & Dougan, 1985).

Dessa forma, o aproveitamento de resíduos agroindustrial, com redução dos danos ao meio ambiente, pode ocorrer de várias formas: combustível, extração de óleo essencial, podendo esse óleo servir como recheio de balas, em licores e como realçadores do sabor do café solúvel (Turatti, 2001).

Entretanto, para que se obtenha maior eficiência no processo de aproveitamento de resíduo, é necessário que a borra de café tenha teor de água reduzido, requerendo a operação unitária secagem.

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de energia e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção do excesso de água contida no material por meio de evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido (Brooker et al., 1974; Mujumdar, 2006).

Ciclones são equipamentos simples e baratos, que conseguem facilmente remover partículas de dimensões superiores a 5 μm de uma fase gasosa (Boysan et al., 1982; Dirgo & Leith, 1986; Fraser et al., 1997). Tradicionalmente, o

ciclone tem sido utilizado para limpeza de gases. Com esta função, este equipamento é confeccionado em geometrias consagradas para obtenção de alta eficiência de coleta de sólidos ou pequena queda de pressão. Porém, nas últimas décadas, este equipamento vem sendo utilizado como reator químico, trocador de calor ou secador, e vem-se estudando a geometria deste equipamento para estes fins (Corrêa et al., 2004).

Este trabalho teve como objetivo o estudo de secagem e do tempo de residência de partículas de borra de café em um ciclone com geometria voltada para a secagem.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Café

O café, um dos principais produtos agrícolas e segundo gerador de riquezas do planeta, perdendo para apenas para o petróleo. É produzido em mais de 50 países, sendo Brasil, Colômbia, Indonésia, México e Vietnã, responsáveis por cerca de 56% da produção mundial (Moreira et al., 2001; Borrelli et al., 2002). A cafeicultura brasileira vem contribuindo para o desenvolvimento e industrialização do país, principalmente na região sudeste, destacando atualmente o Estado de Minas Gerais, responsável por mais de 50% da produção nacional de café arábica e Espírito Santo com café da espécie robusta da variedade conilon (Nacif, 2003).

O café arábica é mais fino, resultando em uma bebida de qualidade superior, com mais aroma e sabor. Já o robusta é indicado para a produção de café solúvel por apresentar maior teor de sólidos, podendo também ser utilizado na formação de blends com o café arábica, com a finalidade de conferir mais corpo à bebida e diminuir a acidez da mistura (NACIF, 2003).

O café cru após ser submetido ao processo de torração e moagem é matéria-prima para o preparo de uma das bebidas mais apreciadas no mundo. De acordo com a pesquisa “Tendência do Consumo de Café no Brasil em 2004”, realizada pelo Grupo Gestor de Marketing do Ministério da Agricultura – GGM, apresentada pela ABIC, o café ocupa o segundo lugar entre as bebidas mais consumidas pelos entrevistados, sendo apenas superado pela água mineral. Entre as razões para o consumo do café encontra-se o hábito, a tradição da família, a influência de outras pessoas, o sabor, por ser estimulante e apresentar odor e sabor agradáveis.

Verifica-se, entretanto, uma mudança comportamental do consumidor, que vem substituindo o hábito e a tradição pela satisfação de tomar café, devido

à melhoria de suas características de sabor e aroma. Os consumidores também estão atentos ao prazo de validade e ao selo de pureza, bem como aos lançamentos de novos produtos de café no mercado. Dados de pesquisa comprovam o aumento no consumo de produtos derivados de café mais fáceis de preparar e consumir, tais como café solúvel, capuccino, misturas prontas e café espresso (Associação Brasileira da Indústria de Café-ABICS, 2008).

2.2 Café solúvel

No século XX foram desenvolvidas novas técnicas de extração de café, como o solúvel, o descafeinado e o liofilizado. O café solúvel foi inventado por um químico japonês/americano com o nome de Satori Kato, de Chicago. Entretanto, a primeira quantidade produzida de café instantâneo foi atribuída a um químico inglês, George Constant Washington, que morava na Guatemala (Javacafé, 2008).

O café solúvel pode ser definido como o produto pronto para o consumo, bastando, para isso, dissolvê-lo em água ou leite quente. Conforme a Resolução 12/78, do Ministério da Saúde, café solúvel, ou extrato de café desidratado, é o produto resultante da desidratação do extrato aquoso de café (*Coffea arabica* e outras espécies do gênero *Coffea*) torrado e moído (Associação Brasileira das Indústrias da Alimentação-ABIA, 1998).

O produto é designado extrato de café desidratado ou café solúvel, sendo classificado:

I - de acordo com o tipo de bebida predominante, resultante da mistura de cafés verdes que lhes deram origem:

II - quanto à forma de apresentação: café solúvel em pó e café solúvel granulado.

2.2.1 Características gerais

O café solúvel deve ser produzido com café recentemente torrado e moído e água potável. Os grãos de café devem se apresentar limpos e isentos de matéria terrosa, parasitos, detritos vegetais e animais e em perfeito estado de conservação. O café solúvel resultante deve apresentar composição tal que o extrato reconstituído, segundo as indicações contidas no rótulo, reproduza o café de bebida comum, como mostrado na Tabela 1. Não são toleradas quaisquer adições de conservadores ou outros aditivos (Dietrich, 1968).

TABELA 1 Características físicas e químicas da borra de café
Características físicas e químicas

Teor de umidade, máximo	5,0 g/100g
Cafeína: produtos descafeinados	0,3 g/100g
Densidade aparente	0,2 g/ml
Solubilidade (sedimento), máximo	Padrão 2 (Gerber)
pH	5-5,5
Resíduo mineral fixo, máximo	14% p/p
Cafeína, mínimo	2% p/p

Fonte: Brasil (2005)

Os padrões microbiológicos para o café solúvel estão apresentados na Tabela 2, conforme Portaria nº 451 SVS/MS, de 19 de setembro de 1997.

TABELA 2 Características microbiológicas da borra de café

Características microbiológicas	
Bactérias do grupo coliforme de origem	Máximo 10/g
Bolores e leveduras	Máximo 5×10^3 /g
Salmonelas	Ausência em 25/g

Fonte: ABIA (1998)

2.2.2 Processamento do café solúvel

A indústria brasileira de solúvel, moderna e sofisticada, molda-se às necessidades do mercado e produz todos os tipos de café que os clientes externos demandam: spray-dried, aglomerado, liofilizado e extrato líquido, sempre com os mais altos padrões internacionais de qualidade e tecnologia.

Café solúvel é produzido com a extração dos sólidos solúveis e de voláteis por meio dos processos de torrefação e moagem com água dos grãos de café seco. O processo de torrefação é o responsável pelo desenvolvimento do aroma e do sabor característicos do café. A moagem é necessária para que os sólidos solúveis e as substâncias voláteis responsáveis pelo aroma e sabor sejam adequadamente extraídos (Brasil, 2005).

O extrato com concentração de sólidos solúveis de 25% (p/p) é obtido e posteriormente concentrado utilizando-se evaporação (Figura 1) ou congelamento e, então, secos por spray drying ou freeze drying, respectivamente. Em seguida, opcionalmente, é feita a aglomeração do produto (diâmetro médio aproximado de $1.400\mu\text{m}$). O aglomerado é seco, posteriormente, em leite fluidizado, até o conteúdo desejado de teor de umidade. O café solúvel produzido pelo processo freeze drying apresenta maior vida útil comparativamente ao obtido pelo processo spray drying (Robertson, 1993)

provavelmente porque o teor de umidade inicial de café solúvel produzido pelo primeiro processo é em torno de 2% (Pintauro, 1975), enquanto a do segundo é de 4,5% (Labuza, 1982).

A maior causa de perda de qualidade de café solúvel é o aumento do teor de umidade, que resulta em total aglomeração do produto quando se atingem níveis de 7% a 8% (Robertson, 1993). Entretanto, de forma a recuperar parte do aroma que é perdido durante os processos de extração e secagem, alguns tipos de café solúvel recebem a aplicação de óleo de aroma de café para incrementar as características sensoriais do produto. Neste caso, o café solúvel é susceptível à deterioração de sabor/odor, devido à presença de oxigênio e umidade (Labuza, 1982).

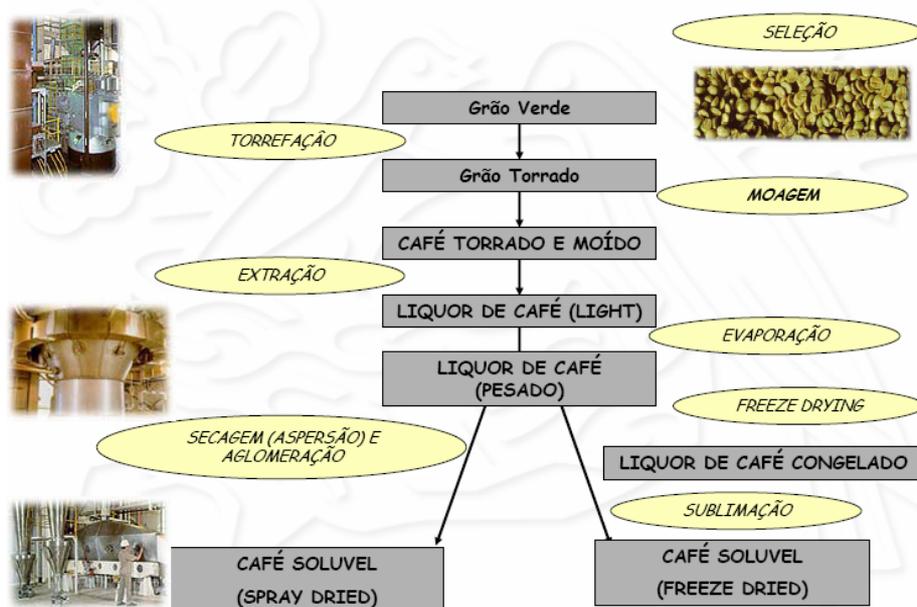


FIGURA 1 Fluxograma do processamento do café solúvel
Fonte ABICS (2008).

2.2.2.1 Tipos de processamento de café solúvel

O café solúvel pode ser produzido por meio de vários processos, os quais são apresentados a seguir.

