

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, SECAGEM
(FRITURA DE IMERSÃO E LEITO FIXO) E
ISOTERMA DE DESSORÇÃO DO BAGAÇO
DE CANA**

JOYCE MARIA GOMES DA COSTA

2008

JOYCE MARIA GOMES DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, SECAGEM (FRITURA DE IMERSÃO
E LEITO FIXO) E ISOTERMA DE DESSORÇÃO DO BAGAÇO DE
CANA**

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

Orientador
Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

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

Costa, Joyce Maria Gomes da.

Caracterização física, secagem (fritura de imersão e leito fixo) e
isoterma de dessorção do bagaço de cana / Joyce Maria Gomes da Costa .
-- Lavras : UFLA, 2008.

100 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Jefferson Luiz Gomes Corrêa.

Bibliografia.

1. Energia. 2. Biomassa . 3. Aproveitamento de resíduos. 4.
Transferência de calor. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD-662.88

JOYCE MARIA GOMES DA COSTA

**CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, SECAGEM (FRITURA DE
IMERSÃO E LEITO FIXO) E ISOTERMA DE DESSORÇÃO
DO BAGAÇO DE CANA**

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

APROVADA em 15 de Agosto de 2008.

Prof. Dra. Soraia Vilela Borges

UFLA

Profa. Dra. Mônica Elisabeth Torres Prado

UFLA

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

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2008

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação primeiramente à Deus. Sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais, Jayme e Imaculada, e minhas irmãs, Janaína e Viviane

Aos meus orientadores e aos meus verdadeiros amigos.

Em memória da minha avó Maria do Rosário, e à Carla Cristina de quem sempre lembrarei com muito carinho.

*“Recordar o bem recebido é fazer-se merecedor
de tudo quanto amanhã possa nos ser oferecido”*

González Pecotche

AGRADECIMENTOS

Antes de começar a dar nomes aos vários autores que contribuíram para a realização deste trabalho, agradeço, primeiramente, a Deus, por estar sempre presente em minha vida e por tornar tudo possível.

Antes de tudo, confesso que confeccionar estes agradecimentos não foi uma tarefa fácil, pois tive receio de cometer injustiças e, por esquecimento, não mencionar aqui nomes de pessoas que também contribuíram para este trabalho.

Há dois anos me arrisquei em uma nova cidade e, durante este período, houve muitos novos acontecimentos, entre eles mudança de hábitos, novas amizades, convívio com pessoas de diversas culturas e costumes, com os quais me identifiquei, ou não, e também obstáculos, impedimentos e decepções. Mas, hoje, estou certa de que serviram como aprendizagem e experiência, e com êxito consegui superar, com a ajuda de Deus e de tantas pessoas que têm a minha eterna gratidão. Entre estas pessoas destacam-se os meus pais, Jayme e Imaculada, que, pela existência, amor, ajuda e apoio incondicionais, foram os principais responsáveis por mais uma conquista.

As minhas irmãs, Janaína e Viviane, eternas companheiras, amigas verdadeiras que nunca me dispensaram apoio, carinho e atenção. Aos meus cunhados, Cleber e Maurinho, pela amizade e carinho.

Ao meu orientador, professor Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa, pela oportunidade oferecida, paciência, orientação e, principalmente, pelo bom convívio durante estes dois anos de trabalho. Com ele tive a oportunidade de enriquecer meu conhecimento com suas argumentações científicas, sugestões e dicas de pesquisa. Agradeço pelas intermináveis horas de leitura e correções de artigos, pela dedicação e, principalmente, pela atenção que sempre me dispensou. Suas correções foram muito úteis e sempre bem-vindas. Além de tudo, agradeço pela amizade e confiança. Agradeço também a Raquel, que

sempre me recebeu muito bem. Muito obrigada por tudo!

A minha co-orientadora, prof. Dra. Soraia Vilela Borges, pela amizade, conselhos, ensinamentos e por nunca ter me negado ajuda quando eu mais precisei, transmitindo sua experiência e incentivo, por meio de suas palavras e conselhos que sempre foram suficientes para ter força e continuar seguindo com persistência até alcançar meu objetivo. Obrigada por tudo, sobretudo pela confiança que sempre depositou em mim. Você tem minha eterna gratidão.

Ao prof. Dr. José Guilherme, que tanto contribuiu com seu apoio, carinho, amizade. Seus ensinamentos, que se iniciaram desde a graduação, foram sempre válidos e serviram de alicerce para chegar até aqui. Também agradeço à Olga, uma pessoa maravilhosa que também conquistou minha amizade por tanto carinho e atenção.

Ao Grupo Dinâmico: Milene, Gustavo, Daniel, Renan, Evandro, Viviane, Bruno, Carla (*in memoriam*) e Fabiano. Todos vocês foram muito importantes para a concretização deste trabalho pela enorme contribuição. As dicas, o apoio e a dedicação foram essenciais. Obrigada pelos vários momentos prazerosos durante o experimento. O ótimo convívio que tivemos consolidou em amizades que serão para mim eternas.

À Dra. Sílvia Nebra e ao prof. Dr. Flávio Borém, pela oportunidade e grande contribuição. À profa. Joelma, pelo apoio e atenção, especialmente na fase final.

Ao DEX, em especial a Rosi (a todos da república Bananinha), Patrícia, Nádia e aos professores Renato, Marcelo e Augusto, pela ajuda nas análises estatísticas.

Aos amigos de Lavras: Tati (BH-Lavras), Dri, Marry e Abel. Felizes são as pessoas que, como eu, tiveram a oportunidade de conhecê-los.

À “Mansão dos Estudantes”, principalmente Zilda e Rosi. Ao trio Neto, Fael e Thi. Obrigada pelos vários momentos felizes que compartilhamos. A Laurinha e André. Valeu!

Aos amigos de BH que sempre torcem e se preocupam comigo: Raquel, Jonas, Bárbara e Síntia. Amo muito vocês!

A Danizinha, por todos os momentos divertidos que passamos juntas! Obrigada pelo companheirismo, amizade, paciência e correções. A Lu que, com pouco tempo de convívio, me ajudou nesta etapa final.

Às Usinas Luciânia e Ester, e ao restaurante da UFLA, por cederem, respectivamente, o bagaço de cana e o óleo reutilizado, com os quais foram realizados os experimentos relativos a este trabalho.

Ao DCA e, em especial, à Dra. Mônica pelas sugestões e correções; aos funcionários do DCA (Tina e Creusa), do DEG (Eder, José Henrique e Eduardo), do DZO (Prof. José Cleto) e do DEF (prof. Paulo Trugillo). Obrigada pela oportunidade de realizar os testes aqui reportados. Ao Johnson, pela parceria e apoio.

À Fapemig (Processo 2021305 e Processo CAG APQ-3415-3.12/07), e à Finep (Processo 01-06-004700), pelo suporte financeiro.

*“Eu não sei qual o segredo do sucesso,
mas o segredo do fracasso
é tentar agradar
a toda a gente.”
Bill Cosby*

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	iii
LISTA DE FIGURAS.....	iv
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Cana-de-açúcar	5
2.1.1 Bagaço de cana	8
2.2 Secagem.....	12
2.2.1 Teor de água.....	13
2.3 Secagem: fritura por imersão.....	15
2.3.1 Meio de fritura	17
2.3.2 Transferência de calor e massa através da fritura	19
2.4 Secagem: Leito Fixo	20
2.5 Isotermas de sorção de bagaço de cana.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.2 Caracterização do Material.....	26
3.2.1 Procedência.....	26
3.2.2 Distribuição granulométrica.....	27
3.2.3 Formação de Grumos.....	27
3.2.4 Percentual de fibras e pó.....	28
3.3 Fritura por Imersão	30

3.3 Planejamento Experimental	38
3.4.1 Primeira Fritura de imersão	38
3.4.2 Segunda Fritura de imersão	39
3.4.3 Terceira Fritura de imersão.....	39
3.5 Secagem em leito fixo.....	39
3.6 Isoterma de Dessorção	41
3.7 Modelagem Matemática	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1 Caracterização do bagaço de cana	47
4.1.1 Análise granulométrica	47
4.1.2 Formação de grumos.....	49
4.1.3 Percentual de fibras e pó.....	51
4.1.4 Densidade aparente	54
4.1.4.1 Densidade aparente com separação granulométrica	54
4.1.4.2 Densidade aparente sem separação granulométrica.....	56
4.2 Fritura por imersão.....	57
4.2.1 Primeira fritura de imersão	57
4.2.2 Segunda fritura de imersão	64
4.2.2.1 Teor de água.....	64
4.2.2.2 Teor de óleo	66
4.2.2.3 Poder calorífico.....	68
4.2.3 Terceira fritura de imersão.....	71
4.2.3.1 Teor de água.....	71
4.2.3.2 Teor de óleo	75
4.3 Secagem por leito fixo	77
4.4 Isoterma de dessorção	82
5 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

LISTA DE SÍMBOLOS

d	diâmetro de uma partícula esférica	[mm]
Fc	valor facultado	[-]
FV	fonte de variação	[-]
GL	grau de Liberdade	[-]
m	massa	[kg]
Pr	área calculada	[-]
PA	passante acumulado	[%]
PR	passante retido	[g]
PCI	poder calorífico inferior	[MJ/kg]
PCS	poder calorífico superior	[MJ/kg]
QM	quadrado médio	[-]
SE	erro padrão da estimativa	[-]
SQ	soma de quadrados	[-]
T	temperatura	[°C]
t	tempo	[s]
v	volume	[m ³]
x	fração mássica	[-]
X _a '	teor de água do sólido	[-]
X _o	teor de óleo do sólido	[-]
X _i	teor de água inicial	[-]
X _f	teor de água final	[-]
ρ	densidade	[kg m ⁻³]
φ	umidade relativa	[%]

Subscritos:

b.s.	base seca	[-]
b.u.	base úmida	[-]
p	partícula	[-]
pe	peneira	[-]

Superescritos:

—	médio	[-]
---	-------	-----

LISTA DE TABELAS

		Página
TABELA 1	Distribuição granulométrica do bagaço de cana	50
TABELA 2	Análise granulométrica do bagaço de cana para análise de fibras e pó	52
TABELA 3	Fração mássica para os dois tipos de partículas de bagaço	53
TABELA 4	Distribuição granulométrica do bagaço de cana com teor de água de 62% b.u. (Usina Luciânia)	58
TABELA 5	Análise de Variância do teor de água do bagaço de cana (Variáveis: tipo de óleo-tamanho-tempo)	63
TABELA 6	Análise de Variância do teor de água do bagaço de cana (Variáveis: temperatura-tempo)	65
TABELA 7	PCI e Teor de água do bagaço de cana caracterizados por diversos autores	70
TABELA 8	Distribuição granulométrica do bagaço de cana	72
TABELA 9	Análise de Variância do teor de água do bagaço de cana (Variáveis: temperatura-tamanho-tempo)	73
TABELA 10	Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de secagem de bagaço de cana em leito fixo nas temperaturas de 50; 60 e 70 °C	78
TABELA 11	Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de isoterma de dessecção do bagaço de cana à 50 °C	85

LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 1	Usinas termelétricas à biomassa em operação e potência instalada por estado – situação em setembro de 2003.	7
FIGURA 2	Estrutura geral do bagaço de cana-de-açúcar.	9
FIGURA 3	Esquema do funcionamento do terno de moenda.	11
FIGURA 4	Princípio da secagem de bagaço de cana através dos gases de exaustão da caldeira.	13
FIGURA 5	Fatores interferentes ao processo de fritura.	17
FIGURA 6	Representação dos diferentes períodos de secagem.	21
FIGURA 7	Fluxograma do processo de Fritura de Bagaço de cana.	33
FIGURA 8	Montagem experimental do processo de fritura por imersão.	34
FIGURA 9	Unidade Condicionadora de Ar de Laboratório.	42
FIGURA 10	Câmara Condicionadora de Ar	42
FIGURA 11	Distribuição granulométrica do bagaço de cana da Usina Luciânia obtida com teor de água de 5,00% (b.u.).	48
FIGURA 12	Distribuição granulométrica do bagaço de cana da Usina Ester obtida com teor de água de 6,30% (b.u.).	48

Lista de Figuras (... Continua...)

LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 13	Influência do teor de água no diâmetro médio das partículas.	51
FIGURA 14	Densidade Aparente das partículas de pó e fibras do bagaço de cana.	54
FIGURA 15	Densidade Aparente do bagaço de cana em função do teor de água.	57
FIGURA 16	Curva de secagem de bagaço de cana por fritura em dimensões diferentes das partículas de bagaço.	59
FIGURA 17	Teor de óleo durante a fritura de bagaço de cana com dimensões de 3,55 e 0,90 mm.	60
FIGURA 18	Óleo incorporado em função do teor de água do bagaço com dimensões de 3,55 e 0,90 mm	61
FIGURA 19	Cinética de secagem para a fritura de imersão do bagaço de cana.	66
FIGURA 20	Curva de incorporação de óleo na secagem de bagaço de cana por fritura nas temperaturas de 110°C e 140°C.	67
FIGURA 21	Curva de incorporação de óleo em função do teor de água do bagaço de cana nas temperaturas de 110°C e 140°C – Método Soxhlet.	68

Lista de Figuras (... Continua...)

LISTA DE FIGURAS

		Página
FIGURA 22	Variação do poder calorífico do bagaço de cana durante a fritura.	69
FIGURA 23	Cinética de secagem para a fritura por imersão do bagaço de cana.	74
FIGURA 24	Influência do teor de água do bagaço de cana em função das dimensões de bagaço de cana.	75
FIGURA 25	Curva de incorporação de óleo na secagem de bagaço de cana por fritura na temperatura de 130°C em tamanhos diferentes das partículas de bagaço.	76
FIGURA 26	Curva de incorporação de óleo na secagem de bagaço de cana por fritura na temperatura de 160°C em tamanhos diferentes das partículas de bagaço.	77
FIGURA 27	Valores experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem de bagaço de cana nas temperaturas de 50; 60 e 70°C.	82
FIGURA 28	Isoterma de dessorção de bagaço de cana à 50°C.	83

RESUMO

COSTA, Joyce Maria Gomes da. **Caracterização física, secagem (Fritura de imersão e leito fixo) e isoterma de dessorção do bagaço de cana.** 2007. 100 p. Dissertação (Mestrado em Ciências dos alimentos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG*.

Este trabalho objetivou caracterizar o bagaço de cana procedente de duas usinas sucroalcooleiras; obter curvas de cinéticas de secagem do bagaço em dois métodos diferentes: fluxo cruzado em leito fixo e secagem por fritura de imersão; e obter isoterma de dessorção do bagaço de cana. A caracterização do bagaço foi feita através de análises granulométricas com avaliação do percentual de fibras e pó, formação de grumos e densidade aparente. O bagaço de cana úmido foi seco por fritura com variação do tamanho das partículas, tipo de óleo, tempo e temperatura. Foram avaliadas cinéticas de teor de água, teor de óleo incorporado durante o processo de fritura e valor energético do bagaço frito. A redução do teor de água e a incorporação de óleo pelo bagaço mostraram-se dependentes do tamanho das partículas, e a incorporação de óleo durante o processo de fritura apresentou-se inversamente proporcional ao teor de água do bagaço. Houve um aumento do poder calorífico do bagaço de cana frito, atingindo valores na ordem de 38,86 MJ/kg. A secagem em leito fixo foi realizada com ar à 50; 60 e 70 °C e 0,9 m.s⁻¹. A isoterma de dessorção (25 a 75% de umidade relativa) foi obtida à 50 °C. Os resultados obtidos pela secagem em leito fixo e isoterma de dessorção foram ajustados com diversos modelos da literatura. Os modelos com melhores ajustes foram o de Page (1949) para a cinética de secagem em leito fixo e o de Jaafar & Michalowski (1990) para a isoterma de dessorção.