Spray drying

Utiliza altas temperaturas sob alta pressão para volatilizar o extrato aquoso. A atomização do extrato em gotículas minúsculas em contato com o ar muito quente promove a perda de umidade e a transformação em pó.

Freezer drying

Ao contrário do processo anterior, utiliza temperaturas muito baixas para sublimação do extrato aquoso previamente congelado. A passagem direta do café em estado de gelo para a forma gasosa garante a qualidade do produto.

Aglomerado

Este processo preserva a essência natural do produto, aromatizado pela adição de óleo de café e que resulta em grânulos de ótima solubilidade.

Extrato líquido

É um extrato de café preparado por crioconcentração, solúvel em água, obtido por meio de métodos físicos, tendo a água como o único agente condutor que não é derivado do café (ABICS, 2008).

2.3 Resíduos de produtos agrícolas

A disponibilidade de resíduos provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas é muito grande. Do total de resíduos agrícolas e agroindustriais gerados no mundo, aproximadamente 65% vêm das atividades florestais, excluindo a lenha como combustível e 35% são resíduos

agropecuários. Da geração de resíduos agrícolas, a casca de arroz, o bagaço de cana e a casca de café são os predominantes. Da produção do café, aproximadamente 21% são transformados em resíduos sólidos, ou seja, casca de café, que possui poder calorífico próximo de 17.500 kJ kg⁻¹. Na indústria de café solúvel, para cada tonelada produzida, são geradas 4,5 toneladas de borra, com teor de umidade de 80% (b.u.) que, quando reduzida por secagem para 25% (b.u.), apresenta poder calorífico de 17.000 kJ kg⁻¹. Este montante pode suprir entre 60% e 80% da demanda de combustível da empresa de café solúvel que lhe dá origem (Centro de Pesquisa em Energia Elétrica-CEPEL, 2000).

Apesar da grande quantidade de resíduos gerados no meio agrícola e agroindustrial, apenas uma pequena porcentagem é aproveitada, em razão do desconhecimento do potencial energético e pela falta de equipamentos apropriados para a sua utilização. Werther et al. (2000) destacam inúmeros outros problemas que afetam a utilização desses resíduos como fonte energética. Dentre eles, estão a dificuldade de transporte, os altos custos de investimentos em unidades geradoras de energia elétrica, a disponibilidade de outros combustíveis com baixo custo e a alta demanda de mão-de-obra, fatores que podem inviabilizar seu aproveitamento tanto em pequenas como em grandes unidades geradoras.

Outros pontos importantes que influenciam o projeto de equipamentos para alimentação e combustão dos resíduos são: a baixa densidade, o alto teor de umidade, o teor de voláteis e o baixo ponto de derretimento das cinzas, que dificultam o desenvolvimento de equipamentos eficientes.

Diante das dificuldades relatadas, o aproveitamento desses resíduos para o suprimento de energia térmica nas agroindústrias que lhe deram origem pode ser considerado uma boa opção.

A combustão direta é a maneira mais antiga do uso da biomassa e vem sendo utilizada há mais de um milhão de anos, sendo responsável por 97% da

bioenergia produzida no mundo. A pirólise e a gaseificação vêm sendo pesquisadas, mas não são certamente as opções mais importantes no presente (Demirbas, 2003).

No caso do uso de resíduos agrícolas como fonte energética, deve-se levar em consideração que sua produção pode não ser constante e suficiente para atender à determinada demanda da indústria que o produz. Dessa forma, é necessário o emprego de outros combustíveis para a sua complementação ou substituição.

2.4 Borra de café

Na produção industrial de Café Solúvel são produzidos resíduos sólidos conhecidos como borra de café. Segundo a NBR 10.004, estes são classificados como Resíduos Classe II - Não Inertes, que representam resíduos que tem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água (Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, 1987).

A borra de café possui elevada carga orgânica e acidez. Usados como combustível alimentando caldeiras, em geral, na própria indústria (Tango, 1971). A queima da borra é importante no sentido de minimizar os custos (utilizando esses subprodutos em outras etapas do processo) e reduzir os problemas ligados a poluição ambiental (Pedro Neto & Ferreira, 1998).

Existem poucos dados recentes para a composição química da borra de café, como apresentado na Tabela 3. Este produto tem sido mais utilizado como combustível de queima, devido ao seu alto teor de fibras e de óleo, sendo, por isso, um produto de alto poder calorífico. Também pode ser usada como ração animal. Como o Brasil é um grande produtor de café solúvel e, conseqüentemente, de borra, justifica-se a análise de sua composição, a qual poderá subsidiar alternativas de utilização futura.

TABELA 3 Composição química da borra de café (base seca).

Autor	Proteínas [%]	Fibra Bruta [%]	Extrato Etéreo [%]	Cinzas [%]
Silva (1991)	10,8 – 12,97	37,8 – 47,5	23,8 – 29,2	0,27 – 1,08
Tango (1971)	12,2	41,0	17,9	4,5
Gopalakrina Kao & Natarajan (1974)	14,2	N.D.	13,9	1,14
Pflugger (1975)	14,0	37,0	23,0	0,5
Marins (1980)	15,0	N.D.	18,0	1,0
Adans & Dougan (1985)	10,0 – 12,0	35,0 – 44,0	22,0 – 27,0	N.D.
Raviindranath et al. (1972)	14,0 – 14,8	19,7 – 22,1	7,9 – 14,0	N.D.

2.4.1 Potencial Energético

O valor combustível da borra é comparável ao do carvão e maior do que da madeira (Gopalakrina Kao & Natarajan, 1974). Uma comparação do poder calorífico da borra de café com outros materiais é apresentada na Tabela 4.

TABELA 4 Poder calorífico de resíduos celulósico secos.

Material	Poder calorífico [kcal/kg]	Referência
Caule de juta	4619,10	Kumar et al. (1984)
Casca de arroz	3805,30	idem
Fibra de coco	4707,83	idem
Palha de trigo	4185,02	idem
Rama de algodão	3750,00	idem
Sabugo de milho	3804,35	idem
Bagaço de cana	4470,59	idem
Bagaço de cana	4600,00	Anon (1971)
Madeira	5450,00	idem
Borra de café	5960,00	idem

Fonte: Silva (1991)

2.4.2 Secagem prévia

A queima de borra de café pode ser feita diretamente após a prensagem, ou seja, com teor de umidade de aproximadamente 50% (b.u.), ou após uma operação de secagem, que deve reduzir o teor de umidade para 30% segundo Sivetz & Desrosier (1979) e Adams & Dougan (1985), pois com esse teor de umidade, a combustão é praticamente instantânea, tão logo entre na caldeira. Reduzir a umidade para níveis menores pode implicar em riscos, tendo em vista a possibilidade de combustão espontânea (Adams & Dougan, 1985).

Para queimar a borra sem secagem, é necessário ter uma câmara de combustão suficientemente grande e um excesso de combustível suplementar (aproximadamente 5% da demanda total de energia) (Pfuger, 1975) e ar para manter os níveis de temperatura desejados, devido ao aumento da umidade dos gases de combustão é necessário que a câmara de combustão tenha um volume maior e um soprador de gases de maior capacidade. Ou seja, queimar a borra úmida é ineficiente e, conseqüentemente, mais caro (Sivetz & Desrosier, 1979).

Vários tipos de secadores podem ser utilizados para secagem de borra. Algumas empresas americanas usam o secador rotativo com tubos internos, enquanto outras utilizam o secador de leito fluidizado para redução do teor de umidade de 70 a 25% de umidade (b.u.) sem uso de prensagem prévia (Sivetz & Foot, 1963).

Sivetz & Desrosier (1979) discutiram uso do secador rotativo, secador de bandejas, secador pneumático e secador de leito fluidizado, recomendando este último para a secagem de borra de café. Informações obtidas junto a seis indústrias brasileiras, mostram que cinco delas utilizam secador de leito fluidizado e uma utiliza secador rotativo (Silva, 1991).

A secagem da borra também é necessária em outros usos, com extração de óleo, fabricação de material microporoso (Tango, 1971) e alimentação animal (Adams & Dougan, 1985).

2.5 Secagem

A secagem é um dos mais difundidos processos de transferência de calor e massa, com aplicações em diversas áreas da engenharia. Os estudos sobre fenômenos de transporte que ocorrem durante a secagem em materiais particulados são de interesse não somente tecnológico, devido às suas inúmeras aplicações industriais, mas também de interesse técnico-científico, por causa da complexidade que o material apresenta (Costa, 2008).

A remoção de umidade de materiais úmidos pode ser feita por processos mecânicos de remoção de água como filtração ou prensagem. No processo de secagem, no entanto, esta remoção geralmente implica a evaporação de umidade devido ao processo de transferência simultânea de massa e calor entre a fase sólida e gasosa (Strumillo & Kudra, 1986).

Carvalho & Nakagawa (1983) afirmaram que a secagem diminui a umidade a um nível tal que diminui o efeito, ou ataque de insetos e microrganismos e reduz a velocidade de deterioração de grãos. O conceito destes autores pode ser estendido a outros materiais biológicos, tais como a borra de café, resíduo oriundo da indústria de café solúvel.

A vantagem econômica associada à operação de secagem é que, como consequência da redução de peso e volume do produto pela retirada da água, têm-se menores custos de transporte e armazenamento. Por outro lado, a desvantagem observada é que, em função da aplicação do calor durante a secagem, ocorre perda de qualidade e do valor nutricional de alimentos. Esse problema não é relevante na secagem de resíduo agroindustrial para uso como combustível na própria indústria.

2.6 Classificação de secadores

Segundo Strumillo & Kudra (1986), a classificação dos tipos de secadores pode ser feita baseada nos métodos de operação, forma física da alimentação, características especiais e escala de operação, mas recomendam aquela que se baseia na fluidodinâmica do material descrita a seguir.

Dentro desta classificação, têm-se dois grandes grupos de secadores:

. Fluidos dinamicamente não ativos

→ secadores com leito estacionário – o material pode ser considerado como uma fase estacionária, enquanto o calor é suprido e a água retirada pela fase gasosa em movimento;

→ secadores com leito móvel – o leito das partículas move-se devido à gravidade ou à força mecânica e

→ secadores com leito em queda livre – o leito ou partículas individuais caem através da fase gasosa com uma velocidade relativamente alta, devido à força gravitacional.

. Fluidos dinamicamente ativos

→ secadores com leito fluidizado – as interações do material a ser seco e da corrente gasosa criam um leito tipicamente fluidizado (partículas secas são carregadas com correntes gasosas devido à redução de densidade) e

→ secadores com material disperso – no qual o material de secagem está fluindo com a corrente gasosa.

Os secadores com regime fluidodinâmico não ativo podem ser tratados em oposição a secadores com regime fluidodinâmico ativo. Neste último, o movimento do leito ou das partículas individuais resulta de uma força fluidodinâmica exercida nas partículas por uma corrente de gás fluido com velocidade apropriada.

2.7 Ciclone

Ciclones são equipamentos usados há mais de cem anos para limpeza de gases industriais, separando sólidos de gases (Cooper & Alley, 1994) e são, provavelmente, os coletores de sólidos industriais mais comuns (figura 2) (Yuu et al., 1978).

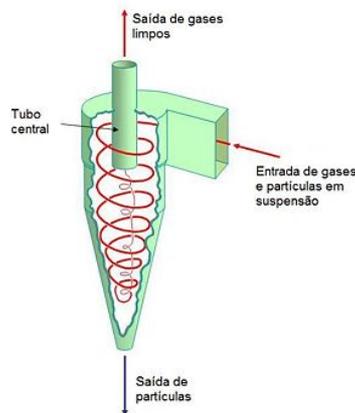


FIGURA 2 Ciclone

A primeira e principal aplicação do ciclone foi a limpeza de gases, removendo o material particulado neles contido (Linden, 1949, Stairmand, 1949).

O funcionamento do ciclone se inicia com a injeção de uma corrente gasosa contendo material particulado por uma entrada tangencial próxima ao topo do mesmo. Esta corrente adquire um escoamento em espiral descendente. A força de arraste da fase gasosa conduz a partícula a uma trajetória em espiral na periferia, colidindo com a parede interna do equipamento. Os sólidos são assim levados a um movimento também em espiral descendente, junto à parede, sendo assim recolhidos na parte inferior do ciclone. Na região central do equipamento, o gás passa de uma espiral descendente a uma espiral ascendente, conhecido

como core, saindo limpo pelo duto superior também chamado tubo de saída do gás ou draft tube (Corrêa, 2003).

Conforme observado por Linden (1949), a componente tangencial da velocidade predomina sobre as demais, tendo, ao longo do ciclone, junto à parede, um valor bastante próximo ao da velocidade de entrada. Na Figura 3, apresentada inicialmente por Ogawa (1997), está representado com bastante propriedade o escoamento desenvolvido em um ciclone com coletor de sólidos. Pode-se observar, nesta figura, o esquema de velocidades tangencial e axial, zona de recirculação e reversão de escoamento, presentes em um escoamento em um ciclone.

É bem conhecido que o campo de velocidades do gás num ciclone é formado por linhas de fluxo na forma de espirais descendentes, do lado próximo à parede e ascendentes no interior do mesmo (Corrêa, 2003).

O campo de velocidades do gás no ciclone é mais bem interpretado quando descrito a partir das três componentes da velocidade, num sistema de coordenadas cilíndricas (Linden, 1949).

As partículas entram no ciclone juntamente com o fluido, em direção tangencial. Depois disso, descrevem uma trajetória cujas características dependerão da massa da partícula e do campo de velocidade do escoamento. Partículas de pequeno diâmetro se movimentam praticamente juntas com o fluido e com ele saem pelo duto superior do ciclone. Partículas de maior diâmetro se movimentam numa trajetória curva e descendente, em direção à parede do equipamento.

Este movimento das partículas pode ser explicado lembrando que, quando em “vôo”, elas estão submetidas às forças de gravidade, de empuxo e de arraste do fluido. No caso de um escoamento de sólidos em uma corrente gasosa, o empuxo é de ordem de grandeza mil vezes menor que a do peso, desprezível, portanto. Como é conhecido, a força de arraste, além de depender do diâmetro

da partícula, viscosidade do gás, etc., é diretamente proporcional à diferença vetorial da velocidade do gás e da partícula e, devido ao escoamento complexo, ela varia ponto a ponto.

É encontrada em alguns textos a menção de uma “força centrífuga” para explicar o movimento da partícula em direção à parede. Não há uma força externa atuando na direção do raio para a periferia. O que faz a partícula avançar em direção à parede, descrevendo uma curva, é, basicamente, sua própria inércia, já que, devido ao campo de velocidades do escoamento, é possível visualizar que dificilmente a força de arraste terá uma componente nesta direção (Corrêa, 2003).

Ao atingir a parede, agem na partícula duas outras forças adicionais: o atrito partícula-parede, em direção oposta à velocidade da partícula, e a reação da parede, normal à mesma. Embora exista pouca informação experimental sobre este movimento, um aspecto curioso tem sido registrado por alguns pesquisadores: para certos níveis de concentração de partículas homogêneas, elas se movimentam conjuntamente em uma única espiral, mais ou menos larga, junto à parede.

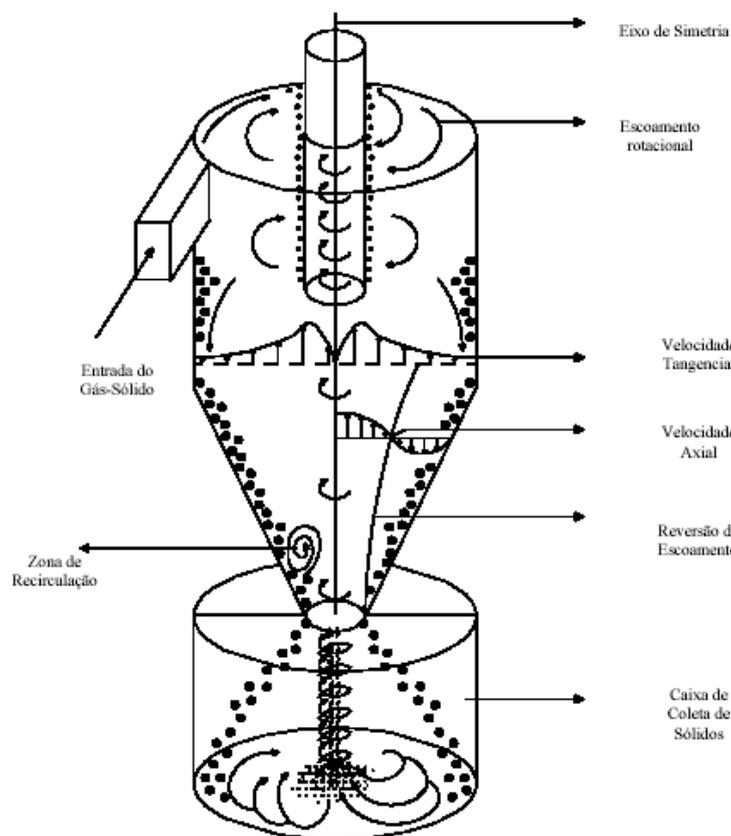


FIGURA 3 Esquema do escoamento em um ciclone.
 Fonte: Ogawa (1997).

Devido ao intenso contato promovido no ciclone entre as fases gasosa e sólida e entre estas e a parede do equipamento, o mesmo pode ser utilizado como equipamento de troca térmica, gaseificador, secador, combustor e reator químico.

Nebra (1985) e Nebra & Macedo (1989), estudaram a secagem do bagaço de cana em um sistema composto de um secador pneumático industrial seguido de um ciclone. Este sistema, instalado na Usina Barra Grande situada em Lençóis Paulista, SP, reduzia o teor de umidade a 35,8% (b.u.) e operava

com uma vazão mássica de 12.000 kg/h. Os autores verificaram que grande parte da secagem ocorria no ciclone.

O trabalho de Nebra (1985) foi o primeiro a tratar a secagem em ciclone no Brasil. A partir dele, surgiram vários outros abordando a secagem em ciclone (Silva, 1991; Gonçalves, 1996; Benta, 1997; Corrêa et al., 2002, 2004; Corrêa, 2003) e trabalhos sobre fatores importantes na secagem como transferência de calor e tempo de residência em ciclones (Godoy, 1989; Cremasco, 1994; Dibb, 1997).

De acordo com os conceitos de Strumillo & Kudra (1986) sobre a classificação de secadores o ciclone secador está inserido na classe dos fluidodinamicamente ativos, onde as partículas de secagem fluem com a corrente gasosa.

2.7.1 Tempo de residência

O tempo de residência médio das partículas em um ciclone é um parâmetro bastante importante quando se está interessado no uso desse equipamento para troca térmica ou como reator. Isso porque esta variável tem grande influência no resultado final do processo em questão, seja ele uma reação química, um aquecimento ou a secagem de um material.

Dentre os trabalhos sobre este tema, pode-se citar os de Kang et al. (1989), Lede et al. (1989), Godoy et al. (1992), Cremasco & Nebra (1994) e Peres (1997), entre outros.

Dentre os autores que buscaram relacionar o tempo de residência com a concentração volumétrica que utilizaram partículas de vidro, de plástico, de acrílico e de borra de café foi observado que o tempo de residência é inversamente proporcional a concentração volumétrica. Isto também foi observado por outros autores como Mori et al. (1968), Godoy et al. (1992), Cremasco (1994) e Peres (1997). O aumento da concentração volumétrica leva à

diminuição da componente tangencial da velocidade e, por conseqüência, à diminuição da força centrífuga que prende as partículas às paredes do equipamento (Yuu et al., 1978; Silva et al., 1989). Porém essa relação não é tão clara quando o material utilizado não é tão uniforme, assim como mostra o trabalho de Silva (1991) com borra de café (tabela 5).