Palavras-chaves: Energia, biomassa, aproveitamento de resíduos, transferência de calor e massa.

* Comitê de Orientação: Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa – UFLA

** Co-orientadores: Dra. Soraia Vilela Borges – UFLA

Dr. Flávio Meira Borém – UFLA

ABSTRACT

COSTA, Joyce Maria Gomes da. **Physical characterization, Drying (Immersion Frying and bed fixed) and Desorption isotherm of the sugar cane bagasse.** 2007. 100 p. Dissertation (Master Program in Food Science) – Federal University of Lavras, Lavras, MG*.

This work objectified characterize the bagasse of sugar cane from two sugar-alcohol-industry; obtained drying kinetic curves of the bagasse in two different methods: cross flow in bed fixed and drying of immersion frying; obtained desorption of isotherm of the sugar cane bagasse. The characterization of the bagasse was made through grain sized analyses with evaluation of the percentage of fibres and dust, formation of grumos and apparent density. The moisture bagasse of sugar cane was dry for frying with variation of the size of particles, type of oil, time and temperature. The reduction of the moisture content and the oil text incorporated for the bagasse had revealed dependents of the size of particles, and the oil incorporation during the process frying was presented inversely proportional to the moisture content of the bagasse. It had an increase of the calorific power of the sugar cane bagasse I fry, reaching values in the order of 38,86 MJ/kg. They had been evaluated kinetic of moisture content, oil text incorporated during the frying process and energy value of the fry bagasse. The drying in bed fixed was make through with air to 50; 60 and 70 °C and 0.9 m s⁻¹. The desorption isotherm (25 to 75% of relative humidity) obtained at 50 °C. Data of desorption isotherm and fixed bed drying desorption were fit with several models of literature. The models with better adjustments were model of Page (1949) for kinetic of drying in fixed bed, and of Jaafar & Michalowski (1990) for the desorption isotherm.

Key-Words: Energy, biomass, waste use, heat and mass transfer.

*Guidance Committee: Dr. Jefferson Luiz Gomes Corrêa – UFLA

**Co-Adviser: Dra. Soraia Vilela Borges – UFLA
Dr. Flávio Meira Borém – UFLA

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um país tropical e em desenvolvimento, com abundantes recursos de biomassa, dentre estes, os advindos da cana-de-açúcar, primariamente, produzida para a obtenção de açúcar e álcool. O país é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, isoladamente o maior produtor de açúcar e de álcool e o maior exportador mundial de açúcar (Rípoli et al., 2000).

O sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é um dos mais antigos, está ligado aos principais eventos histórico, e é de enorme importância para o país. A partir dos anos 1970, este sistema passou por importante transformação, deixando de ser exclusivamente voltado para o setor de alimentos, para destinar-se ao setor energético, por meio do Proálcool (Waack et al., 1998).

Os principais produtos gerados pelo sistema agroindustrial da cana-de-açúcar são o açúcar, o álcool e outros subprodutos, como o bagaço de cana (material fibroso gerado após a moagem da cana), que corresponde a, aproximadamente, 30% da cana moída e tem grande importância, do ponto de vista energético, para o setor sucroalcooleiro.

Grande parte do bagaço produzido é utilizada pelas próprias usinas no aquecimento de caldeiras e na geração de energia elétrica. Sua utilização como combustível ocorre nas unidades geradoras de vapor (caldeiras) para movimentar turbinas e gerar energia utilizada na moagem e para eventual retorno à rede pública de distribuição.

Assim, como fonte alternativa mais adequada para a resolução da questão energética no Brasil, o bagaço de cana deixou de ser visto como resíduo e passou a ser utilizado como um combustível importante, devido ao baixo impacto ambiental.

Devido à grande quantidade produzida e às suas características físicas e químicas, esse material encontra um vasto campo de utilização, além do emprego como fonte energética na produção de ração animal, na indústria química, na fabricação de papel, papelão e aglomerados, como material alternativo na construção civil, na produção de biomassa microbiana e como adsorvente de contaminantes orgânicos (Silva et al., 2007).

A situação atual da maioria das usinas de açúcar e álcool do Brasil, especialmente no estado de São Paulo, é de auto-suficiência do consumo de energia dentro da indústria. Ou seja, todos os acionamentos mecânicos dos equipamentos, iluminação e bombeamentos nos processos de produção são supridos pelas turbinas da própria usina e toda a demanda do processo no aquecimento do caldo, evaporação, cozimento e destilação é suprida pelo vapor de escape das turbinas (Ramos et al., 2003).

Até o início da década de 1980, a ineficiência energética dos sistemas da cogeração era evidente, começando pela baixa eficiência das caldeiras, pois o bagaço era considerado um rejeito indesejado no processo de produção de açúcar e álcool. A ineficiência tecnológica, tanto do ponto de vista da transferência de calor como dos sistemas de recuperação e aproveitamento efetivo do vapor, também gerava um consumo exagerado de vapor no processo.

Tendo em vista o grande excedente de bagaço produzido pelo setor sucroalcooleiro, o processo de cogeração passou a ser considerado uma alternativa complementar em função da significativa quantidade de energia que pode ser injetada na rede elétrica. Essa demanda motivou as usinas a investirem em tecnologias mais eficientes na utilização do bagaço como combustível.

Paiva et al. (1998) e Souza-Santos et al.(1998) estudaram a eficiência energética do processo de queima do bagaço de cana e observaram que, para se obter maior eficiência no processo de queima, é necessário que o bagaço tenha um teor de umidade entre 20% a 30% em base úmida (b.u.). De forma geral, este

produto sai das moendas com 50% de umidade (b.u.). Do ponto de vista energético, a umidade contida no bagaço após sua extração limita a eficiência das caldeiras, sendo necessário excesso de ar que propicia a perda de calor sensível através dos gases de exaustão (MIC – STI, citado por Barbosa, 1992).

Quando se armazena o bagaço, o açúcar residual e o alto teor de umidade propiciam o crescimento de microrganismos e estimula uma fermentação exotérmica que afeta diretamente as características do material, deteriorando-o e, muitas vezes, provocando uma combustão espontânea não desejável (Pellegrini, 2002).

O bagaço de cana, portanto, necessita passar por um beneficiamento que viabilize sua estocagem e, conseqüentemente, melhore o seu aproveitamento como insumo energético ou como matéria-prima industrial.

Visando obter uma melhora no processo de reaproveitamento deste subproduto como combustível, a secagem proporcionará maior eficiência de queima do bagaço, importante, sobretudo, nos picos de maior demanda. De acordo com Pellegrini (2002), existem diversas formas de secagem de bagaço de cana. Entre os possíveis sistemas, podem-se relacionar os secadores que utilizam os gases de exaustão de caldeiras como meio de aquecimento; os secadores munidos de gerador autônomo de energia (geralmente, queima de resíduos da biomassa) e o sistema misto, o qual utiliza gases à baixa temperatura (130°-150°C) que recebem uma complementação por parte de uma fonte autônoma de energia, propiciando a elevação da temperatura dos mesmos.

Nas usinas, o método normalmente utilizado para secagem do bagaço é pelo contato direto com os gases de escape da caldeira. Destaca-se a utilização do secador pneumático e do secador ciclônico para secagem de bagaço de cana, conforme relatado por Sosa-Arno et al.(2006) e por Corrêa (2003) que apresentaram uma revisão sobre secagem de bagaço de cana por meio dos equipamentos descritos.

Dentre as diversas formas de secagem, ressalta-se a fritura por imersão como um método alternativo, no qual o produto é imerso em um banho de óleo a uma temperatura superior ao ponto de ebulição da água, normalmente entre 150°-200°C (Silva, 2003). Trata-se de uma operação unitária bastante utilizada para a secagem de alimentos (Varela et al., 1988).

Neste processo, o óleo quente é utilizado como meio de transferência de calor para produtos diversos (Oreopoulou et al., 2006). Recentemente, foram registrados métodos alternativos para a secagem de resíduos como o lodo e o bagaço de cana, aos quais utilizam a fritura por imersão (Silva et al., 2005; Corrêa & Rudolph, 2007).

Assim, este trabalho foi realizado com os objetivos de:

- caracterizar as propriedades físicas, como teor de água, granulometria, densidade aparente, percentual de fibras e pó, formação de grumos e valor energético do bagaço de cana procedente de usinas sucroalcooleiras;

- empregar a secagem por fritura como um método alternativo para a secagem de bagaço de cana, que apresenta a vantagem de incorporação de óleo, com geração de um material de grande poder calorífico. Nesta etapa foram testados o tipo de óleo para fritura, a influência da temperatura do óleo, o tempo de imersão e o tamanho das partículas de bagaço para as variáveis independentes: teor de água final, incorporação de óleo e poder calorífico do material frito;

- obter isotermas de dessecção e cinéticas de secagem do bagaço de cana em um secador do tipo leito fixo e ajustar os dados experimentais com diversos modelos advindos da literatura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar tem quase 500 anos de história neste país. Nos últimos 30 anos, graças aos empreendedores do setor sucroalcooleiro, a atividade tomou o leme da eficiência no universo da agroenergia, deixando de ser apenas uma planta alimentícia para se tornar um novo paradigma da energia limpa e renovável, na área dos combustíveis e da eletricidade (Jank, 2007).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido por Índia e Austrália (UNICA, 2007), cuja produção é uma das atividades econômicas mais importantes do país, devido, principalmente, à sua elevada eficiência e competitividade. Neste setor encontram-se as usinas sucroalcooleiras que, atualmente, utilizam o bagaço de cana como combustível num sistema de cogeração (Ensinas et al., 2006).

O processamento industrial da cana tem potencial para dar origem a uma série de matérias-primas para as indústrias de transformação, química e biotecnológica. O desenvolvimento dessas potencialidades tem sido aprimorado em diversos centros de pesquisa e desenvolvimento do Brasil e do exterior. Além disso, oportunidades surgem por conta do aumento da demanda por combustíveis ecologicamente corretos e pelo apelo ambiental gerado pela participação das usinas no mercado de crédito de carbono, por conta da geração de energia a partir do bagaço (Monteiro et al., 2005).

A energia da biomassa, quando produzida de forma eficiente e sustentável, traz inúmeros benefícios ambientais e sociais, em comparação com os combustíveis fósseis. Esses benefícios incluem o melhor manejo da terra, a criação de empregos, o uso de áreas agrícolas excedentes nos países

industrializados, o fornecimento de vetores energéticos modernos, a redução de níveis de emissão de CO₂ e o controle de resíduos (Waack et al., 1998).

Junqueira (2006) destaca que, atualmente, o Brasil é líder em projetos de créditos de carbono registrados na ONU. A grande maioria dos programas brasileiros de redução das emissões de carbono envolve projetos de geração de energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

O Protocolo de Kyoto determinou a redução, por parte dos países desenvolvidos, das emanações de CO₂ em 5%, em relação aos níveis de poluição de 1990. Esse acordo entrou em vigor em 2005, visando estabelecer medidas concretas na luta contra o aquecimento global do planeta, no período entre 2008 e 2012 (Oliveira, 2007).

Os produtos energéticos da cana (etanol e bagaço) têm contribuído largamente para a redução das emissões de gases que contribuem para o agravamento do efeito estufa no Brasil, por meio da substituição de combustíveis fósseis, ou seja, gasolina e óleo combustível (NAE, 2004)

Dessa forma, o sistema agroindustrial da cana-de-açúcar atravessa, desde 2002, um período de grande dinamismo de seu processo de crescimento, que faz lembrar o período áureo do Proálcool (1974-1983).

De acordo com a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA, 2008), atualmente, há mais de 320 unidades de processamento de cana-de-açúcar que operam no país. Geograficamente, a distribuição das usinas acompanha a concentração da produção de cana-de-açúcar. Na região centro-sul, o estado de São Paulo se destaca como maior produtor nacional, com aproximadamente 60% da produção, seguido do Paraná e de Minas Gerais. Na região norte-nordeste, os principais produtores são Alagoas, Pernambuco e Paraíba, respectivamente (Oliveira, 2007). No mapa da Figura 1 observam-se as usinas termelétricas à biomassa em operação e em potência instalada por estado no Brasil.

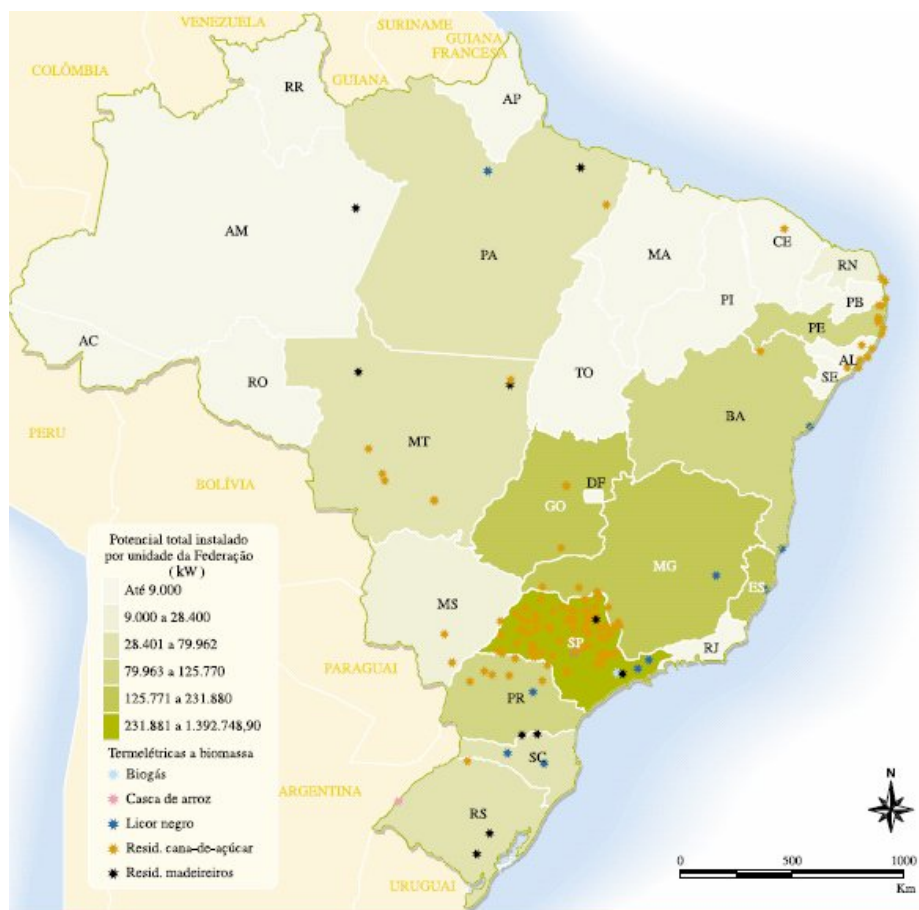


FIGURA 1: Usinas termelétricas movidas à biomassa em operação e potência instalada por estado – situação em setembro de 2003.