TABELA 5 Tempo de residência para diferentes vazões de borra de café e
Velocidade do ar = 7,1m/s

X=0,5257	T _{res}	X=0,9820	T _{res}
Vazão mássica (kg/s)		Vazão mássica (kg/s)	
0,0008	5,3	0,0007	2,5
0,0037	2,7	0,0021	2,7
0,0040	2,9	0,0023	2,3
0,0129	2,2	0,0070	2,1
0,0149	2,6	0,0075	3,3
0,0353	3,1	0,0141	2,1
0,0376	2,7	0,0162	2,8
0,0386	2,3	0,0251	2,0
0,0535	1,9	0,0252	1,9
0,0538	2,9	0,0372	1,9

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Material

Foram adquiridos 300 kg de borra de café do processamento de café solúvel da Indústria Café Solúvel Brasília, situada na cidade de Varginha, MG. Este resíduo apresentava teor de água médio de 60 % (b.u.). Após a chegada do material na Universidade Federal de Lavras (UFLA), a borra foi acondicionada em sacos herméticos, em câmara fria, para evitar deteriorações por microrganismos e insetos, e para que se mantivesse o material em boas condições para a execução dos experimentos.

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Análise e Microestrutura, Laboratório de Produtos Vegetais e na Unidade Experimental do Secador Ciclônico, todos no Departamento de Ciências dos Alimentos da UFLA.

3.2 Caracterização da borra de café

3.2.1 Análise granulométrica

A distribuição granulométrica das amostras da borra foi feita por meio do método das peneiras padronizadas (Foust, 1982), utilizando o conjunto de peneiras padronizadas da série Tyler (4; 8; 14; 28; 35 e 48 mesh).

O cálculo do diâmetro médio das amostras da borra estudadas foi feito utilizando-se a Equação 1, relativa ao cálculo de diâmetro médio de Sauter.

$$\bar{d}_p = 1 / (\sum (x_{pe} / \bar{d}_{p,pe})) \quad (1)$$

O diâmetro médio de Sauter foi utilizado neste trabalho pela sua melhor adequação.

3.2.2 Densidade aparente

As determinações de densidade aparente foram realizadas em duplicata, utilizando-se um picnômetro de 25 mL e tolueno como solvente, conforme recomendado por Mohsenin (1970). O tolueno foi escolhido devido à sua baixa tendência a penetrar os poros no interior das partículas. A massa de amostra utilizada em cada determinação foi de, aproximadamente, 1.0000 g.

Para a determinação da densidade aparente foi necessário obter o volume total da amostra, antes que o tolueno penetrasse nos poros. O volume da amostra foi obtido subtraindo-se o volume do picnômetro vazio pelo volume de tolueno que ocupava o espaço vazio (não preenchido pela amostra). Para a determinação do volume ocupado pelo tolueno, foram tomadas medidas precisas da massa do picnômetro vazio, da massa da amostra e da massa total do picnômetro contendo a amostra com tolueno. A massa do tolueno no picnômetro correspondeu à massa total (picnômetro + tolueno + borra) menos a massa do picnômetro vazio e da borra. Dividindo-se a massa obtida pela densidade do tolueno, o volume do tolueno foi obtido de acordo com a seguinte equação:

$$V_{\text{tolueno}} = \frac{m_{\text{tolueno}}}{\rho_{\text{tolueno}}} = \frac{m_{\text{total}} - m_{\text{picnômetro}} - m_{\text{borra}}}{\rho_{\text{tolueno}}} \quad (2)$$

A densidade aparente da borra foi calculada por meio da equação 3.

$$\rho = \frac{m_{(\text{picnômetro} + \text{borra})} - m_{(\text{picnômetro})}}{V_{(\text{picnômetro})} - V_{(\text{tolueno})}} \quad (3)$$

3.2.3 Teor de umidade

As determinações de teor de umidade foram obtidas por meio de secagem em estufa, à temperatura de 90°C, durante 16 horas. O cálculo do teor de umidade em base seca e úmida foi realizado de acordo com as equações 4 e 5, respectivamente. Esta metodologia é recomendada para café solúvel em pó, conforme (Association of Official Analytical Chemists-AOAC, 1980), adaptado para a borra de café.

$$X = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{material seco}}} \quad (4)$$

$$X' = \frac{m_{H_2O}}{m_{\text{material úmido}}} \quad (5)$$

3.2.4 Determinação da composição centesimal

Todas as análises da composição centesimal foram realizadas em triplicata.

As determinações de proteína, na borra de café foram feitas pelo método semimicro-Kjeldahl. O teor de nitrogênio foi convertido em proteína utilizando-se o fator 6,25.

O teor de lipídeos foi determinado pelo método intermitente de Soxhlet, que baseia-se na extração da fração lipídica com éter de petróleo. Após a extração e a remoção do solvente, foi determinada gravimetricamente a quantidade de lipídeos presentes.

Para a determinação do teor de umidade, foi utilizado o método da secagem em estufa a 90°C, até peso constante.

O teor de cinzas foi determinado por meio de calcinação da amostra em mufla entre 550° e 600°C. A fração extrato não nitrogenado (ENN) foi obtida pelo cálculo de diferença das outras.

3.3 Delineamento experimental

Os primeiros experimentos foram realizados de acordo com um planejamento fatorial 2². A execução dos experimentos obedece à ordem determinada na Tabela 6. Foram realizados quatro ensaios de secagem, utilizando-se duas variáveis independentes (temperatura da corrente gasosa e relação entre vazão de sólidos e vazão de ar), porém, com vazão de ar constante. As variáveis respostas avaliadas foram tempo de residência e teor de umidade da borra de café.

Foram estudados os efeitos de duas variáveis independentes: temperatura (X_1) e relação entre vazão de sólidos e vazão de ar (X_2).

TABELA 6 Valores utilizados para análise de efeito

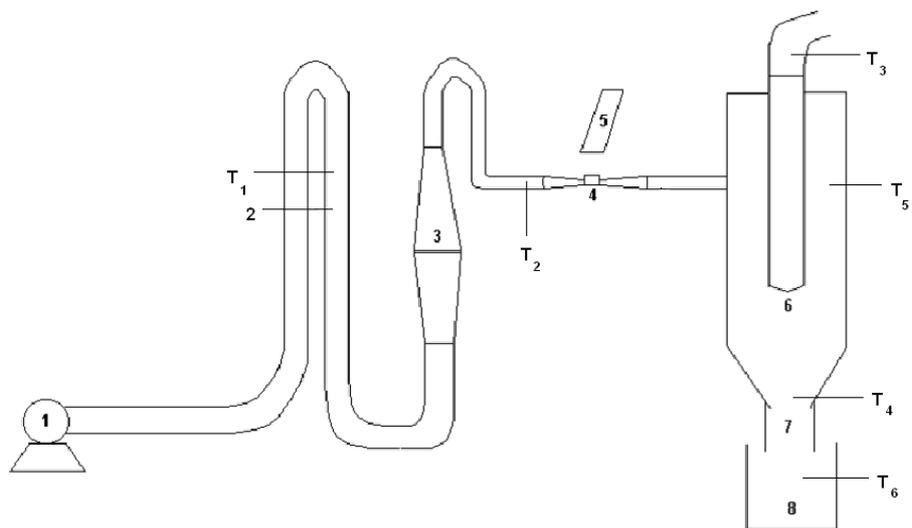
Ensaios	Temperatura (codificada)	Relação entre vazão de sólidos e vazão de ar (codificada)	Temperatura [° C] (real)	Relação entre vazão de sólidos e vazão de ar [-] (real)
1	-1	-1	90	21,2
2	+1	-1	170	19,7
3	-1	+1	90	26,4
4	+1	+1	170	26,3

Os efeitos das variáveis independentes foram obtidos com o auxílio do software Statistica Versão 8.0 (Statsoft®).

3.4 Montagem experimental

O sistema experimental aqui estudado foi projetado com o objetivo de avaliar a influência das condições operacionais (vazões de sólido e de ar e temperatura do ar) no teor de umidade e no tempo de residência.

Um esquema da montagem experimental é apresentado na Figura 4, onde estão indicados os componentes do sistema.



1. Soprador; 2. Placa de Orifício; 3. Aquecedor; 4. Alimentador Venturi; 5. Esteira elétrica; 6. Secador Ciclônico; 7. Tecido; 8. Coletor de sólidos. T são pontos de medição de temperatura da corrente gasosa.

FIGURA 4 Esquema da montagem experimental

3.4.1 Ventilador

O ventilador utilizado foi do tipo VEC 5ta 500 especial, motor 5 SCV, com rotação em torno de 5.000 RPM, pressão de 1.000 mm de ca e vazão de 30 m³min⁻¹(Figura 5).



FIGURA 5 Vista do ventilador na parte externa da planta experimental.

3.4.2 Tubulação

A tubulação que conduz o ar do ventilador até o aquecedor é de cloreto de polivinila (PVC) com diâmetro de 4 polegadas. A partir de então, a tubulação foi construída em aço carbono.

3.4.3 Esteira de alimentação

Para que a constância da vazão de sólidos não fosse comprometida, optou-se, no presente estudo, pela alimentação da borra de café por uma esteira transportadora, alimentada manualmente. A alimentação manual de uma espessura constante do material a uma velocidade constante conduziu a uma vazão de sólidos praticamente constante. As possíveis variações desta vazão dentro do mesmo teste advêm de erros experimentais.

A esteira (Figura 6) utilizada foi fabricada pela empresa Ermapi Equipamentos Industriais Ltda., com 1,5 m de comprimento, largura útil de 100 mm e velocidade ajustável entre 0 e 20,0 m s⁻¹.



FIGURA 6 Detalhe da esteira.

3.4.4 Alimentador Venturi

O alimentador Venturi aqui utilizado foi dimensionado em trabalho anterior (Corrêa, 2003) e é apresentado nas Figuras 7 e 8.

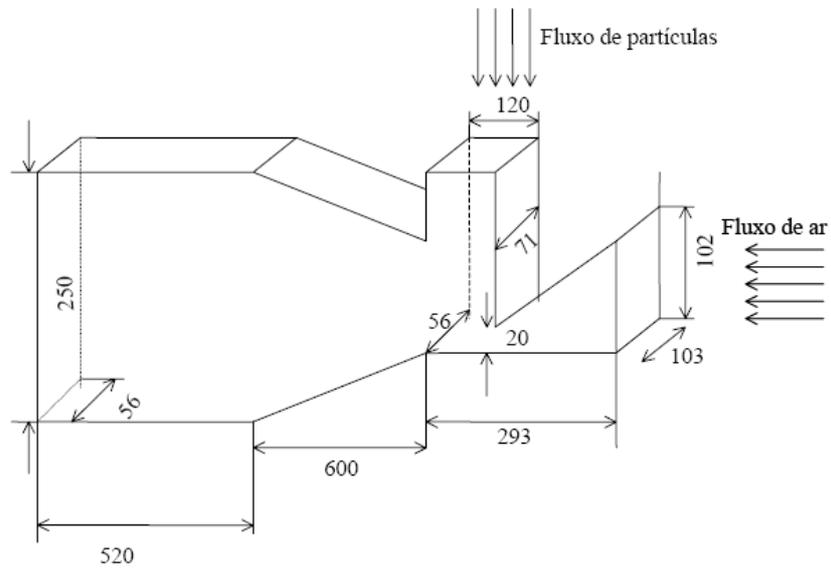


FIGURA 7 Alimentador venturi com dimensões em milímetros

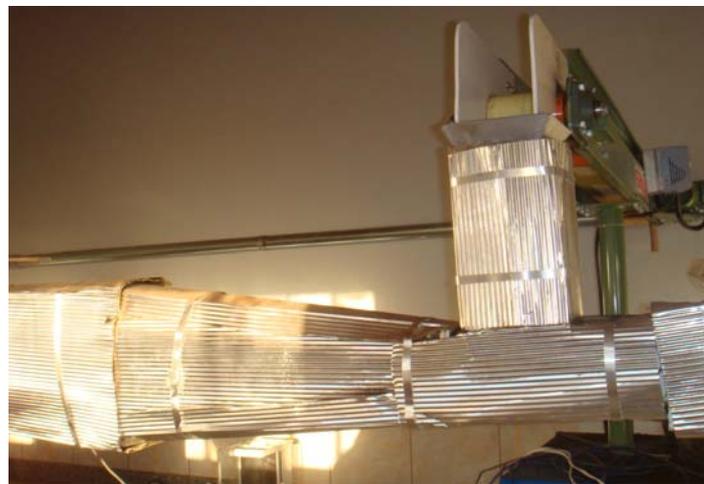


FIGURA 8 Alimentador venturi.

3.4.5 Aquecedor e isolamento

O aquecedor montado em chapas de aço carbono consistia de 17 resistências da marca Anluz, totalizando uma potência de 34 kW.

O isolamento adotado a partir do aquecedor foi feito com lã de rocha de 5 cm de espessura e revestido com alumínio corrugado (Figura 9).



FIGURA 9 Detalhe do aquecedor de ar com conjunto de resistências

3.4.6 Ciclone

O ciclone estudado neste trabalho foi dimensionado com base no trabalho de Corrêa (2003), porém, com variação nas dimensões da parte cônica.

A geometria e as dimensões do ciclone aqui utilizado são apresentadas na Figura 10 e a Tabela 7.

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados detalhes do ciclone e, na Figura 13, uma vista superior do sistema experimental.

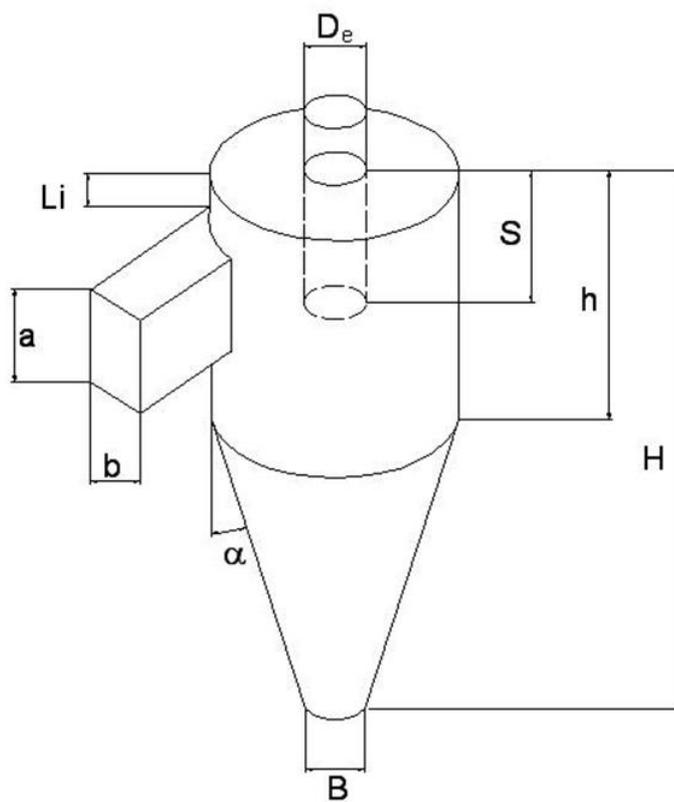


FIGURA 10 Geometria do ciclone

TABELA 7 Dimensões do ciclone

Dimensão (m)	
a	0,250
b	0,056
L_i	0,150
h	0,730
H	1,370
D	0,730
De	0,160
B	0,100
S	0,500



FIGURA 11 Ciclone



FIGURA 12 Detalhe da parte superior do ciclone



FIGURA 13 Vista superior do sistema experimental

3.4.7 Instrumentação

a) Medidor de vazão de placa-orifício:

A medida de vazão de ar neste sistema foi tomada por meio de uma placa de orifício acoplada a um manômetro em U, contendo álcool etílico como fluido manométrico.

Antes da placa de orifício, foi acoplado um termômetro comum, marca Incoterm, com menor divisão de 1°C, para a determinação da temperatura de ar na entrada do sistema.

b) Psicômetro, termômetros e termopares

Nos experimentos de secagem da borra de café foram realizadas as seguintes medidas de temperatura:

1. temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido do ar ambiente com um psicômetro com ventoinha da marca Hidrologia, com termômetros com menor divisão de 0,2°C;
2. temperatura do ar anteriormente à placa de orifício com um termômetro fixado na linha com menor divisão de 1°C (T_1 , Figura 4);
3. temperatura do ar na saída do aquecedor (T_2 , Figura 4); nas saídas superior (T_3 , Figura 4); inferior do ciclone (T_4 , Figura 4) e na parede do ciclone (T_5 , Figura 4);
4. temperatura de entrada de sólidos diretamente no saco plástico onde estava armazenado o produto e temperatura de saída de sólidos (T_6 , Figura 4); medida no coletor de sólidos (isolado) com o termopar utilizado para esta medida estivesse coberto por sólidos.

Estes métodos também foram utilizados por Silva (1991) e Corrêa (2003).

3.4.8 Tempo de residência

A determinação de tempo de residência foi realizada segundo o método de sólidos remanescentes ou *hold up*, segundo Lede et al. (1987). Neste método, o tempo de residência é dado pela razão entre a massa de sólidos remanescentes e a vazão mássica de sólidos utilizada. A massa de sólidos remanescentes é medida ao se interromper simultaneamente a alimentação das correntes de sólido e de gás (equação 6). Deve-se observar que os dados de tempo de residência foram obtidos em experimentos de secagem.

$$t_{\text{res}} = \frac{m_{\text{rem}}}{W_p} \quad (6)$$

3.4.9 Vazão de sólidos

Esta variável foi determinada em cada teste por meio da medida da massa de sólidos coletada em uma balança com precisão 0,01g em um determinado intervalo de tempo. Considerou-se que a massa de sólidos coletada fosse igual à massa de sólidos alimentada, pois não foi observada perda de sólidos através da parte superior da câmara ou do ciclone.

3.4.10 Massa de sólidos remanescentes

Foi obtida por meio de pesagem da massa de sólidos coletada na saída inferior do ciclone, em uma balança com precisão de 0,0001g. Esta massa é obtida quando as alimentações de sólidos e de gás são simultaneamente interrompidas e corresponde ao inventário de sólido no interior do equipamento.

3.4.11 Cálculo da vazão de ar no ciclone

Os valores de vazão da corrente gasosa foram calculados a partir da medida de um diferencial de pressão obtido em um manômetro de tubo inclinado, medidas de temperatura e pressão ambiente e temperatura da corrente gasosa, além de medidas de bulbo seco e bulbo úmido. Dessa forma, as equações propostas nas normas da ASME e reportadas por Delmée (1983).

$$Q = CE\beta^2 A_1 \left(\frac{2 \Delta P}{\rho_{a,u}} \right)^{0,5} \quad (7)$$

em que β corresponde à relação D_2/D_1 , sendo D_1 correspondente ao diâmetro da tubulação em questão e D_2 , o diâmetro da placa de orifício. A constante CE foi calculada a partir da relação dada por 8.

$$CE = C'E + Br(10^6 ReD_1)^{0,5} \quad (8)$$

em que

$$C'E = 0,6014 - 0,030352D_1^{-0,25} + \left((0,3760 + 0,1629D_1^{-0,25}) \left[\frac{0,16129}{D_1^2\beta^2 + 0,0635D_1} + \beta^4 + 1,5\beta^{16} \right] C'E + Br(10^6 ReD_1)^{0,5} \right) \quad (9)$$

$$\text{Br} = 0,0002 + \frac{0,02794}{D_1} + \left(0,0038 + \frac{0,01016}{D_1} \right) \left(\beta^2 + (16,5 + 0,19695D_1) \right) \beta^{16} \quad (10)$$

em que D_1 deve ser expresso em mm e Re_{D_1} corresponde ao número de Reynolds com relação a D_1 .

3.4.12 Secagem em equipamento ciclônico

Os experimentos de secagem no ciclone foram realizados segundo o procedimento abaixo descrito:

- a. medir a temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido, para a determinação da umidade absoluta do ar;
- b. ligar o soprador e o aquecedor;
- c. verificar a temperatura do termopar localizado entre a parede do ciclone e o isolamento térmico do mesmo. Deve-se esperar que esta temperatura não apresente variação para que o sistema seja considerado em regime permanente e seja iniciada a alimentação de sólidos;
- d. ajustar a alimentação de sólidos por meio da velocidade da esteira e da altura da parede colocada exatamente no final da esteira para que se obtenha uma espessura constante de material;
- e. verificar novamente a temperatura do termopar localizado entre a parede do ciclone e o isolamento térmico do mesmo. Deve-se esperar novamente que esta temperatura não apresente variação para que o sistema, agora com alimentação de sólidos, seja considerado em regime permanente;

- f. medidas de temperatura da corrente gasosa no ponto próximo à placa de orifício, antes da alimentação de sólidos, antes da entrada do ciclone e nas saídas superior e inferior do ciclone;
- g. medidas de massa de sólido coletado em um determinado tempo, para a determinação da vazão de sólidos;
- h. medidas de massa remanescente de sólidos ao serem interrompidas simultaneamente às alimentações de sólido e de gás. Essas medidas, juntamente com as do item g, são utilizadas para a determinação do tempo de residência das partículas no equipamento;
- i. medida de umidade de uma amostra de borra de café antes da secagem no ciclone e de outra amostra depois da secagem. Estas amostras eram acondicionadas em sacos plásticos imediatamente após sua coleta, para evitar variações de umidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização da borra de café

Com a finalidade de caracterizar a borra de café, foram realizadas análises de granulometria, densidade aparente e composição centesimal.