Fonte: Elaborado com a base em dados da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, banco de informações de geração – BIG. 2003.

Segundo o Relatório de Produção Agrícola do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2007, a cultura da cana-de-açúcar cresceu 7% em relação ao ano anterior. Esse crescimento, segundo IBGE, é resultado do surgimento de novas áreas plantadas. O estado de São Paulo, cuja produção de cana é mais relevante, responde por cerca de 57% de toda a produção nacional. De acordo com o relatório, em 2007, São Paulo cresceu 5,3% em relação ao obtido em 2006. Justifica-se esse incremento, sobretudo, pelo lado do consumo interno e pelas expectativas do crescimento da demanda do mercado mundial.

2.1.1 Bagaço de cana

O bagaço é um subproduto do processamento da cana na indústria sucroalcooleira e a fonte energética da maior importância para essa indústria. É constituído de água, fibras, principalmente celulose e de pequenas quantidades de matérias em solução na água, água esta proveniente da embebição e do caldo, constituído por açúcar e impurezas (Barbosa, 1992).

Sendo um material fibroso, de baixa densidade, com ampla variedade de tamanhos e uma umidade de 50% (em base úmida), torna-se de grande interesse caracterizar as propriedades das partículas de bagaço, devido à necessidade de aplicação de procedimentos para o desenho de transportadores, alimentadores, sistemas de secagem e sistemas de combustão, entre outros aspectos (Pietro, 2003).

O bagaço de cana caracteriza-se por apresentar partículas classificadas como fibras e pó. As fibras correspondem às partículas com formato próximo de um cilindro e de um prisma elíptico e o pó às partículas extremamente irregulares, com formato semelhante a um disco ou a uma esfera (Hugot, 1964; Nebra & Macedo, 1988; Corrêa, 2003). O bagaço apresenta, também, propriedades típicas, como entrelaçamento das fibras, presença de pó coesivo e larga distribuição granulométrica (Brossard et al., 2000).

A composição do bagaço e suas características variam amplamente: conteúdo de água com 45% a 55%, podendo ser ainda maior, dependendo do método de extração do caldo; conteúdo de fibra (fração sólida orgânica insolúvel em água presente no talo da cana), de 40% a 50%; sacarose, 4% a 5%; açúcares redutores 0,5% e conteúdo de cinzas não dissolvidas, de 1% a 1,5% (IBIPTI, 1999).

Quimicamente, o bagaço de cana é composto por celulose, hemicelulose e lignina, principais polímeros naturais e pequenas quantidades de outros compostos, classificados como componentes estranhos (ICIDCA-GEPLACEA-PNUD, 1990). Na Figura 2 é apresentada a estrutura geral do bagaço de cana, com os seus respectivos grupos químicos.

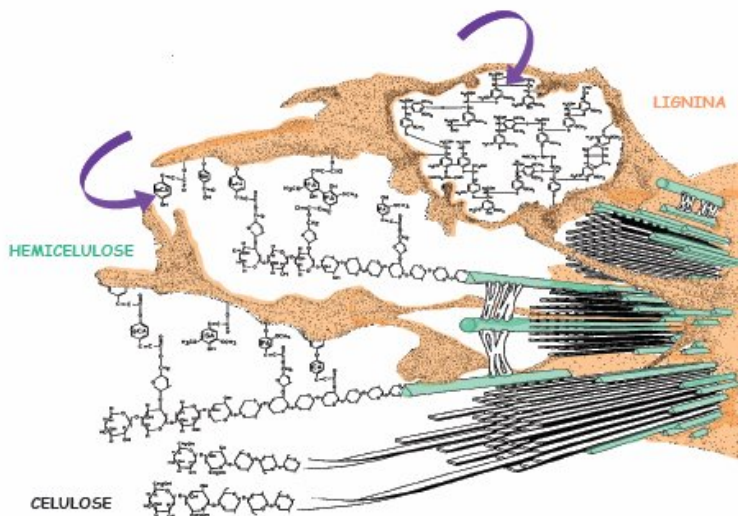


FIGURA 2: Estrutura geral do bagaço de cana-de-açúcar (Mohan, 2005).

A composição do bagaço de cana varia de acordo com a variedade da cana, seu grau de maturação, método de colheita e o processo e eficiência da extração (Barbosa, 1992).

Os métodos mais utilizados para a extração do caldo são a extração por moendas e a extração por difusão. Na grande maioria das usinas em todo o mundo, a extração do açúcar de cana é efetuada por meio de moendas (Roca et al., 2006), um mecanismo estritamente volumétrico que consiste em deslocar o caldo contido na cana. Este deslocamento é conseguido fazendo a cana passar entre dois rolos, submetidos à determinada pressão e rotação, sendo o volume gerado menor que o volume da cana. Este processo de extração é determinante para a produção de um bagaço final em condições de propiciar uma queima rápida nas caldeiras (COPERSUCAR, 2008).

Cada conjunto de rolos de moenda constitui um terno de moenda. O número de ternos utilizados no processo de moagem varia de quatro a sete e cada um deles é formado por três rolos principais, denominados rolo de entrada, rolo superior e rolo de saída. Normalmente, as moendas contam com um quarto rolo, denominado rolo de pressão, que melhora a eficiência de alimentação. A carga que atua na camada de bagaço é transmitida por um sistema hidráulico que atua no rolo superior (COPERSUCAR, 2008). Um esquema do funcionamento do terno de uma moenda é mostrado na Figura 3.

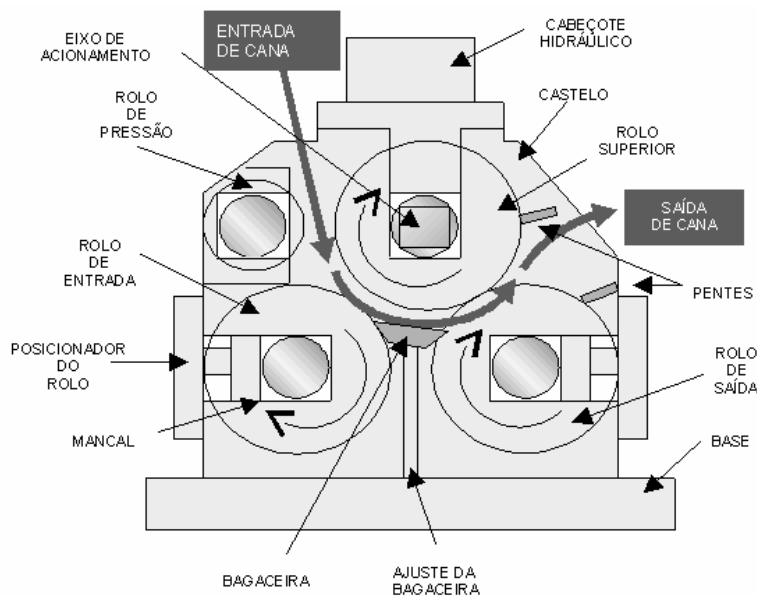


FIGURA 3: Esquema do funcionamento do terno de moenda.

A partir da quantidade de caldo extraída do bagaço após cada terno, têm-se a quantidade ou a porcentagem de fibra no bagaço (Jais, 2007). Quanto maior o número de ternos, maior a eficiência da extração da moenda (Marques, 2008).

Portanto, a variedade, o tipo de preparo, bem como as características do processo de extração são fatores determinantes das propriedades físicas do bagaço de cana e essenciais para o projeto e o dimensionamento de equipamentos industriais, tais como caldeiras, pré-ar, economizador, secador de bagaço e gaseificador.

De acordo com Hugot (1964), mesmo submetendo a pressões consideráveis e repetidas, nunca é possível extrair a totalidade de seu caldo. Obtém-se um bagaço com conteúdo de água (ou teor de água) mínimo de 45% a 50% (b.u.), em geral, nas melhores condições, de 40% (b.u.).

Dessa forma, para extrair a maior quantidade possível do açúcar no bagaço, recorre-se ao sistema de embebição, que consiste em adicionar água ao bagaço para diluir o caldo remanescente e aumentar a extração da sacarose após este ser submetido pela última moenda.

Devido a este processo de embebição, torna-se necessário empregar o processo de secagem após a etapa de lavagem do bagaço, com a finalidade de aumentar a eficiência de sua queima. Além de proporcionar o aumento da eficiência, a secagem também possui outras vantagens, como facilitar o manuseio, o transporte, o armazenamento e a conservação do bagaço.

2.2 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.

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 (Mujumdar, 2006; Brooker et al., 1974).

Em usinas sucroalcooleiras, normalmente, a secagem do bagaço de cana é feita utilizando-se a energia contida na corrente de gases de exaustão das caldeiras como meio de aquecimento. Esta secagem é indicada para armazenar o insumo durante o período de entressafra ou para quando é usado como matéria-prima em outras indústrias, tais como de papel e celulose, alimentícias e de

bebidas e, principalmente, para a otimização energética da caldeira (IBICT, 2008).

Segundo Strumillo & Kudra, (1986), os materiais úmidos possuem diferentes propriedades físicas, químicas, mecânicas e estruturais, parâmetros que podem influenciar significativamente no processo de secagem. Porém, na prática, o mais importante são as propriedades mecânica e estrutural e o tipo de água presente no material.

O aproveitamento da energia extraída das caldeiras através dos gases de exaustão para secagem de biocombustíveis está ilustrado na Figura 4.

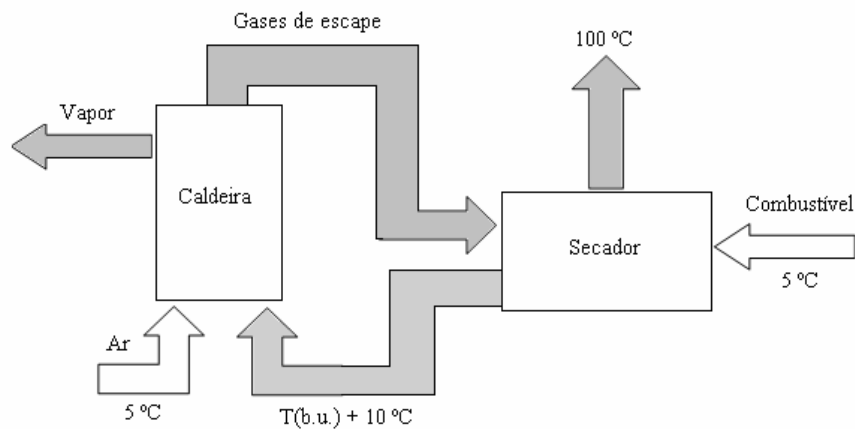


FIGURA 4: Princípio da secagem de bagaço de cana através dos gases de exaustão da caldeira (Wimmerstedt, 2006).

2.2.1 Teor de água

Segundo Strumillo e Kudra (1986), Mujumdar (2006) e Borém et al. (2008), existem quatro tipos de água que diferem pela natureza das ligações

químicas e físicas existentes entre os compostos e a molécula de água, e da predominância de compostos polares e apolares. Esses tipos são definidos como:

- ❖ água de constituição, que é removida por reações de oxidação da molécula a ela ligada, uma vez que ocorrem somente ligações covalentes;
- ❖ água adsorvida em moléculas e macromoléculas através de forças de Van der Waals e ligações de hidrogênio. Durante a secagem, essa é parcialmente retirada, dependendo das características do material e das condições de secagem;
- ❖ água solvente, encontrada sob tensão osmótica, que retém diferentes substâncias dissolvidas nas células por meio de um grande número de ligações íon-dipolo;
- ❖ água absorvida, constituída pela água de impregnação. Esse tipo de água ocorre nos capilares e nos espaços vazios, sendo retirada mecanicamente pelas forças capilares; é bastante móvel e facilmente removida pelo processo de secagem.

Se a água não estiver ligada (ligação física e ou química) às estruturas dos sólidos, é caracterizada como água livre e a energia envolvida no processo será correspondente ao calor latente de vaporização. E, se a água estiver ligada, a energia necessária para a sua evaporação será maior (Park et al., 2001).

De acordo com Mujumdar (2006), todo conteúdo de água presente em um material não higroscópico corresponde à água livre. Neste caso, uma dada temperatura de secagem poderá ser suficiente para remover tanto a água ligada quanto a água livre de um material úmido.

Para o bagaço de cana, pode-se dizer que a água presente refere-se à água absorvida ou à água superficial, pois ela é proveniente da lavagem do bagaço após a extração do caldo. Portanto, a remoção deste tipo de água torna-se

fácil quando se utilizam os fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa durante a secagem.

2.3 Secagem: fritura por imersão

Dentre as formas de secagem, pode-se apontar a operação de fritura, que consiste na imersão do material úmido em um banho de óleo ou gordura com temperatura mais alta que o ponto de ebulição da água. Esta operação é bastante utilizada para a secagem de alimentos (Varela, et al., 1988), entretanto, uma variação atual e ainda pouco estudada é a utilização deste processo para outros materiais que não alimentos, como nos trabalhos de Vitrac (2000), Arbalosse (2001), Silva et al.(2005) e Peregrina et al.(2006). Estes últimos autores trabalharam com resíduo de tratamento de água municipal e obtiveram um produto de menor volume, teor de umidade bastante baixo em poucos minutos de processamento, ainda com óleo absorvido. O produto final apresenta alto poder calorífico e é facilmente manipulável. Outros autores também registraram métodos alternativos utilizando a fritura para a secagem de resíduos, como lodo e bagaço de cana (Silva et al., 2005; Corrêa & Rudolph, 2007, Costa et al., 2007).

No processo de secagem por fritura, o óleo quente é utilizado como meio de transferência de calor para produtos diversos (Oreopoulou et al., 2006). O calor fornecido ao produto pelo óleo (fonte externa) é utilizado para a elevação da temperatura inicial do mesmo à temperatura superior à de ebulição da água (calor sensível) e para a evaporação da água do produto (calor latente) havendo ainda perdas para o ambiente (Rodrigues, 1997).

Para o emprego em alimentos, o contato do produto com o meio quente induz à ocorrência de uma série de reações químicas e físicas que conduzem às mudanças na cor, na textura, no desenvolvimento de uma crosta e do sabor e,

mais importante, nas taxas elevadas de transferência de calor e massa (Silva, 2004).

A água do material desempenha importante papel durante o processo de fritura, recebendo calor do óleo quente que está em contato com o produto. A conversão de água no estado líquido para o estado vapor consome parte da energia do óleo. Assim, mesmo que o óleo esteja em temperaturas acima de 100°C, a temperatura do produto se mantém na temperatura de ebulição da água, até que toda a água existente seja removida. O calor é, então, conduzido desde a superfície até o interior do produto (Blumenthal, 1991; Kozempel, 1991).