4.1.1 Análise granulométrica

Os resultados obtidos nas análises granulométricas em diferentes teores de umidade são apresentados nas Figuras 14, 15 e 16, respectivamente.

De acordo com o gráfico da Figura 14, as faixas de tamanho de borra de café com maior fração mássica foram obtidas entre as peneiras com abertura 1,20 mm (14 mesh) e 0,60 mm (28 mesh). Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores (Silva, 1991; Viotto & Menegalli, 1991). Porém, aumentando a umidade de 50% para 60%, conforme Figura 15, as maiores frações mássica foram ficando nas peneiras subsequentes, com abertura 2,36 mm (8 mesh) e 1,20 mm (14 mesh). A mesma tendência foi seguida para a amostra com teor de umidade de 65% (Figura 16). Tanto aqui como naqueles trabalhos, observou-se que, com o aumento do teor de umidade, as partículas finas de borra de café tendem a se agrupar, formando grumos de maiores dimensões. Os resultados aqui obtidos corroboraram os de Silva (1991), que relatou a formação de grumos com o aumento do teor de umidade.

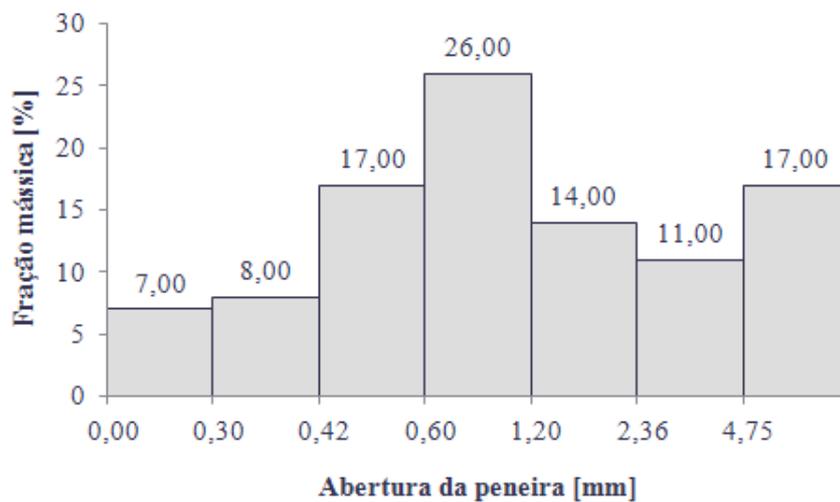


FIGURA 14 Distribuição granulométrica da borra de café com teor de umidade de 50% (b.u).

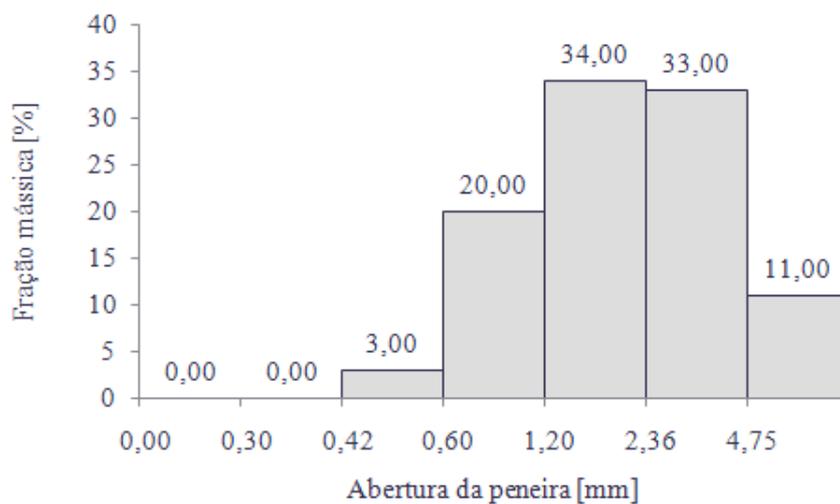


FIGURA 15 Distribuição granulométrica da borra de café com teor de umidade de 60% (b.u).

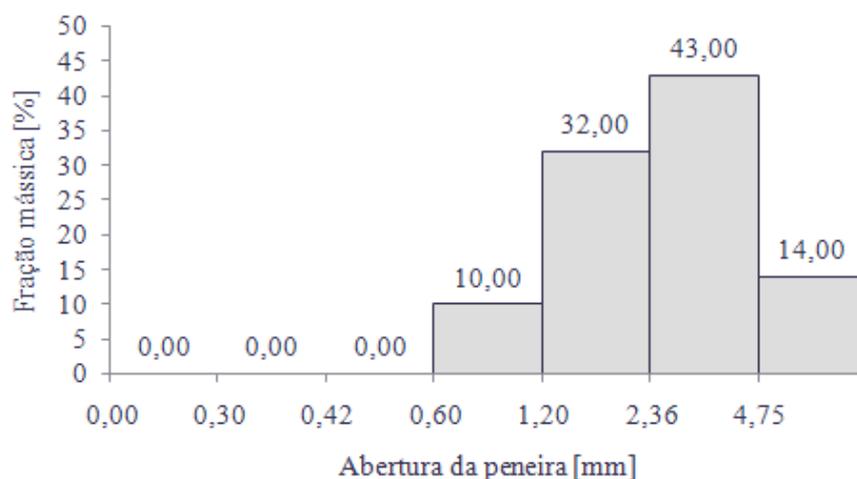


FIGURA 16 Distribuição granulométrica da borra de café com teor de umidade de 65% (b.u).

Pode-se observar, pela Figura 17, a comprovação da variedade de tamanhos da borra de café analisada pela distribuição granulométrica. Na Tabela 8 são apresentadas as frações mássicas obtidas nos experimentos de granulometria.

TABELA 8 Análise granulométrica da borra de café

X' [%] (b.u.)	Abertura da peneira [mm]							\bar{d}_p (Sauter) [mm] Tyler (mesh)
	4,7	2,3	1,2	0,6	0,4	0,3	0,0	
	4	8	14	28	35	48	fundo	
	Fração mássica retida [%]							
56	17	11	14	26	17	8	7	1,01
60	11	33	34	20	3	0	0	1,70
65	14	43	32	10	0	0	0	2,20



FIGURA 17 Análise granulométrica da borra de café

4.1.2 Densidade aparente

Com relação à variação de densidade aparente com relação ao teor de umidade, os dados aqui também corroboram os de Silva (1991). Pela análise do gráfico da Figura 18, observa-se que a densidade diminui com o aumento do teor de umidade, o que pode ser explicado pelo fato de as partículas incrementarem seu tamanho quando absorvem água, que tem menor densidade que o sólido seco. Após um certo valor de densidade mínima, a densidade aparente volta a apresentar aumento de valor com o aumento do teor de umidade, devido ao aumento de fração mássica de água.

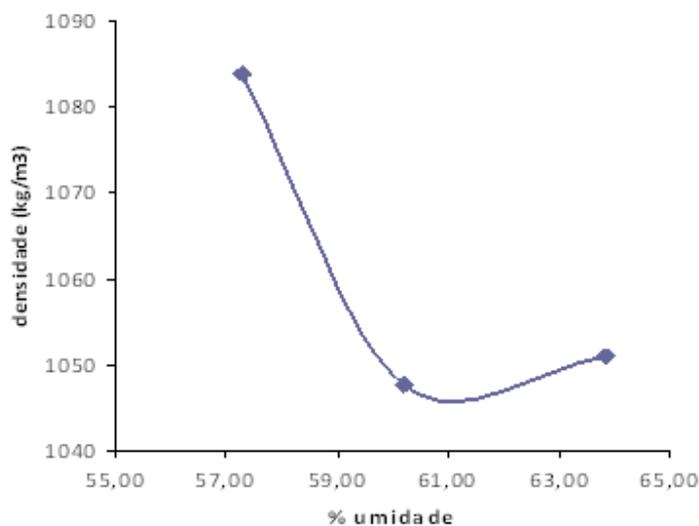


FIGURA 18 Densidade aparente da borra de café

4.1.3 Análise centesimal

Adans & Dougan (1985) citam valores de 10% a 12% de proteína, de 22% a 27% de lipídios e de 35% a 44% de fibra para a borra de café integral, enquanto Ravindranath et al. (1972), analisando borras resultantes da extração de café solúvel a partir das variedades robusta e arábica, encontraram teores de proteína, óleo e fibra de 14% e 14,8%, 7,9% a 14% e de 19,7% a 22,1%, respectivamente. Os resultados de proteína e cinzas entre os resultados apresentados na Tabela 9 divergem, possivelmente, devido aos diferentes tipos de café (arábica e conilon) e ao tipo de processamento de café solúvel.

TABELA 9 Composição centesimal da borra de café

Composição centesimal	
Teor de umidade	56,68%
Extrato etéreo	15,12%
Proteínas	4,51%
Fibras	19,06%
Cinzas	0,57%
ENN	4,05%

Os resultados obtidos de extrato etéreo, conforme consta na Tabela 9 sugerem possível estudo sobre o aproveitamento do óleo obtido da borra de café como fonte comestível ou aromatizante em alimentos, ou aproveitamento de fibras em formulações alimentares.

4.2 Resultados dos experimentos de secagem no ciclone

4.2.1 Teor de umidade da borra de café

Na Tabela 10 estão apresentados os resultados experimentais de secagem em secador ciclônico, em que X_i representa o teor de umidade inicial (b.u) e X_f o teor de umidade final (b.u). Os quatro testes foram realizados em uma única vazão de ar, duas temperaturas e relação entre a vazão de sólidos e vazão de ar diferentes, de acordo com os ensaios propostos no planejamento experimental.