O trabalho aqui apresentado é distinto de outros que relatam sobre métodos de secagem para bagaço de cana. A fritura por imersão é um método bastante corriqueiro para a secagem de alimentos, por ser um processo rápido quando comparado aos outros métodos de secagem e também por apresentar outras vantagens, dentre elas a de acentuar o sabor e a textura do produto final. Recentemente, alguns autores (Corrêa et al., 2007; Silva et al., 2005; Vitrac, 2002) publicaram trabalhos que adotaram a fritura por imersão como método para a secagem de resíduos e outras substâncias, como lodo de esgoto, bagaço de cana e madeira.

Na literatura, encontram-se vários trabalhos relevantes sobre fritura por imersão, entretanto, o de Farkas et al. (1996a e b) destaca-se por ressaltar este processo de uma forma genérica e aplicável a outras substâncias. Dessa forma, os procedimentos utilizados pela metodologia convencional serviram de auxílio aos testes aqui relatados e foram, então, adotados conceitos e procedimentos básicos deste processo para materiais não alimentares, mas que possuem propriedades similares, tais como o bagaço de cana.

Os diversos fatores que intercedem e afetam o complexo processo de fritura estão ilustrados na Figura 5.

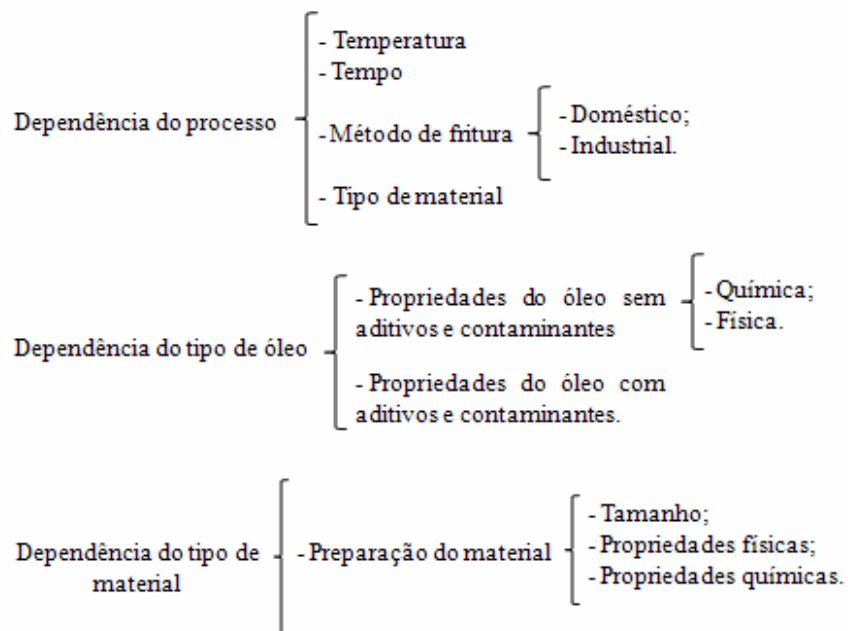


FIGURA 5: Fatores interferentes ao processo de fritura (Varela, 1988).

2.3.1 Meio de fritura

O meio empregado para a fritura são os óleos e as gorduras e, segundo Gamble et al. (1988) e Jorge et al. (2005), a temperatura, o tempo de residência, o tipo de óleo, a relação superfície/volume do óleo, o tipo de aquecimento e a natureza do material são fatores importantes que devem ser considerados durante este processo.

As altas temperaturas que se utilizam no processo de fritura (110° a 170°C) produzem acelerada penetração de calor, levando à rápida secagem do produto quando imerso ao meio. Além disso, considerando que uma parte do óleo utilizado como meio de transferência de calor é absorvida pelo produto,

verifica-se a manutenção do produto conservado seco por períodos prolongados (Cella et al., 2002).

O tempo de aquecimento do óleo influencia na quantidade de compostos de alteração formados durante a fritura. O sistema intermitente de aquecimento das frituras descontínuas é muito mais destrutivo para os óleos e gorduras de frituras que no sistema de aquecimento contínuo. Uma das explicações atribui este efeito ao fato de que, em elevada temperatura, as reações oxidativas ocorrem fundamentalmente na superfície de contato com o ar; já durante o resfriamento, ao diminuir a velocidade das mesmas e aumentar a solubilidade do ar, favorece-se a entrada de ar na massa, produzindo maior quantidade de hidroperóxidos e radicais livres durante o posterior aquecimento (Corsine & Jorge, 2006).

O óleo empregado na fritura é um dos componentes mais críticos do processo. Muitos óleos podem ser utilizados, sendo os mais comuns os óleos de soja, milho, algodão, palma e também a mistura de dois ou mais tipos de óleo.

O óleo utilizado no processo de fritura de um alimento pode sofrer certas degradações, provocando um aumento da quantidade de matéria graxa absorvida pelo alimento. Portanto, é necessário um controle efetivo do estado de degradação do óleo, no decorrer do processo (Lemaire et al., 1997).

Entretanto, dentre as formas de minimizar o custo de produção do bagaço seco por meio da fritura por imersão, utiliza-se como meio de aquecimento o óleo residual de fritura, uma vez que as suas propriedades indesejadas ocasionadas pela reutilização não são influentes neste tipo de processo.

2.3.2 Transferência de calor e massa através da fritura

De acordo com Vitrac et al. (2000), o comportamento geral da perda de água durante o processo de fritura pode ser descrito em três fases de acordo com a temperatura no centro do produto:

1. aquecimento inicial até o ponto de ebulição da água livre, juntamente com vaporização da umidade superficial;
2. uma faixa constante de temperatura próxima ao ponto de ebulição, durante a qual a maior parte da água livre é vaporizada, e
3. um aumento da temperatura do material até a temperatura do óleo, com baixas taxas de secagem.

A transferência de calor que ocorre no processo de fritura é realizada pela combinação da convecção por meio do contato da superfície do produto com o óleo e uma condução do calor para o interior do produto (Athanase, 1998; citado por Querido, 2005).

A velocidade de transmissão de calor ao interior do produto é dependente da diferença entre a temperatura do banho (óleo) e a temperatura de ebulição da água do produto. Esta diferença de temperatura constitui a força motriz: quanto mais se eleva esta diferença, mais rapidamente se dá a desidratação (Athanase, 1998).

No processo de fritura, admitem-se dois mecanismos que explicam o fenômeno de transferência de calor: convecção, controlada pela diferença de temperatura entre o óleo e o ponto de ebulição da água, e difusão, controlada pela diferença de umidade através do sólido (Mittelman et al., 1984).

Entretanto, muitos autores (Silva, 2003; Costa et al. 1998; Farkas & Hubbard, 2000; Baik & Mittal, 2005) vêm utilizando a transferência de calor convectiva como fenômeno adequado para a fritura como processo de secagem.

2.4 Secagem: Leito Fixo

Diante da escassez de informações sobre o comportamento dos materiais particulados e fibrosos frente a diferentes condições de secagem, os estudos em leito fixo crescem em importância pelo fato de esse tipo de leito constituir a base para a compreensão dos fenômenos fundamentais que permeiam os estudos em outros leitos particulados.

A intensidade da secagem, a qual reflete a mudança do conteúdo de umidade com o tempo, é influenciada significativamente pelos parâmetros do processo de secagem, tais como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do ar e também pela geometria da partícula (Strumillo & Kudra, 1986).

O fenômeno de secagem é fundamentado no conhecimento do conteúdo inicial e final de água do material, da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua superfície, em que a umidade de equilíbrio corresponde ao teor de água final que o produto pode atingir se o processo for conduzido num determinado período de tempo sem alterações de temperatura, pressão e umidade do ar.

As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem. Normalmente, o processo de secagem tem um comportamento que pode ser tomado como padrão, o qual pode ser dividido em três períodos. As curvas predominantes no processo de secagem estão ilustradas na Figura 6.

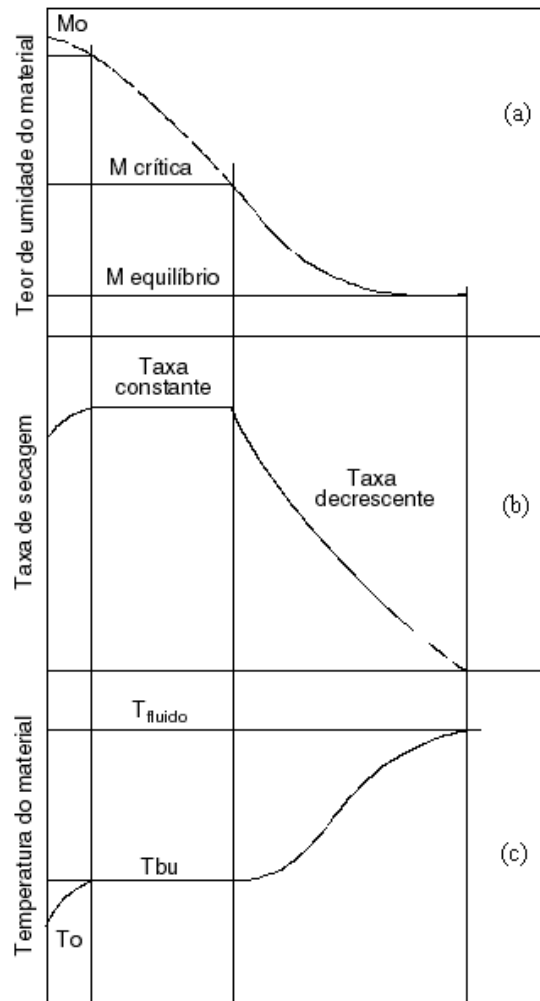


FIGURA 6: Representação dos diferentes períodos de secagem.

Fonte: (Park, 2007).

De acordo com Park et al. (2007), a curva (a) representa a diminuição do teor de água (base seca) do produto durante a secagem, o conteúdo de umidade do produto em base seca em relação à evolução do tempo de secagem, isto é, é a curva obtida pesando-se o produto, durante a secagem, numa determinada condição de secagem.

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo em relação à evolução do tempo.

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem.

O primeiro período representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

O segundo período caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No terceiro período, a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

Em muitos casos de secagem de produtos alimentícios não se observa o período de taxa constante de perda de água (Romero-Pena et al., 2003). Entretanto, para o bagaço de cana, pode-se dizer que a secagem ocorre somente por meio dos dois primeiros períodos, sendo o primeiro correspondente à elevação da temperatura até o momento em que a transferência de calor compensa a transferência de massa e o segundo período, aquele em que a taxa de secagem é constante, uma vez que toda água presente no bagaço é proveniente do processo de lavagem sendo, portanto, considerada como água superficial ou livre.

Dentre os trabalhos acadêmicos sobre secagem de bagaço, citados nas revisões de Corrêa et al. (2004) e de Sosa-Arno et al. (2006), encontram-se os de Massarani & Valença (1981), Valença & Massarani (1982) e Medeiros & Massarani (1982) que estudaram a secagem em leito fixo.

Vijayaraj et al. (2006a) fizeram um estudo sobre a secagem de bagaço de cana em leito fixo e utilizaram, em seus testes, diferentes temperaturas, velocidades, teor de água e espessura da camada de bagaço. Os dados obtidos naquele trabalho foram ajustados utilizando-se modelos matemáticos de secagem. Em outro trabalho, Vijayaraj et al. (2006b) estudaram a análise energética e exergética por meio da secagem de bagaço de cana. Os ensaios de secagem de bagaço, para ambos os trabalhos, foram realizados em câmaras de secagem com leito fixo que mantinham condições controladas de temperatura e velocidade.

2.5 Isotermas de sorção de bagaço de cana

Em estudos de secagem, o conhecimento das isotermas de sorção é bastante importante para estabelecer o teor de água do produto máximo durante a armazenagem (Zhang et al., 1996).

O estudo da isoterma de sorção, que relaciona o teor de água com a umidade relativa de equilíbrio, fornece informações relevantes para a adequação dos parâmetros de secagem. Essa relação depende de diversos fatores, tais como da estrutura física da superfície do material, composição química e afinidade com a água (Kurozawa et al., 2005).

Quando um material é exposto a certa umidade, ele perde ou ganha água para ajustar sua própria umidade a uma condição de equilíbrio com o ambiente. Isto ocorre quando a pressão de vapor d'água na superfície do material se iguala à pressão de vapor d'água do ar que o envolve (Treyball, 1982).

Entretanto, em condições específicas, o material não pode perder uma quantidade de água maior que aquela que tem em equilíbrio com o ar de secagem, ou seja, não pode ter um teor de água menor que o referente à umidade de equilíbrio. Dessa forma, a umidade de equilíbrio é que determina o teor mínimo de umidade que o material pode atingir dentro das condições operacionais estabelecidas, sendo de fundamental importância na modelagem do processo de secagem (Prado, 1999).

Uma isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: adsorção e dessorção. A primeira é feita quando um material mais seco é colocado em várias atmosferas, aumentando a umidade relativa e medindo o aumento de peso devido ao ganho de água. Na segunda, o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso devido à saída de água (Labuza, 1968).

A curva de dessorção possui valores de umidade de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção a uma dada atividade de água. A diferença entre estas duas curvas, denominada histerese, pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase (Rahman, 1995).

Pelo fato de o bagaço de cana ser um material com alto teor de água, ele deve perder água para o ambiente até atingir o equilíbrio. A perda de água de um produto define a sua não-higroscopicidade, que é marcante no bagaço de cana e torna-se uma característica fundamental a influenciar os processos de manuseio, estocagem e secagem.

Desse modo, é importante o estudo do equilíbrio higroscópico, uma vez que determina o teor de água mínimo que o produto pode atingir sob determinadas condições de secagem.

As curvas de umidade de equilíbrio podem ser obtidas experimentalmente por meio dos métodos dinâmico e estático. No método dinâmico, o material é submetido a fluxos de ar sob condições controladas de temperatura e umidade relativa, até que seja atingido o equilíbrio. No método estático, o equilíbrio higroscópico entre o material e o ambiente sob condições controladas é atingido sem movimentação do ar (Wang & Brennan, 1991; Jayas & Mazza, 1993; Chen, 2000).

A metodologia de controle de umidade relativa mais utilizada é a que utiliza compostos químicos, tais como soluções aquosas de ácido sulfúrico e soluções saturadas de sais (Pinedo, 2002).

Entretanto, encontram-se na literatura estudos recentes os quais utilizam uma unidade condicionadora de ar de laboratório conectada ao um secador de fluxo cruzado de ar para a construção de isotermas de sorção e de curvas de cinética de secagem de produtos agrícolas. Segundo Fortes et al. (2006), este equipamento fornece condições geométricas de transferência de calor e massa e termodinâmicas, de forma a assegurar que o ar que entra na câmara possa ser condicionado a uma temperatura de ponto de orvalho desejado e, após aquecimento, atingir a temperatura de bulbo seco desejada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental deste estudo foi dividida em três etapas. Na primeira etapa foi feita a caracterização física do bagaço de cana proveniente de duas diferentes usinas sucroalcooleiras. Neste item foram feitas análises de densidade aparente, granulometria, conteúdo de fibras e pó, formação de grumos, e teor de água do bagaço. Este estudo foi realizado no Departamento de Ciência dos Alimentos da Universidade Federal de Lavras.

A segunda parte deste trabalho, realizada no Departamento de Ciência dos Alimentos e no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras, apresenta o estudo da secagem do bagaço de cana utilizando o método de fritura de imersão em condições variadas de tempo, temperatura e tamanho das partículas do bagaço.

O terceiro estudo foi realizado no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Lavras, onde foram realizados testes de secagem do bagaço de cana em leito fixo com fluxo cruzado de ar e, em outro ensaio, a isoterma de dessorção do bagaço de cana úmido.

3.2 Caracterização do Material

3.2.1 Procedência

As amostras de bagaço de cana foram cedidas gentilmente pelas usinas Luciânia (Louis Dreyfus Commodities), localizada em Lagoa da Prata, Minas Gerais, Brasil e Ester, na cidade de Cosmópolis, São Paulo, Brasil. Deve-se observar que a granulometria do bagaço é função do tipo de extração (moagem ou difusor, e tipo de moenda ou difusor). A extração do caldo das usinas que cederam bagaço para este trabalho é feita através de moendas. As usinas

Luciânia e Ester apresentam, respectivamente, três e seis ternos em cada moenda.

3.2.2 Distribuição granulométrica

Esta análise foi realizada no Laboratório de Análises e Microestruturas do Departamento de Ciência dos Alimentos da UFLA. Neste item, foi feita a caracterização das amostras de bagaço com relação ao tamanho e ao formato de partículas procedentes das usinas Luciânia e Ester.

A distribuição granulométrica das amostras de bagaço foi feita por meio do método das peneiras padronizadas, como citado por 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 de bagaço estudadas foi feito utilizando-se a Equação 1, relativa ao cálculo de diâmetro médio de Sauter.

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

O diâmetro médio de Sauter foi utilizado neste trabalho pela sua melhor adequação. A distribuição granulométrica com o uso de peneiras é mais adequada para partículas que apresentam formato próximo a uma esfera. O bagaço de cana é formado basicamente de partículas com formato próximo ao de um cilindro, porém, este método foi utilizado aqui pela sua praticidade. As partículas cilíndricas do bagaço de cana apresentam diversos comprimentos e diâmetros.

3.2.3 Formação de Grumos

Corrêa (2003) reportou em seu trabalho que, ao realizar análise granulométrica de bagaço de cana úmido, ocorre formação de grumos com aderência das partículas menores às maiores, devido ao incremento do teor de

água presente no bagaço. Assim, foi testada a influência do teor de água na granulometria do bagaço. As amostras foram umidificadas por meio de aspersão de água, obtendo-se cinco teores de água diferentes e, em seguida, foi feita a análise granulométrica com o mesmo conjunto de peneiras padronizadas da série Tyler (4; 8; 14; 28; 35 e 48 mesh). A quantidade de água adicionada ao bagaço foi calculada de acordo com a Equação 4 mencionada no item 3.2.6, para os teores de água de 16,61%, 29,02%, 34,53%, 42,32%, 52,18%, 64,37% e 66,74% (b.u.) e uma determinada massa de bagaço úmido.

Após umidificação, as amostras foram homogeneizadas manualmente. Para análise, foram utilizadas amostras de 60,00 g em três repetições para cada teor de água de bagaço. A agitação foi feita durante 20 minutos, tempo este estabelecido após verificar que não houve influência significativa sobre a variação percentual da massa retida em cada peneira.

3.2.4 Percentual de fibras e pó

Posteriormente às análises granulométricas, foi feita uma separação manual do material em fibras e pó de cada uma das peneiras de malha 4, 8, 14, 28, 35, 48 e fundo. Para as partículas mais finas, a separação foi feita com o auxílio de uma pinça.

3.2.5 Densidade Aparente

A densidade aparente foi realizada em duas etapas, sendo a primeira determinada para as partículas de fibra e pó separadas manualmente após análise granulométrica e a segunda, determinada para o bagaço sem a prévia separação granulométrica.

A determinação foi feita 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.

A determinação da densidade aparente requer encontrar o volume total da amostra antes que o tolueno penetre seus poros. O volume da amostra é encontrado subtraindo-se o volume do picnômetro vazio pelo volume de tolueno que ocupa o espaço vazio (não preenchido pela amostra). A determinação do volume ocupado pelo tolueno requer 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 é igual à massa total (picnômetro + tolueno + bagaço) menos a massa do picnômetro vazio e do bagaço. Dividindo-se a massa obtida pela densidade do tolueno, o volume do tolueno é dado de acordo com a Equação 2.

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

A densidade aparente do bagaço foi calculada através da Equação 3.

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

3.2.6 Teor de Água

A determinação do teor de água final foi feita por meio da secagem em estufa, à temperatura de 105°C, durante 24 horas (AOAC, 2005). A

determinação do teor de água em base seca e úmida foi calculada de acordo com as Equações 4 e 5. Esta metodologia foi empregada para a caracterização física do bagaço, secagem por fritura, isoterma de dessecamento e secagem em leito fixo.

$$X_{a'bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{água}} + m_{\text{bagaço úmido}}} \quad (4)$$

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{bagaço seco}}} \quad (5)$$

3.3 Fritura por Imersão

As amostras de bagaço utilizadas neste item foram cedidas pela Usina Luciânia (Louis Dreyfus Commodities), Lagoa da Prata, MG, em agosto de 2007. O tipo de extração desta usina é feito por moendas.

A secagem por fritura foi feita utilizando-se um aquecedor da marca Quimis e um recipiente de vidro (tipo pirex) contendo 1,5 L de óleo de soja reutilizado. Amostras de 1,5 g de bagaço foram acondicionadas em sachês de papel previamente seco, do tipo utilizado como embalagem de ervas para a elaboração de chás. Este dispositivo foi utilizado para que não se perdesse material particulado durante o processo de fritura.

No processo de fritura por imersão, alguns ensaios foram feitos com ou sem prévia separação granulométrica das amostras. Para os ensaios em que foi avaliada a influência do tamanho das partículas de bagaço no processo de fritura, o procedimento decorreu da seguinte forma: anteriormente à secagem de bagaço de cana por fritura, foi realizada uma análise granulométrica de uma amostra de

bagaço de cana úmido com as seguintes peneiras padronizadas da série Tyler: 4, 8, 14, 28, 35 e 48 mesh. O material retido nas peneiras 4; 8; 14 e 28 mesh foi reumidificado para posterior fritura. A escolha das faixas de tamanho testadas foi feita com base nos maiores valores de fração mássica obtidos em análise granulométrica.

A aspersão de água no bagaço foi feita após análise granulométrica, pois se verificou, em ensaios preliminares, que ocorria perda do conteúdo de água do bagaço durante a agitação das peneiras. O material de cada peneira foi homogeneizado e deixado em repouso por três horas, para a uniformização do teor de água.

A leitura da temperatura foi feita por meio de um termômetro de vidro com mercúrio como fluido e escala 0° a 300°C. Para a homogeneização da temperatura do óleo, foi utilizado um agitador magnético. Esperou-se que a temperatura não apresentasse variação para que o sistema fosse considerado em regime permanente e, então, deu-se início aos ensaios de fritura. A metodologia utilizada neste item foi reportada por Corrêa & Rudolph (2007), os quais realizaram ensaios similares na Universidade de Queensland, Brisbane, Queensland, Austrália.

As temperaturas do óleo testadas foram de 110°, 130°, 140°, 150° e 160°C. Foram obtidas curvas cinéticas de secagem em intervalos de tempo variando de 5 a 210 segundos.

Outros ensaios de fritura também foram realizados no bagaço úmido, sem a prévia separação granulométrica do mesmo. Os tipos de óleo empregados para a fritura foram óleo de soja novo, adquirido em supermercado local e óleo de soja reutilizado, cedido pelo restaurante universitário da Universidade Federal de Lavras. Após as análises de secagem por fritura, as amostras foram reservadas para determinação do teor de água, do teor de óleo e do poder calorífico do bagaço de cana frito.

O processo de secagem do bagaço de cana por meio da fritura por imersão está ilustrado na Figura 7.

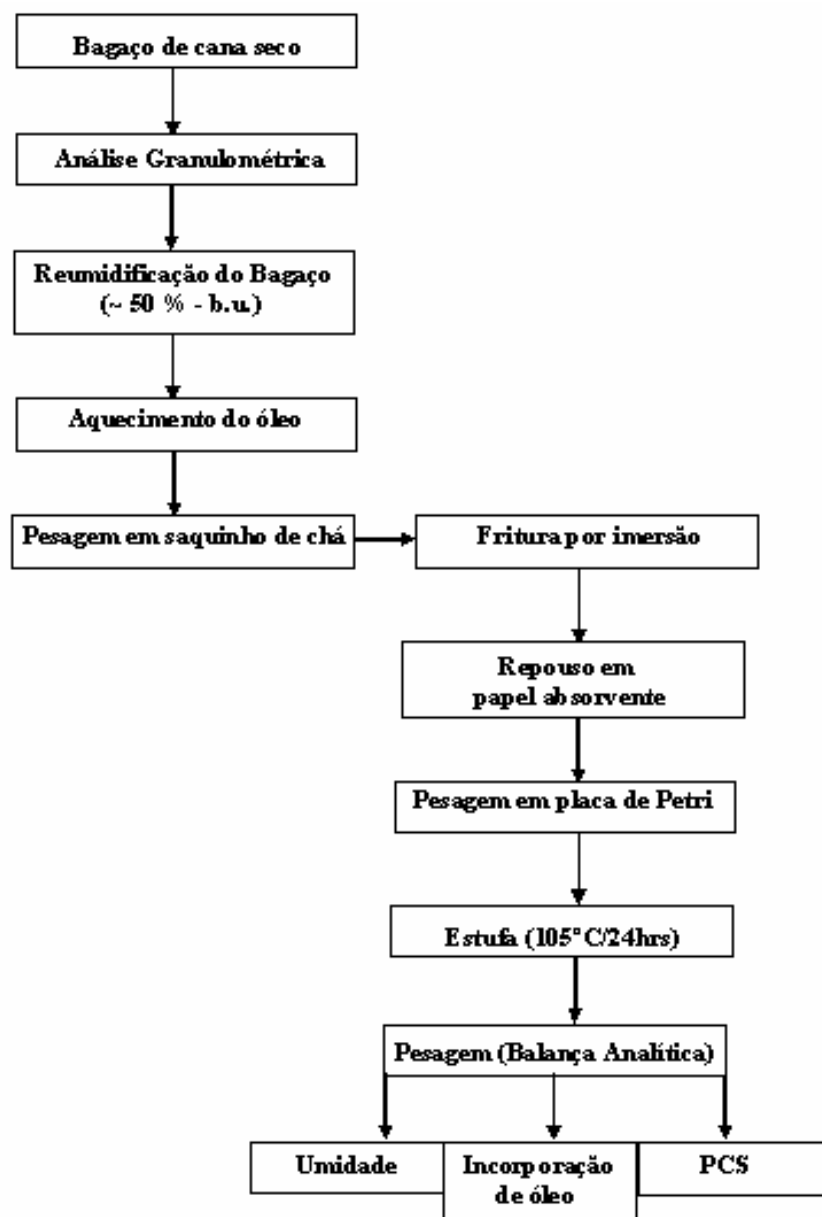


FIGURA 7: Fluxograma do processo de Fritura de Bagaço de cana.

A Figura 8 mostra um esquema do sistema experimental de fritura utilizado.



FIGURA 8: Montagem experimental do processo de fritura por imersão.

Sendo:

a: chapa aquecedora da marca Quimis; **b:** recipiente de vidro (pirex) contendo óleo como meio de aquecimento; **c:** termômetro de vidro com mercúrio como fluido e escala 0° a 300°C; **d:** suporte universal e **e:** sachês de papel contendo bagaço de cana.

A massa total após a fritura foi calculada pelo somatório da massa de água, massa de material seco e massa de óleo (Equação 6).

$$m_{\text{total}} = m_{\text{água}} + m_{\text{bagaço seco}} + m_{\text{óleo}} \quad (6)$$

Ao final do período da fritura, o bagaço foi retirado do banho e permaneceu em repouso, em papel absorvente, para que o excesso de óleo escorresse. Após o repouso, o bagaço foi minuciosamente retirado do saquinho de papel e colocado em uma placa de Petri de massa conhecida. O material contido na placa correspondeu às massas de bagaço seco, de óleo incorporado e de água remanescente. Para a medição de massa neste trabalho, foi utilizada uma balança analítica com precisão 0,0001 g.

A determinação do teor de água final foi feita de acordo com a metodologia citada no item 3.2.6. Após a secagem em estufa, o material contém somente bagaço seco e óleo incorporado. Para a medição de massa neste trabalho, foi utilizada uma balança analítica com precisão 0,0001 g.

3.3.1 Teor de Água

O teor de umidade, obtido conforme procedimento citado no item 3.2.6, é apresentado em cada experimento de secagem realizado.

3.3.2 Teor de Óleo: Método de Soxhlet

O teor de óleo incorporado foi determinado seguindo a metodologia proposta pela AOAC (2005) – Método de Soxhlet. O material previamente seco foi triturado em um almofariz, de modo a diminuir seu tamanho médio. Foram pesados aproximadamente 2,0000 g de amostra em um cartucho de celulose, cobrindo cada amostra com algodão desengordurado. Este cartucho foi dobrado, de modo a formar um invólucro para impedir o escape dos sólidos. O cartucho contendo o material foi destilado com éter etílico por 6 horas, como sugerido pela AOAC (2005).

3.3.3 Teor de Óleo: Via Balanço de Massa

A determinação do teor de óleo via balanço de massa foi calculado por meio das Equações 7 e 8, as quais representam os teores de óleo incorporado pelo bagaço, em base úmida e base seca, respectivamente.

$$X_{o, bu} = \frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\text{total}}} \quad (7)$$

$$X_{o, bs} = \frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\text{bagaço seco}}} \quad (8)$$

3.3.4 Poder Calorífico

Existem duas definições de poder calorífico: poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS). O PCI é definido como a quantidade de energia liberada pela combustão completa de um combustível, com a água sendo formada no estado gasoso. O PCS é definido como a quantidade de energia liberada pela combustão completa de um combustível, com a água sendo formada no estado líquido.

O PCS de combustíveis sólidos pode ser determinado pelo experimento de bomba calorimétrica (ASTM D-2015), em que a combustão é efetuada em ambiente com alta pressão de oxigênio (visando garantir a combustão completa) e com vapor d'água saturado (visando garantir que toda a água formada esteja no estado líquido).

As análises de valor energético do bagaço de cana foram realizadas na Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira, do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Lavras.

A determinação do valor energético do bagaço de cana frito foi realizada de acordo com a norma ASTM D-2015-77, (ASTM, 1997), com auxílio de uma bomba calorimétrica. O procedimento consiste na pesagem de, aproximadamente, 1,0000 g de bagaço de cana em uma cápsula metálica. Em seguida introduziu-se o fio de níquel-cromo (PARR 45C10), de forma que este ficasse em contato direto com a amostra para a combustão. A bomba calorimétrica é inserida no interior do calorímetro com oxigênio para promover a completa combustão da amostra. Espera-se a estabilização da temperatura inicial (T_0) obtida após a ignição e da temperatura final (T_f) obtida após a queima completa da amostra. Em seguida, fez-se uma titulação com o líquido remanescente após a lavagem da bomba, utilizando-se carbonato de sódio (Na_2CO_3) de concentração 0,07 N e metil orange como indicador (com pH do ponto de viragem igual a 4,2) para determinação de ácido nítrico, HNO_3 , o qual é formado durante a queima. Este volume deve ser descontado para o cálculo do poder calorífico superior. Cada 1,0 mL gasto de carbonato de sódio na titulação equivale a 1,0 caloria. O comprimento do fio de níquel-cromo que não foi queimado, considerado como a energia de ativação, é descontado do cálculo do PCS, conforme representa a Equação 9.

$$\text{PCS} = \frac{2474,76 \cdot (T_f - T_0) - C_1 - C_2}{m_{\text{amostra}}} \quad (9)$$

Onde,

T_f : Temperatura final [°C];

T_0 : Temperatura inicial [°C];

C_1 : fio de cromo-níquel [cm];

C₂: volume de Carbonato de Sódio (Na₂CO₃) gasto para titulação com ácido nítrico remanescente [mL].