TABELA 10 Resultados experimentais de secagem de borra de café em relação ao teor de umidade final

Teste	W_{ar} [kg/s]	T_{ar} [°C]	Y_i [%]	W_p [kg/s]	X_i (b.u.) [%]	X_f (b.u.) [%]	C_S^* W_p/W_{ar} [-]
1	0,096	90	53	2,04	65,6	58,3	21,2
2	0,096	170	68	1,88	65,6	55,7	19,7
3	0,096	90	53	2,53	65,6	59,7	26,4
4	0,096	170	69	2,52	65,6	56,9	26,3

* C_S relação entre as vazões de borra de café e a vazão de ar úmido, ambos em condições antes da secagem.

Observou-se (Tabela 10) redução do teor de umidade para as duas temperaturas empregadas com relação inversamente proporcional à relação entre vazão de sólidos e vazão de ar. Porém, como era de se esperar, com o aumento da temperatura, obteve-se diminuição do teor de umidade, pois a temperatura é uma variável bastante importante em processos de secagem. Esses dados corroboraram o trabalho de Silva (1991), que trabalhou com secagem de borra de café em um sistema semelhante ao aqui empregado, porém, com diferentes condições de operação e em ciclone com geometria diferente do aqui empregado. Corrêa et al. (2004) também obtiveram esta tendência em um estudo de secagem de bagaço de cana em secador ciclônico com geometria diferenciada da aqui utilizada.

Os resultados resumidos da análise de efeito para teor de umidade da borra de café após a secagem no ciclone são mostrados na Tabela 11.

TABELA 11 Resumo da análise de efeito da temperatura do ar e da relação entre as vazões de sólido e do ar no teor de umidade da borra de café após a secagem no ciclone.

Resposta	Fonte de variação	Efeito	Erro padrão	Valor p*
Teor de Umidade	Temperatura	-2,70000	0,100000	0,023568
	Relação entre vazão de sólidos e vazão de ar	1,30000	0,100000	0,048875

*significativo, pelo teste t, a 10% de probabilidade

Observa-se, pelos dados da Tabela 11, que a fonte de variação reflete significância para as duas variáveis testadas (temperatura e relação de vazão de sólidos e vazão de ar). A temperatura apresentou efeito negativo, resultado esperado, pois, aumentando-se a temperatura do ar de secagem, obteve-se redução do teor de umidade. Com respeito à relação entre vazão de sólidos e vazão de ar, o efeito positivo representa que, com o aumento da relação, tem-se um aumento no teor de umidade, ou seja, menor nível de secagem, o que também era esperado, pois representa um aumento da massa de sólidos com relação à massa de ar e, com isso, maior carga de sólidos a serem secos por uma mesma massa de ar. Estes dados também corroboraram os trabalhos de Silva (1991) e Corrêa et al. (2004), em estudos de secagem de borra de café e bagaço de cana, respectivamente, em secador ciclônico.

Na Tabela 12 são apresentados os resultados aqui obtidos de secagem da borra de café e os obtidos em trabalhos da literatura (Silva, 1991; Viotto et al., 1991). Deve-se notar que os dados apresentados nesta tabela foram obtidos em diferentes tipos de secadores e em diferentes condições, o que dificulta uma comparação criteriosa. Desta forma, a tabela tem objetivo apenas de apresentação de trabalhos com o mesmo tema. De maneira bastante simplista,

pode-se observar que neste trabalho foram obtidos menores teores de umidade final que nos demais trabalhos. Novamente, nota-se a dificuldade de comparação por diferenças de condições experimentais, porém, deve-se observar que a relação entre a vazão de sólidos e a vazão de ar aqui tratada foi bastante superior à utilizada naqueles trabalhos, fator agravante em processos de secagem.

TABELA 12 Resultados de secagem de borra de café em diferentes tipos de secadores

Secador	W_{ar} [kg/s]	T_{ar} [°C]	W_p [kg/s]	W_p/W_{ar} [-]	X_i [%]	X_f [%]
	0,096	90	2,03653	21,21385	65,6	58,3
Ciclone (Este trabalho)	0,096	170	1,88371	19,62198	65,6	55,7
	0,096	170	2,52182	26,26896	65,6	56,9
Ciclone (Silva,1991)	0,0911	165,4	0,0016	0,017563	48,7	34,4
	0,0902	165,0	0,0063	0,069845	48,6	43,2
	0,0907	162,9	0,0101	0,111356	48,6	45,0
Pneumático (Viotto,1989)	0,0611	181,1	0,0033	0,05401	57,6	50,4
	0,0739	179,7	0,0061	0,082544	66,7	61,0
	0,0743	184,0	0,0111	0,149394	66,8	62,5
Fluidizado (Viotto,1989)	0,238	130,0	(0,95)*	3,991597	64,1	25,0

*massa inicial de 0,95 kg de borra úmida

4.2.2 Tempo de residência

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados experimentais de secagem e tempo de residência em secador ciclônico, em que t_{res} representa o tempo de residência em segundos. Os quatro testes foram realizados em uma

única vazão de ar, duas temperaturas e concentrações diferentes, de acordo com os ensaios propostos no planejamento experimental.

TABELA 13 Resultados experimentais de secagem de borra de café em relação ao tempo de residência

Teste	W_{ar} [kg/s]	T_{ar} [°C]	Y_i [%]	W_p [kg/s]	X_i [%]	t_{res} [s]	CS^* W_p/W_{ar} [-]
1	0,096	90	53	2,04	65,6	1,7	21,2
2	0,096	170	68	1,88	65,6	2,2	19,7
3	0,096	90	53	2,53	65,6	2,4	26,4
4	0,096	170	69	2,52	65,6	2,7	26,3

* C_S relação entre as vazões de borra de café e a vazão de ar úmido, ambos em condições antes da secagem.

O tempo de residência da borra de café no interior do ciclone está inserido com valores variando entre 1,7 e 2,7 segundos. O tempo de residência teve tendência de aumento com relação às variáveis temperatura e relação entre as vazões de sólido e do ar. Os resultados aqui obtidos com relação ao tempo de residência corroboram os de Silva (1991), conforme dados da Tabela 5.

De acordo com essa análise, a temperatura e a concentração de sólidos foram uma faixa importante de estudo, porém, o tempo de residência depende de outras variáveis de estudo, tais como: características das partículas e características geométricas dos ciclones, não estudadas aqui (Godoy, 1989).

Essa informação não corrobora com observações de Mori et al. (1968), Yen et al. (1990), Godoy et al. (1992), Cremasco (1994, 1995) e Corrêa et al. (2004) onde observou-se uma redução no tempo de residência das partículas com o aumento da concentração de sólidos. A concentração de sólidos utilizada pelos autores acima é dada pela massa de sólidos por volume de gás, sendo uma

variável bastante relacionada com a relação entre as vazões mássicas de sólido e de ar, aqui utilizada. Deve-se ressaltar que em nenhum dos trabalhos acima citados foi utilizada borra de café como partícula nas análises. Conforme observado por Godoy (1989) e Silva (1991), o diferente comportamento apresentado pela borra de café pode ser atribuído à diferença no diâmetro e na estrutura deste material com relação aos demais, sendo a densidade do sólidos, uma variável de papel preponderante. É interessante notar que os dados de tempo de residência de Silva (1991) não foram obtidos em experimentos de secagem, como feito neste trabalho. O tempo de residência obtido esteve na faixa entre 2 e 3 segundo e, assim como no trabalho de Silva (1991) não apresentou uma relação clara com relação entre a relação vazão de sólidos por vazão de ar.

Os resultados resumidos da análise de efeito para tempo de residência da borra de café são mostrados na Tabela 14.

TABELA 14 Resumo da análise de efeito do tempo de residência da borra de café.

Resposta	Fonte de variação	Efeito	Erro padrão	Valor p
Tempo de residência	Temperatura	0,400000	0,100000	0,155958
	Relação entre as vazões de sólido e do ar	0,600000	0,100000	0,105137

* significativo, pelo teste t, a 10% de probabilidade

Na Tabela 14, observa-se que a fonte de variação não reflete significância com respeito às variáveis temperatura e relação entre as vazões de sólido e do ar, porém, a relação entre as vazões mássicas de sólido e de ar indica a necessidade de estudos mais aprofundados, devido à sua tendência a ser tornar significativo.

5 CONCLUSÕES

A variáveis independentes temperatura apresentou relação inversamente proporcional ao teor de umidade final da borra de café, enquanto que a relação entre as vazões de sólido e do ar mostrou relação diretamente proporcional.

Para tempo de residência, as mesmas variáveis independentes não foram significativas, entretanto, a relação entre as vazões de sólido e do ar mostra uma tendência de uma maior permanência das partículas no ciclone, necessitando de estudos mais aprofundados.

O ciclone aqui estudado mostrou-se eficiente em remoção de umidade superficial de borra de café em baixo tempo de residência. Dessa forma, pode-se sugerir o uso deste equipamento como um pré-secador de partículas e em melhoria de eficiência energética de caldeiras com uso de borra de café como combustível sólido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADANS, M.R.; DOUGAN, J. Waste products. In: CLARKE, R.J.; MACRAE, R. **Coffee: technology**. London: Elsevier Applied Science, 1985. v.2, p.282-291.

ANON, X. Let residue disposal pay for itself. **Power**, New York, n.115, p.60-61, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE CAFÉ. **Tendência do consumo de café no Brasil em 2004**: projeto “tendência II. Disponível em: <http://www.Abic.com.br/estat_pesquisa.html>. Acesso em: 7 ago. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA ALIMENTAÇÃO. **Compêndio da legislação de alimentos**: consolidação das normas e padrões de alimentos. São Paulo, 1998. v.1.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 1987. 5p.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis**. Arlington, 1980. 1178p.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Nestlé constrói, com apoio do BNDES, fábrica de café solúvel para exportação**. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/noticias/not683.asp>>. Acesso em: 2 mar. 2008.

BENTA, E.S. **Estudo da secagem de sabugo de milho em ciclone**. 1997. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BORRELLI, R.C.; VISCONTI, S.; MENNELLA, C.; ANESE, M.; FOGLIANO, V. Chemical characterization and antioxidant properties of coffee melanoidins. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v.50, n.22, p.6533-6535, Nov. 2002.

BOYSAN, F.; AYERS, W.H.; SWITENBANK, J. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design. **Transactions Chemical**, London, v.60, n.3, p.222-230, 1982.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução nº 277**, de 22 de setembro de 2005. Aprova regulamento técnico para café, cevada, chá erva-mate e produtos solúveis. Brasília, 2005. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/Resolucoes/resolucoes2005/277-2005.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2009.

BROOKER, D.B.; BAKKER-AREMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Connecticut: AVI, 1974. 265p.

CARVALHO, N.; NAKAGAWA, J.N. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. Campinas: Fundação Cargil, 1983. 313p.

CENTRO DE PESQUISA EM ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de aplicação de sistemas descentralizados de geração de energia elétrica para projetos de eletrificação rural: energia biomassa**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000. 41p.

COOPER, C.D.; ALLEY, F.C. **Air pollution control: a design approach**. Washington: Waveland, 1994. 150p.

CORRÊA, J.L.G. **Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos**. 2003. 189p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CORRÊA, J.L.G.; GRAMINHO, D.R.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. Cyclone as a sugar cane bagasse dryer. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 13., 2002, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IDS, 2002. p.1542-1549.

CORRÊA, J.L.G.; GRAMINHO, D.R.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. The cyclonic dryer: a numerical and experimental analysis of the influence of geometry on average particle residence time. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v.21, n.1, p.103-112, Jan./Mar. 2004.

COSTA, J.M.G. **Caracterização física, secagem (fritura de imersão e leito fixo) e isoterma de desorção do bagaço de cana**. 2008. 100p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos)-Universidade Federal de Lavras, Lavras.

CREMASCO, M.A. **Estudo sobre o escoamento ar/partículas em um reator ciclônico**. 1994. 182f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CREMASCO, M.A. Proposta de uma correlação para o tempo de residência de particulados grossos em ciclones. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 23., 1995, Maringá. **Anais...** Maringá: ENEMP, 1995. v.2, p.653-661.

CREMASCO, M.A.; NEBRA, S.A. Estudo experimental da influência de particulados na transferência de calor gás-parede em um ciclone. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 21., 1994, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto: ENEMP, 1994. v.1, p.301-312.

DELMÉE, J.P. **Manual de medição de vazão**. São Paulo: E.Blucher, 1983. 473p.

DEMIRBRAS, A. **Combustion characteristics of different biomass fuels**. New York: Elsevier, 2003. 230p. (Progress in Energy and Combustion Science, 30).

DIBB, A. **Comportamento fluidodinâmico do ciclone em diferentes geometrias**. 1997. 67f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

DIETRICH, G.Q. Tecnologia do café solúvel. **Boletim do Centro Tropical de Pesquisas e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.14, n.1, p.37-65, jun. 1968.

DIRGO, J.; LEITH, D. Design of cyclone separators. In: CHEREMISINOFF, N.P. (Ed.). **Encyclopedia of fluid mechanics**. New York: Gulf, 1986. p.1281-1306.

FOUST, A.S. **Princípios das operações unitárias**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982. 620p.

FRASER, S.M.; RAZEK, A.M.A.; ABDULLAH, M.Z. Computational and experimental investigations in a cyclone dust separator. **Journal of Process Mechanical Engineering**, London, v.211, n.E4, p.247-257, 1997.

GODOY, A.L. **Estudo teórico e experimental do tempo de permanência de partículas em ciclones de gás**. 1989. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GODOY, A.L.; SILVA, M.A.; NEBRA, S.A. Análise experimental do tempo de residência de partículas em ciclones de gás. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS, 20., 1992, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1992. p.251-261.

GONÇALVES, E.C. **Secagem ciclônica do resíduo da indústria processadora de laranja**. 1996. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GOPALAKRINA KAO, N.; NATARAJAN, C.P. Utilization of coffee by-products. **Indian Coffee**, New Delhi, n.495, p.3-5, 1974.

JAVACAFÉ. **Coffee history**. Disponível em: <<http://www.javacafe.com.br>>. Acesso em: 2 mar. 2008.

KANG, K.; KWON, T.W.; KIM, S.D. Hydrodynamics characteristics of cyclone reactors. **Powder Technology**, Lausanne, v.58, n.3, p.211-220, Sept. 1989.

KUMAR, K.; BAL, S.; OJHA, T.P. Fuel Characteristics of agricultural residues: agricultural mechanization in Asia. **Africa and Latin America**, Mount Morris, v.15, n.4, p.61-64, 1984.

LABUZA, T.P. Shelf-life of coffee and tea. In: _____. **Shelf-life dating of foods**. Westport: Food & Nutrition, 1982. p.359-372.

LAGO, R.C.A.; ANTONIASSI, R.; FREITAS, S.C. Composição centesimal e de aminoácidos de café verde, torrado e de borra de café solúvel. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Resumos...** Vitória: EMBRAPA, 2001. p.104.

LEDE, J.; LI, H.Z.; SOULIGNAC, F.; VILLERMAUX, J. Measurement of solid particle residence time in a cyclone reactor: a comparison of four methods. **Chemical Engineering Process**, London, v.22, n.1, p.215-222, July 1987.

LEDE, J.; LI, H.Z.; VILLERMAUX, J. Le cyclone réacteur: part I: mesure directe de la distribution des temps de séjour de la phase gazeuse: lois d'extrapolation. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v.42, n.1, p.37-55, Feb. 1989.

LINDEN, A.J. ter. Investigations into cyclone dust collector. **Proceedings of the Institute Mech England Journal**, London, v.160, p.233-251, 1949.

MARINS, J.M. Borra de café. In: SEMINÁRIO SOBRE BIOMASSA COMO ENERGIA NA INDÚSTRIA, 1., 1980, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UFRJ, 1980. p.12-14.

MOREIRA, R.F.A.; TRUGO, L.C.; MARIA, C.A.B. de; MATOS, A.G.B.; SANTOS, S.M.; LEITE, J.M.C. Discrimination of brazilian arábica green coffee samples by chlorogenic acid composition. **Archivos Latinoamericanos de Nutricion**, Caracas, v.51, n.1, p.95-99, 2001.

MOHSENIN, N.R. **Physical properties of plant and animal materials**. 2.ed. New York: Gordon, 1970. 103p.

MORI, T.; SUGANUMA, A.; TANAKA, S. On collection efficiency of gas cyclone in coarse particle range. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, Tokyo, v.1, n.1, p.82-86, 1968.

MUJUMDAR, A.S. **Handbook of industrial drying**: principles, classification, and selection of dryers. Singapore: Taylor & Francis, 2006. 1287p.

NACIF, A.P. (Ed.). **Consórcio brasileiro de pesquisa e desenvolvimento do café**: relatório de gestão 1998/2003. Viçosa, MG: UFV, 2003. 148p.

NEBRA, S.A. **Secagem pneumática de bagaço de cana**. 1985. 129f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NEBRA, S.A.; MACEDO, I.C. Pneumatic drying of bagasse. **International Sugar Journal**, Glamorgan, v.91, n.1081, p.3-12, 1989.

OGAWA, A. Mechanical separation process and flow patterns of cyclone dust collectors. **American Society of Mechanical Engineers**, New York, v.50, n.3, p.97-131, Mar. 1997.

PEDRO NETO, C.; FERREIRA, M.C. Secagem de borra de café em leito de jorro. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 1998, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCAR, 1998. p.102.

PERES, A.P. **Estudo experimental da transferência de calor em ciclones**. 1997. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PFLUGER, R.A. Soluble coffee processing. In: MANTELL, C.L. (Ed.). **Solid waster**: origin, collection, processing and disposal. Toronto: Wiley, 1975. p.365-376.

PINTAURO, N.D. Packaging, special products and processes. In: _____. **Coffee solubilization**. Parck Ridger: Commercial Processes and Techniques, 1975. p.232-247.

RAVINDRANATH, R.; YOUSUF ALI KHAN, R.; OBI REDDY, T.; THIRUMALA RAO, S.D.; REDDY, B.R. Composition and characteristics of Indian coffee bean, spent grounds and oil. **Journal of Science and Food Agriculture**, Easton, v.23, n.3, p.307-310, May 1972.

ROBERTSON, G.L. Packaging of beverages. In: _____. **Food packaging principles and practice**. New York: M.Dekker, 1993. p.588-621.

SILVA, M.A. **Estudo da secagem em ciclone**. 1991. 146f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SILVA, M.A.; GODOY, A.L.; NEBRA, S.A. Estudo experimental da variação do perfil de velocidade no ciclone com a concentração de sólidos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 10., 1989, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: COBEM, 1989. v.1, p.351-354.

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

SIVETZ, M.; FOOT, H.E. **Coffee technology**. Westport: AVI, 1963. v.1, 598p.

STAIRMAND, C.J. Pressure drop in cyclone separators. **Engineering**, London, v.168, p.409-412, 1949.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying**: principles, applications and design. New York: Gordon and Breach Science, 1986. v.3, 98p.

TANGO, J.S. Utilização industrial do café e dos seus subprodutos. **Boletim do ITAL**, Campinas, v.28, n.2, p.48-73, 1971.

TURATTI, J.M. Extração e caracterização de óleo de café. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. **Anais...** Vitória: UFES, 2001. p.1533-1539.

VIOTTO, L.A.; MENEGALLI, F.C. Secagem de borra de café em secador pneumático. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTOS EM MEIOS POROSOS, 17., 1991, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 1991. 1 CD-ROM.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. In: _____. **Progress in energy and combustion science**. Hamburg: Kenya, 2000. p.1-27.

YEN, S.C.; LU, W.M.; SHUNG, S.C. Gás-solid heat transfer in a gas cyclone. **Journal of Chinese Institute of Chemical Engineering**, Beijing, v.21, n.4, p.197-206, Oct. 1990.

YUU, S.; JOTAKI, T.; TOMITA, Y.; YOSHIDA, K. The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone. **Chemical Engineering Science**, New York, v.33, n.6, p.1573-1580, 1978.