A conversão do poder calorífico superior para inferior foi obtida de acordo com a Equação 10.

$$PCI = \frac{PCS - 600.(X' + 9.H')}{1 + X'} \quad (10)$$

em que H corresponde à porcentagem de hidrogênio presente no bagaço de cana. Segundo Jais (2007), esta porcentagem presente no bagaço de cana corresponde a 6,5%.

3.3 Planejamento Experimental

Os experimentos de fritura foram realizados com base em um delineamento inteiramente casualizado e os dados foram submetidos à análise de variância, a 5% de significância, no programa estatístico Sisvar. Em todos os ensaios, a variável de resposta analisada foi o teor de água do bagaço de cana, a qual foi determinada de acordo com o item 3.2.6.

3.4.1 Primeira Fritura de imersão

Nesta etapa, foi utilizado um esquema fatorial 2 x 2 x 3, sendo 2 níveis para o fator tipo de óleo, 2 níveis para o fator dimensão do bagaço de cana e 3 níveis para o fator tempo de fritura, em triplicata. Os dados foram analisados aplicando-se o teste F, a 5% de significância (p<0,05).

3.4.2 Segunda Fritura de imersão

O esquema fatorial aqui utilizado foi de 2 x 5, sendo 2 níveis para o fator temperatura e 5 níveis para o fator tempo, em 3 repetições. Foi utilizada análise de variância, empregando-se o teste F, a 5% de significância.

3.4.3 Terceira Fritura de imersão

Nestes ensaios, a fritura do bagaço foi realizada com base em um delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 5 x 3, sendo 2 níveis para o fator temperatura, 5 níveis para o fator tempo e 3 níveis para o fator dimensão do bagaço, em 2 repetições. Foi utilizada análise de variância, a 10% de significância, por meio do programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2000).

3.5 Secagem em leito fixo

O bagaço utilizado nestes ensaios foi cedido pela Usina Luciânia (Louis Dreyfus Commodities). Os testes foram feitos no Laboratório de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Análises e Microestruturas do Departamento de Ciência dos Alimentos, ambos na Universidade Federal de Lavras.

As amostras de bagaço em equilíbrio com ar ambiente apresentavam teor de água próximo a 8,0% em base úmida, à umidade relativa de 60%.

A granulometria fornece as frações em massa do material particulado em função dos diâmetros de partícula. Esta informação foi importante para a realização dos ensaios de secagem, pois o bagaço de cana apresenta grande irregularidade quanto ao tamanho.

Devido à larga abertura da bandeja acoplada ao secador de leito fixo, foi necessária uma separação granulométrica da amostra, para que não houvesse perda de material. Portanto, nestes ensaios, foi utilizado somente o bagaço retido

na peneira de 4 mesh. Pode-se observar, visualmente, que o bagaço retido naquela peneira somente corresponde ao conteúdo fibroso existente no bagaço de cana.

Como as amostras de bagaço se encontravam secas, foi necessário proceder a uma reumidificação por meio de aspersão artificial de água sobre todo o material. A quantidade de água adicionada ao bagaço foi calculada de acordo com a Equação 4, mencionada no item 3.2.6, para o teor de água de 46% (b.u.) e uma determinada massa de bagaço úmido.

Os ensaios de secagem foram feitos utilizando-se uma unidade condicionadora de ar de laboratório conectada ao um secador de fluxo cruzado de ar, produzido pela empresa Consciente Ltda. O índice de umidade relativa era de 25%.

O procedimento empregado consiste na passagem de ar aquecido por meio de uma bandeja com fundo de tela perfurada, com volume igual a 1.984 cm^3 , contendo uma camada aproximada de 3,5 cm bagaço úmido. Os ensaios foram realizados por meio da pesagem em balança semi-analítica da bandeja contendo as amostras de bagaço em intervalos regulares de 1 minuto, até a obtenção da umidade de equilíbrio, considerando-se variação de massa menor que 0,02 g, sob as condições pré-estabelecidas de umidade relativa e temperatura, as quais foram verificadas experimentalmente após atingir peso constante. Cada experimento durou, em média, 30 minutos, até atingir o equilíbrio higroscópico com os dados obtidos e, então, determinaram-se as curvas de cinética de secagem do bagaço de cana para as condições operacionais consideradas. O fluxo de ar do sistema foi mantido próximo a $0,9 \text{ m.s}^{-1}$, em todos os tratamentos. As temperaturas do ar de secagem eram de 50°, 60° e 70°C.

3.6 Isoterma de Dessorção

Para a realização dos testes de isoterma de dessorção, utilizaram-se as amostras de bagaço de cana cedidas pela usina Ester. Estas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos herméticos, mantidos sobre refrigeração até a ocasião dos experimentos (dois dias após a obtenção na moenda). A amostra obtida apresentava teor de água de $46,0 \pm 2,0\%$ (b.u.). As amostras analisadas apresentavam teor de água relativo ao obtido logo após a etapa de extração do caldo pela moenda.

A determinação do teor de água foi feito de acordo com o item 3.2.6. Os testes de isoterma de dessorção foram realizados no mesmo equipamento utilizado para a secagem em leito fixo: unidade de condicionamento de ar do laboratório – SCAL, produzido pela Consciente Ltda. As umidades relativas escolhidos para os ensaios foram de 25%, 35%, 45%, 55%, 65% e 75%. A massa de bagaço úmido utilizada para cada umidade relativa foi de 135,00 g e o sistema foi operado em condições constantes de temperatura de secagem (50°C), e velocidade de ar (aproximadamente de $0,9 \text{ m s}^{-1}$). A velocidade de ar na saída do secador foi medida utilizando-se um anemômetro digital.

Um esquema do funcionamento da unidade condicionadora de ar de laboratório utilizada nos testes de secagem e isoterma de bagaço de cana é mostrado na Figura 9.

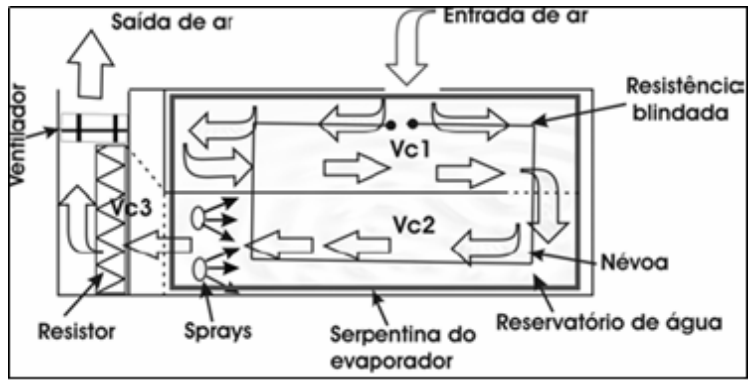


FIGURA 9: Unidade condicionadora de ar de laboratório.

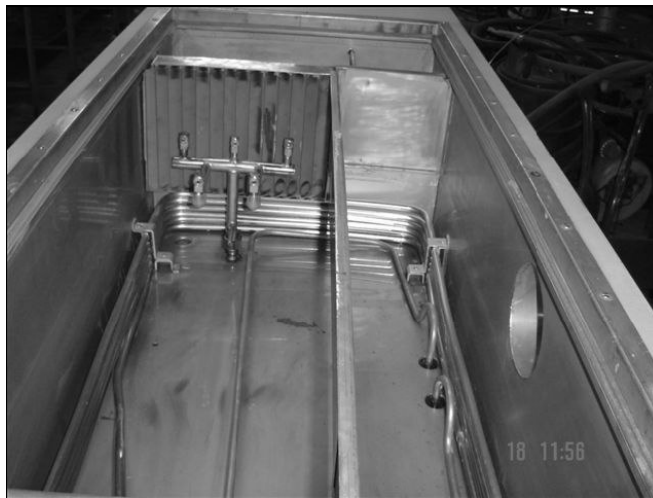


FIGURA 10: Câmara condicionadora de ar

O compartimento inferior do condicionador consistiu de uma unidade de refrigeração e uma bomba d'água. O compartimento superior contém os equipamentos usados no condicionamento de ar e divide-se em três câmaras: câmara de entrada do fluxo de ar ambiente (15 cm x 75 cm), com reservatório de água; câmara do spray (45 cm x 75 cm), com reservatório de água, cinco bocais de spray e um eliminador de gotas e câmara de saída do fluxo de ar (60 cm x 25 cm), que contém um exaustor e um aquecedor elétrico de ar (Figura 9). A câmara de entrada é separada da câmara do spray por uma parede (Figura 10), com uma abertura que permite a conexão entre as câmaras; nelas foram colocados o evaporador do sistema de resfriamento e um resistor, de forma a se poder aquecer ou resfriar a água do reservatório e do spray. A água usada no spray provém da camada de água (reservatório) das câmaras de entrada e de spray.

3.7 Modelagem Matemática

As curvas de cinética de secagem em leito fixo e isotermas de sorção foram ajustadas com uso de modelos da literatura.

A vantagem da utilização de modelos matemáticos na predição das isotermas e das curvas de cinética de secagem reside no fato de que com poucos pontos experimentais pode-se construir uma isoterma ou uma curva de cinética de secagem, a qual pode ser facilmente interpolada ou extrapolada para a obtenção de pontos nas regiões de baixas e altas atividades.

As equações de 11 a 23 representam modelos matemáticos utilizados para ajuste dos testes de secagem de bagaço de cana em leito fixo:

$$\text{Newton} \quad M_r = e^{-kt} \quad (11)$$

$$\text{Page} \quad M_r = e^{-kt^n} \quad (12)$$

Page Modificado 1	$M_r = e^{((-kt)^n)}$	(13)
Page Modificado 2	$M_r = e^{-(kt)^n}$	(14)
Henderson e Pabis	$M_r = ae^{(-kt)}$	(15)
Logarítimo	$M_r = ae^{(-kt)} + c$	(16)
Dois termos	$M_r = ae^{(-k_0t)} + be^{(k_1t)}$	(17)
Dois termos exponencial	$M_r = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kat)}$	(18)
Wang e Singh, 1978	$M_r = 1 + at + bt^2$	(19)
Aproximação por difusão	$M_r = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-kbt)}$	(20)
Verma et al., 2000	$M_r = ae^{(-kt)} + (1 - a)e^{(-k_1t)}$	(21)
Modificado Henderson e Pabis	$M_r = ae^{(-kt)} + be^{(-k_0t)} + ce^{(-k_1t)}$	(22)
Midilli et al., 2002	$M_r = ae^{(-kt^n)} + bt$	(23)

Onde o valor de M_r foi obtido de acordo com a Equação 24:

$$M_r = \frac{X_t - X_{eq.}}{X_i - X_{eq.}} \quad (24)$$

Sendo que,

M_r = razão do teor de água, adimensional

X_t = teor de água no tempo (b.u.) [kg kg⁻¹]

X_i = teor de água para $t = 0$ (b.u.) [kg kg⁻¹]

X_{eq} = umidade de equilíbrio (b.u.) [kg kg⁻¹]

t = tempo de secagem [min]

a ; b ; c ; n = coeficientes dos modelos

k ; k_0 ; k_1 = constantes de secagem [min⁻¹].

Para a modelagem das curvas de umidade de equilíbrio, têm sido utilizadas relações matemáticas semiteóricas e empíricas, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de umidade de equilíbrio. Diversas equações vêm sendo utilizadas para expressar o teor de umidade de equilíbrio em função do teor de água e da umidade relativa do ar.

As equações de 25 a 34 representam os modelos matemáticos utilizados neste trabalho, para ajuste da isoterma de dessorção do bagaço de cana.

$$\text{Jaafar, Michalowski, (1990)} \quad X = \frac{S_1 S_2}{(1 - S_3 \varphi)[1 + (S_2 S_3) \varphi]} \quad (25)$$

$$\text{Hailwood \& Horrobin, (1946)} \quad \frac{\varphi}{X} = S_1 S_2 \varphi S_3 \varphi^2 \quad (26)$$

$$\text{Anderson \& Hall, (1948)} \quad X = \frac{S_1 S_2 S_3 \varphi}{(1 - S_4 S_3 \varphi)[1 + (S_2 - S_4) S_3 \varphi]} \quad (27)$$

$$\text{Peleg, (1993)} \quad X = s_1 \exp(s_2 \ln \varphi) + s_3 \varphi^{s_4} \quad (28)$$

$$\text{Huttig \& Theimer, (1950)} \quad \frac{X}{S_1} = \frac{\varphi S_2}{1 + \varphi S_2} \quad (29)$$

$$\text{Caurie, (1970)} \quad \ln X = \ln(S_1) - \varphi S_2 \quad (30)$$

$$\text{Kühn, (1964)} \quad X = \frac{S_1}{\ln \varphi} + S_2 \quad (31)$$

$$\text{Polinômio de 5}^\circ \quad \varphi = S_1 + S_2 X + S_3 X^2 + S_4 X^3 + S_5 X^4 \quad (32)$$

$$\text{Harkins \& Jura, (1944)} \quad \ln \varphi = S_1 - \frac{S_2}{X^2} \quad (33)$$

$$\text{Halsey, (1983)} \quad \varphi = \frac{S_1}{e^{S_2 X^{-S_3}}} \quad (34)$$

Onde,

ϕ = Umidade relativa [%];

X = Teor de água (b.s.) [%];

S₁ a S₅ = constantes dos modelos [-].

Os ajustes matemáticos para os testes de secagem e isoterma de dessecção foram feitos utilizando-se o modelo de quasi-Newton, com critério de convergência de $1,00 \cdot 10^{-4}$, valor inicial de 0,10 e estimativa inicial de 0,50, para todos os parâmetros.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização do bagaço de cana

As análises utilizadas para a caracterização do bagaço de cana foram: análises granulométricas com separação manual de fibras e pó, densidade aparente para cada tamanho de bagaço e determinação da influência do teor de água na granulometria do bagaço.

4.1.1 Análise granulométrica

Os resultados médios obtidos nas análises granulométricas das usinas Luciânia e Ester são apresentados nas Figuras 11 e 12, respectivamente. As respectivas amostras se encontravam em equilíbrio com o ambiente (umidade relativa de, aproximadamente, 60% e temperatura na faixa de 23°-26°C), apresentando teores de água iguais a 5,00% para o bagaço da Usina Luciânia e 6,30% para o bagaço de Usina Ester, ambos em base úmida.

De acordo com as Figuras 12 e 11, as faixas de tamanho de bagaço com maior fração mássica foram obtidas na peneira com abertura 4,75 mm (4 mesh), entre as peneiras de abertura 1,2 mm (14 mesh) e 0,6 mm (28 mesh), e entre as peneiras de abertura 2,36 mm (8 mesh) e 1,2 mm (14 mesh), a qual obteve maior concentração. Resultados semelhantes foram obtidos por outros autores (Nebra & Macedo, 1988; Barbosa, 1992; Corrêa, 2003). Tanto aqui como naqueles trabalhos, observou-se que o aumento do teor de fibras ocorreu com o incremento do diâmetro médio. Deve-se observar que a granulometria do bagaço é função do tipo de extração (moagem ou difusor, tipo de moenda ou difusor e número de ternos).

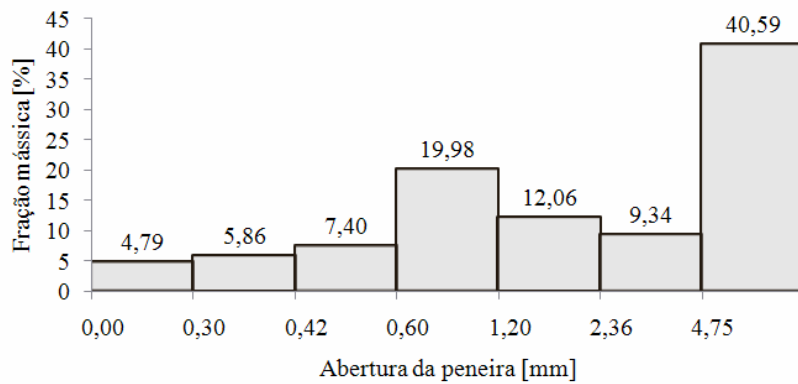


FIGURA 11: Distribuição granulométrica do bagaço de cana da usina Luciânia, obtida com teor de água de 5,00% (b.u.).

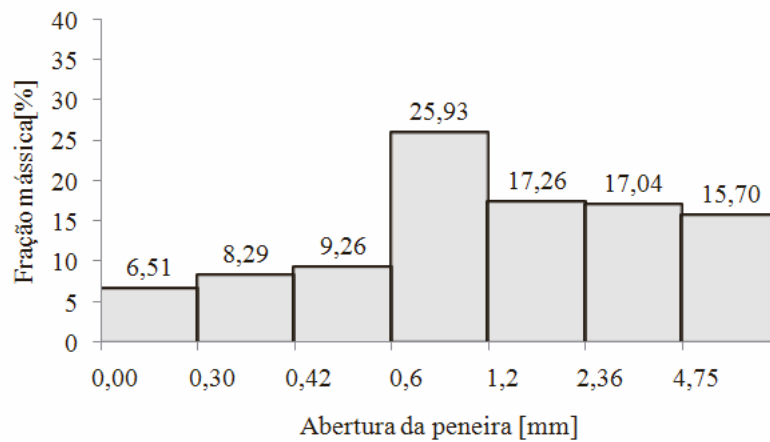


FIGURA 12: Distribuição granulométrica do bagaço de cana da Usina Ester, obtida com teor de água de 6,30% (b.u.).

Observa-se, por meio das Figuras 11 e 12, que houve uma significativa diferença entre a distribuição granulométrica e o conteúdo de partículas retido nas peneiras. Esta diferença ocorreu devido ao tipo de moenda de cada usina e ao número de ternos presentes em cada moenda. O terno é constituído pelo conjunto de rolos presente em cada moenda. O número de ternos utilizados no processo de moagem varia de quatro a sete e cada um deles é formado por três rolos principais denominados rolo de entrada, rolo superior e rolo de saída (Copersucar, 2008). A partir da quantidade de caldo extraída do bagaço após cada terno, tem-se a quantidade ou a porcentagem de fibra no bagaço (Jais, 2007). A usina Luciânia apresenta três ternos e a usina Ester, seis ternos em cada moenda.

4.1.2 Formação de grumos

Como anteriormente citado, o bagaço de cana apresenta diversos tamanhos e formatos das partículas, sendo necessária uma análise de distribuição de tamanhos para um conhecimento mais aprofundado deste material.

Pelos dados da Tabela 1, observa-se que, para o bagaço com teores de água maiores, 52,18% a 66,74% (b.u.), há uma tendência à formação de grumos. A umidade leva as partículas menores a se agruparem às maiores, não havendo depósito daquelas nas peneiras de menor diâmetro de abertura. Além disso, o material úmido apresenta maior aderência às telas das peneiras, o que dificulta a sua passagem pelas mesmas.

Corrêa (2003), analogamente, obteve, em seu trabalho, a relação entre o teor de água e \overline{d}_p e verificou que, para o bagaço com teores de água maiores, 36,42% e 65,64% (b.u.), houve tendência à formação de grumos. Entretanto, verificou tendência ao se obter valores de diâmetro constantes nas faixas de teor

de umidade 0% a 20% e a partir de 60%. A faixa de teor de água estudada naquele trabalho foi de 2,76% a 65,64% (b.u.).

TABELA 1: Distribuição granulométrica do bagaço de cana

X _a [%] (b.u.)	Abertura da peneira [mm]							\overline{d}_p (Sauter) [mm]
	4,75	2,36	1,20	0,60	0,42	0,30	0,00	
	Fração mássica retida [%]							
16,61	17	15	17	28	12	6	6	0,077
29,02	9	14	28	31	13	4	2	1,089
34,53	13	13	27	29	13	4	1	1,110
42,32	17	15	17	28	12	6	6	1,132
52,18	28	10	22	35	7	0	0	1,341
64,37	14	12	18	52	3	0	0	1,442
66,74	8	13	16	62	2	0	0	1,458

O gráfico da Figura 13 mostra a relação entre o teor de umidade e o diâmetro médio (\overline{d}_p), cuja curva corresponde à Equação 35. Observa-se que houve aumento do diâmetro médio em função do maior conteúdo de água presente no bagaço e tendência a se obter valores de diâmetro constantes nas faixas de teor de água de 29,02% a 42,32%. A faixa de teor de água estudada corresponde aos valores apresentados na Tabela 1.

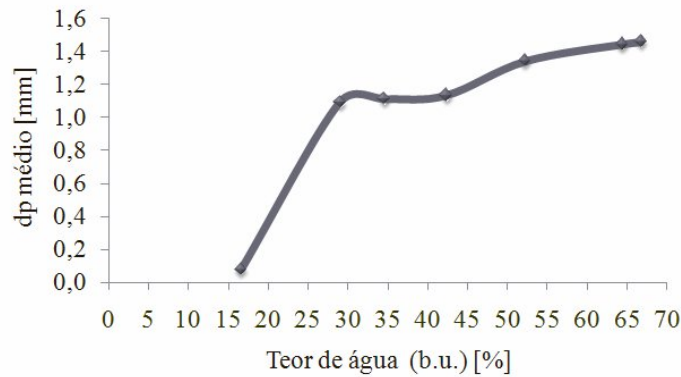


FIGURA 13: Influência do teor de água no diâmetro médio das partículas.

$$\overline{d_p} = 4 \times 10^{-5} X'^3 - 0,005 X'^2 + 0,24 X' - 2,775 \quad (R^2 = 0,9750) \quad (35)$$

4.1.3 Percentual de fibras e pó

Para avaliação do percentual de fibras e de pó retidos em cada peneira da análise granulométrica, considerou-se uma geometria próxima à de um cilindro para as partículas constituídas de fibras e, para as partículas de pó, as que apresentavam dimensões semelhantes a um disco ou a uma esfera.

Os resultados médios obtidos nas análises granulométricas realizadas para posterior separação manual estão apresentados na Tabela 2. Conforme citado no item 4.1.1, as faixas de tamanho de bagaço com maior fração mássica também foram obtidas nas peneiras de 4, 14 e 28 mesh (correspondente a 4,75; 1,20 e 0,60 mm, respectivamente), as quais obtiveram maior percentual de material retido.

TABELA 2: Análise granulométrica do bagaço de cana para análise de fibras e pó.

Série Tyler	Abertura pe	PR	PA	d*	\overline{d}_p (Sauter)
[mesh]	[mm]	[g]	[%]	[mm]	[mm]
- 4	4,75	38,72	19,76	4,75	1,6313
- 4 + 8	2,36	21,31	10,87	3,56	
- 8 + 14	1,2	83,76	42,75	1,78	
- 14 + 28	0,6	52,04	26,56	0,90	
- 28 + 35	0,42	0,48	0,25	0,51	
- 35 + 48	0,30	0,03	0,01	0,36	
- 48	0,00	0,01	0,01	0,15	
Total		196,75	100,00	0,00	

* O diâmetro médio da partícula (d) corresponde à média aritmética das aberturas das peneiras.

Os resultados das frações mássicas obtidas após a separação manual das partículas de fibras e pó de bagaço encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3: Fração mássica para os dois tipos de partículas de bagaço.

Tyler [mesh]	Abertura pe [mm]	Tipo de partícula	Fração mássica [%]
- 4	4,75	Fibra	19,76
		Pó	0,00
- 4 + 8	2,36	Fibra	10,87
		Pó	0,00
- 8 + 14	1,20	Fibra	25,75
		Pó	17,00
- 14 + 28	0,60	Fibra	2,19
		Pó	24,37
- 28 + 35	0,42	Fibra	0,05
		Pó	0,20
- 35 + 48	0,30	Fibra	0,00
		Pó	0,01
- 48	0,00	Fibra	0,00
		Pó	0,01

Observa-se que o bagaço apresenta maior porcentagem de fibras. Verificou-se, visualmente, que as fibras possuem formato próximo ao de um cilindro.

As frações mássicas obtidas pela separação manual neste trabalho foram condizentes com as dos trabalhos de Nebra & Macedo (1988), Corrêa et al. (2000b), Corrêa (2003) e Costa et al. (2008), nos quais o maior conteúdo de fibras foi obtido nas peneiras de maior abertura da série empregada.

4.1.4 Densidade aparente

A determinação da densidade aparente do bagaço foi dividida em duas etapas. Na primeira etapa, foi determinada a densidade das partículas de fibras e pó de bagaço em dois teores de água (item 4.1.4.1) e a segunda etapa, na qual se determinou a densidade do bagaço sem a prévia separação granulométrica em cinco teores de água distintos (item 4.1.4.2).

4.1.4.1 Densidade aparente com separação granulométrica

O gráfico da Figura 14 mostra os resultados obtidos da densidade das partículas de fibras e pó de bagaço de cana, para os teores de água de 6,87% (b.u.), em equilíbrio com o ambiente (umidade relativa de 60% e temperatura igual a 26°C), e 14,78% (b.u.), em base úmida.

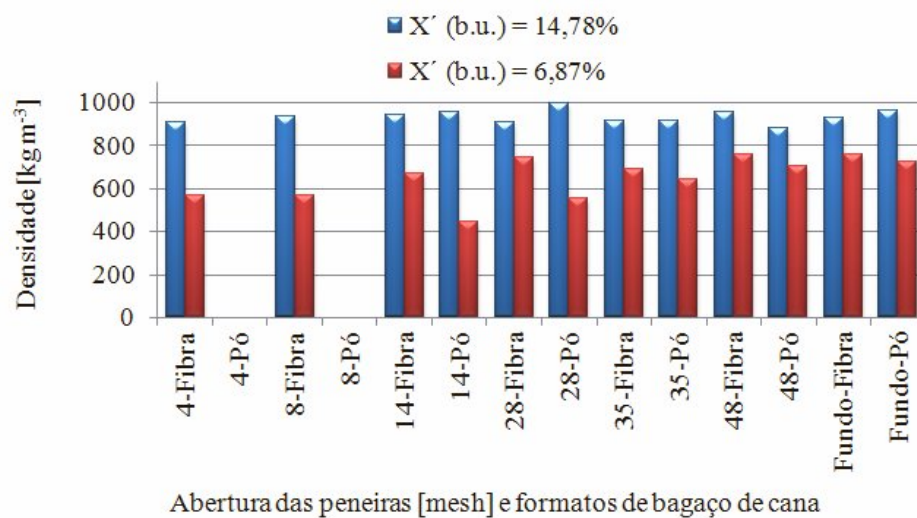


FIGURA 14: Densidade aparente das partículas de pó e fibras do bagaço de cana.

Roca et al. (2006), Nebra et al. (1988) e Ponce et al. (1983) também determinaram a densidade aparente do bagaço de cana em dimensões variadas. Entretanto, os valores obtidos por estes autores foram menores do que os aqui obtidos, porém, foram tanto maior quanto maior o teor de água e concordante com a tendência apresentada neste trabalho. Como a densidade aparente é dependente do teor de água presente no material e por apresentar certa diversidade de formas presentes numa mesma amostra, estas diferenças se justificam.

Entretanto, os resultados de densidade obtidos por aqueles autores foram tanto maior quanto o incremento do teor de água e mostraram-se coerentes com os resultados aqui obtidos. Naqueles trabalhos citados, os teores de água do bagaço utilizado eram de, respectivamente, 10,6%, 8,4% e 8,0% a 12,0%, todos em base úmida.

Os dados de densidade obtidos no presente trabalho foram ajustados por meio da Equação 36 proposta por Corrêa (2003) e os valores analisados corroboraram com os deste autor.

$$\rho = 0,0006X^3 - 0,0134X^2 + 0,1428X + 685,042 \quad (36)$$

Os resultados obtidos neste trabalho permitem inferir que se trata de uma propriedade física que varia de forma inversamente proporcional ao diâmetro das partículas de bagaço e é função do teor de água do mesmo. Verificou-se que as amostras com teor de água maior (14,78%, b.u.) obtiveram valores médios de densidade superiores aos das amostras com teor de água menor (6,87%, b.u.).

Como a densidade aparente é dada pela razão entre a massa e o volume do bagaço, e pelo fato de a massa utilizada para determinação da densidade não ter variado (aproximadamente 1,0000 g), a redução do tamanho das partículas

acarreta em uma maior área de contato e menor porosidade, o que leva a um maior valor de densidade.

Este resultado corrobora os de Costa et al. (2007) e de Corrêa (2003) que observaram que, ao se aumentar o teor de água presente no bagaço, ocorre formação de grumos com aderência das partículas menores às maiores. Isto leva a inferir que, com o aumento do teor de água e a conseqüente formação de grumos, menor será o volume de bagaço para uma dada massa, com aumento subsequente da densidade aparente.

4.1.4.2 Densidade aparente sem separação granulométrica

Como o bagaço de cana é utilizado com um grande conteúdo de água e em operações em que este conteúdo varia, foi analisada a densidade do bagaço para cinco teores diferentes de água, a fim de validar os resultados obtidos no item 4.1.4.1.

No gráfico da Figura 15 observa-se a densidade aparente do bagaço de cana em função do conteúdo de água dos mesmos, determinado na faixa de 13% a 52% (b.u.). A Equação 37 corresponde ao ajuste obtido pela Figura 15. Esta equação apresentou um ajuste satisfatório, com R^2 igual a 0,8201.

$$\rho_{\text{bagaço}} = 646,82e^{(0.0024 X_a)} \quad (37)$$

Os resultados de densidade aqui obtidos corroboraram os de Corrêa (2003), que também determinaram a densidade aparente do bagaço para diferentes teores de água e obtiveram valores crescentes em função do conteúdo de água presente no mesmo. Nesta última análise e naquele trabalho, a determinação da densidade foi feita para uma amostra de bagaço de cana sem prévia separação granulométrica.

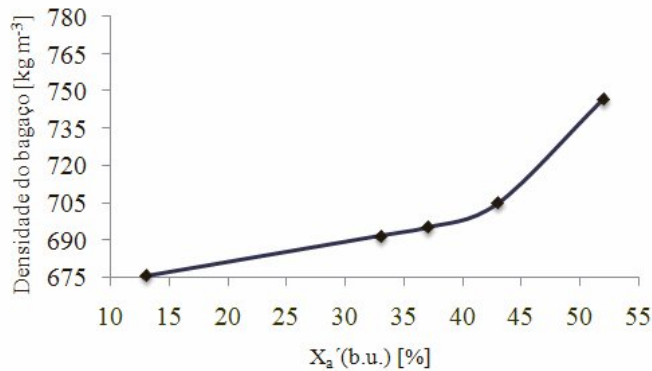


FIGURA 15: Densidade aparente do bagaço de cana em função do teor de água.

4.2 Fritura por imersão

Os testes de secagem do bagaço de cana por fritura de imersão foram realizados em três etapas. Os parâmetros utilizados em cada etapa foram definidos de acordo com as condições disponíveis para o alcance da metodologia empregada.

4.2.1 Primeira fritura de imersão

Nesta etapa, os ensaios de fritura foram realizados utilizando-se duas dimensões diferentes de bagaço de cana, escolhidas após análise granulométrica. A temperatura de secagem utilizada foi 150°C, em dois tipos de óleo utilizados como meio de aquecimento, sendo um óleo novo, da marca ABC, adquirido em supermercado local e outro óleo de soja reutilizado, cedido pelo restaurante universitário da Universidade Federal de Lavras. Os tempos empregados para fritura foram de 5, 15 e 30 segundos.

O resultado da análise granulométrica das amostras de bagaço utilizadas nos experimentos de secagem por fritura em óleo novo é apresentado na Tabela

4. As amostras utilizadas para o processo de fritura foram retidas nas peneiras de 2,36 e 0,60 mm (que correspondem, respectivamente, a 8 e 28 mesh, de acordo com a faixa Tyler), escolhidas por apresentarem dimensões distintas, caracterizadas, respectivamente, por fibras (formato cilíndrico) e partícula (formato de pó). Essas dimensões apresentaram frações mássicas representativas para realização da secagem por fritura nos três intervalos de tempo, em triplicata. Como as amostras obtidas em cada peneira foram reumidificadas (verificou-se, em ensaios preliminares, que ocorria perda do conteúdo de água do bagaço durante a agitação das peneiras), os teores de água relativos às massas retidas nas peneiras 8 e 28 mesh foram, respectivamente, 0,45 e 0,56 (b.u.). É importante notar que, conforme observado por Corrêa (2003), quase a totalidade da água presente do bagaço é superficial, inclusive nos dois teores de água citados neste parágrafo.

TABELA 4 Distribuição granulométrica do bagaço de cana com teor de água de 62% b.u. (Usina Luciânia).

Tyler [mesh]	Abertura [mm]	Fração mássica [%]	Diâmetro médio [mm]
– 4	4,75	12,00	4,75
– 4 + 8	2,36	14,52	3,55
– 8 + 14	1,20	31,01	1,78
– 14 + 28	0,60	41,81	0,90
– 28 + 35	0,42	0,51	0,51
– 35 + 48	0,30	0,14	0,36
– 48	0,00	0,02	0,15

As curvas de cinética de secagem para bagaço de cana com diâmetros médios de 3,55 e 0,90 mm, obtidas pelo processo de fritura a 150°C, são mostradas na Figura 16. Observa-se, nesta figura, que o efeito das dimensões do bagaço é mais evidente no tempo final da fritura. A taxa de secagem de um material de partículas menores tende a ser maior, pois a área de transferência de calor e massa é maior para partículas menores.

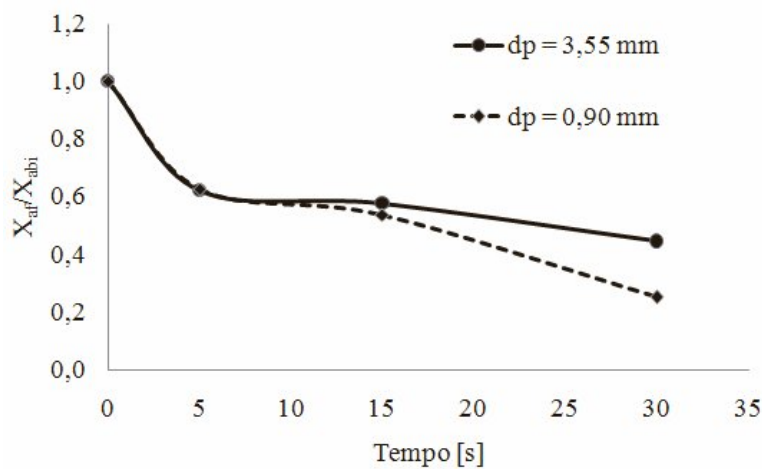


FIGURA 16: Curva de secagem de bagaço de cana por fritura, em dimensões diferentes das partículas de bagaço.

O gráfico da Figura 17 representa a curva de incorporação de óleo no bagaço pelo processo de fritura, para as duas dimensões de bagaço utilizadas. A proporção máxima de óleo incorporada pelo bagaço ao se obter teor de água nulo foi de 40% para o bagaço com diâmetro médio de 3,55 mm e de 46% para o bagaço com 0,90 mm de diâmetro médio.

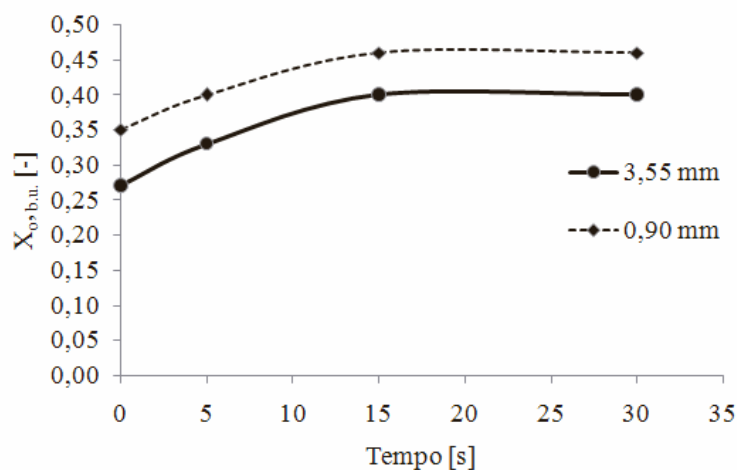


FIGURA 17: Teor de óleo durante a fritura de bagaço de cana com dimensões de 3,55 e 0,90 mm.

De acordo com Gamble et al. (1987), o óleo incorpora-se ao produto durante o processo de fritura à medida que a água é evaporada. Para fritura de alimentos, quando o vapor de água sai, provoca fissuras e deixa espaços vazios na superfície dos sólidos que, por diferença de pressão, acabam sendo preenchidos pelo meio de fritura, que é o óleo.

Esta incorporação também pode ser devido à propriedade altamente hidrofóbica de biomassas em geral, somada à sua elevada porosidade, que desenvolve uma força capilar no sentido da adsorção de óleos. Silva et al. (2007) observaram, por meio de microscopia eletrônica, a existência de superfícies porosas no bagaço de cana. Tal grau de porosidade contribuiu para a elevada incorporação de óleo pelo bagaço. Dada esta característica, foram publicados, recentemente, trabalhos citando a utilização do bagaço de cana como bioadsorvente de contaminantes compostos por hidrocarbonetos apolares (Santos et al., 2007; Silva et al., 2007; Brandão, 2006).

Comparando-se as Figuras 16 e 17, verifica-se que há uma relação inversamente proporcional entre a incorporação de óleo e a perda de umidade, em função do tempo do processo de fritura. Na Figura 18 esta relação está representada de maneira mais explícita, tendo sido observada em outros trabalhos de secagem por fritura, como os de Corrêa & Rudolph, (2007), Silva et al. (2003) e Gamble et al. (1987) que trabalharam, respectivamente, com fritura de bagaço de cana, cilindros de lodo de esgoto e batata. Nos dois últimos trabalhos citados, a proporção máxima de óleo observada ao se ter teor de umidade nulo foi, no máximo, de 35%. Corrêa et al. (2007) obtiveram valores máximos de 70%.

Acredita-se que a diferença entre os resultados obtidos pelos últimos autores que trabalharam com o mesmo tipo de material venha do tipo de umidade contida no bagaço. Também vale lembrar que o teor de água inicial de cada material estudado corresponde a valores diferentes entre si e que o conteúdo de água do bagaço de cana corresponde à umidade superficial.

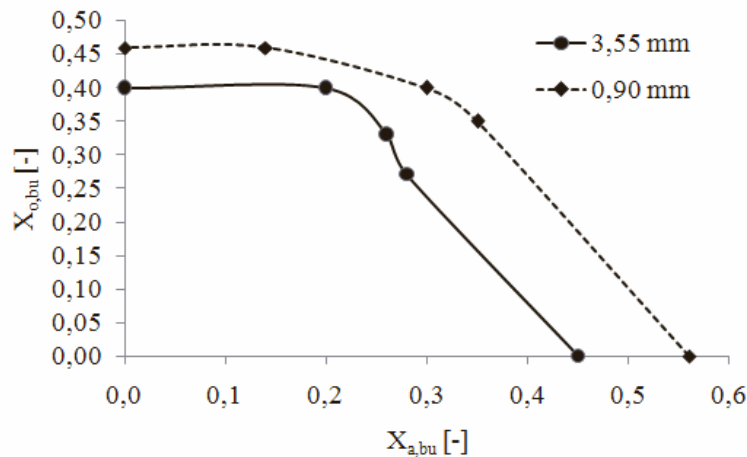


FIGURA 18: Óleo incorporado em função do teor de água do bagaço com dimensões de 3,55 e 0,90 mm.

Conforme Peregrina et al. (2006), o óleo tende a se acomodar nos sítios anteriormente ocupados pela umidade. Dessa forma, o óleo tende a permanecer superficialmente nas partículas de bagaço, predominando a adsorção de óleo com relação à absorção do mesmo. Outro fator que deve ser observado é que, neste trabalho, utilizou-se um material particulado com separação granulométrica e os casos presentes na literatura são sobre sólidos de maiores dimensões.

De acordo com os dados da Tabela 5, as variáveis analisadas e as interações entre si mostraram-se inexpressivas nos ensaios de secagem por fritura com relação à perda do teor de água do bagaço.

TABELA 5: Análise de variância do teor de água do bagaço de cana (variáveis: tipo de óleo-dimensão-tempo)

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr<Fc
Tipo de óleo	1	0,007500	0,007500	1,969	0,2956
Dimensão	1	0,022533	0,022533	5,917	0,1355
Tempo	2	0,061550	0,030775	8,081	0,1101
Tipo de óleo x dimensão	1	0,000533	0,000533	0,140	0,7442
Tipo de óleo x tempo	2	0,027950	0,013975	3,670	0,2142
Tipo de óleo x dimensão x tempo	2	0,003617	0,001808	0,475	0,6780
Erro	2	0,007617	0,003808	-----	-----
Total corrigido	11	0,131300	-----	-----	-----
CV (%)	12,72	-----	-----	-----	-----
Média geral	0,485	Número de observações: 12			

*Nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Pelos dados da Tabela 5 verifica-se que não houve diferença significativa nos resultados de fritura obtidos com óleo novo e óleo reutilizado. Estes resultados corroboraram o trabalho de Silva (2003), que utilizou gordura de palma (fornecido direto pelo fabricante) e óleo de soja (descartado de um restaurante), empregados como meio de fritura de lodo de esgoto. Os resultados obtidos naquele trabalho permitiram inferir que meios de fritura não influenciaram na taxa de secagem do resíduo. Dessa forma, decidiu-se dar seqüência ao experimento utilizando-se somente o óleo de soja reutilizado.

4.2.2 Segunda fritura de imersão

Neste item, os ensaios de fritura de imersão foram feitos em bagaço sem prévia separação granulométrica, em óleo de soja reutilizado, às temperaturas de 110° e 140°C, para cinco intervalos de tempos.

4.2.2.1 Teor de água

De acordo com os dados da Tabela 6, observa-se que apenas a variável tempo mostrou-se influente nos ensaios de secagem por fritura com relação à perda do teor de água do bagaço. A influência da temperatura foi inexpressiva.

TABELA 6: Análise de variância do teor de água do bagaço de cana (variáveis: temperatura-tempo).

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr<Fc
Temperatura	1	0,002838	0,002838	0,790	0,3847
Tempo	4	0,073653	0,018413	5,124	0,0050*
Temperatura x Tempo	4	0,006466	0,001617	0,450	0,7713
Erro	20	0,071866	0,003593		
Total corrigido	29	0,154824			
CV (%)	19,57				
Média geral	0,3063	Número de observações: 30			

* Nível de significância de 5% ($p < 0,05$)

Pelo gráfico da Figura 19 observa-se que o teor de água do bagaço diminuiu linearmente com o passar do tempo. Para cada unidade de tempo, a diminuição no teor de água foi de -0,0007, conforme a Equação 39. Esta equação corresponde à média das temperaturas aqui utilizadas e apresentou um ajuste linear de 0,9130.

$$X'_a = -0,041 * t + 0,508 \quad (39)$$

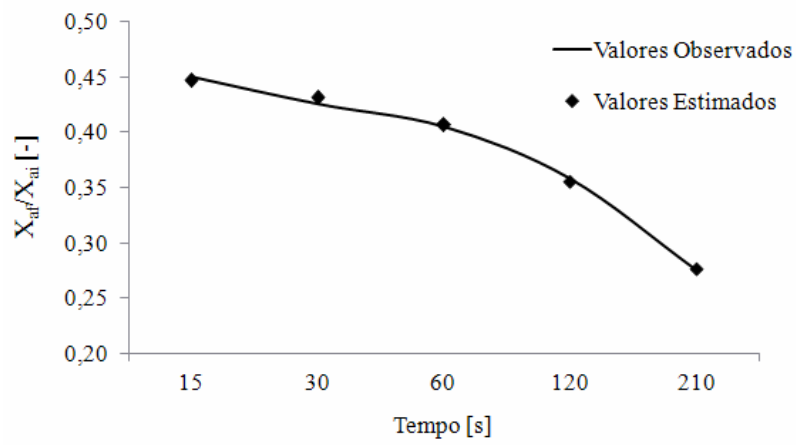


FIGURA 19: Cinética de secagem para a fritura de imersão do bagaço de cana.

4.2.2.2 Teor de óleo

O teor de óleo incorporado foi obtido de acordo com o item 3.3.2.

No gráfico da Figura 20 observa-se a incorporação de óleo no bagaço, para as temperaturas de 110° e 140°C, no processo de secagem. Pode-se observar que houve significativa incorporação de óleo pelo bagaço de cana.

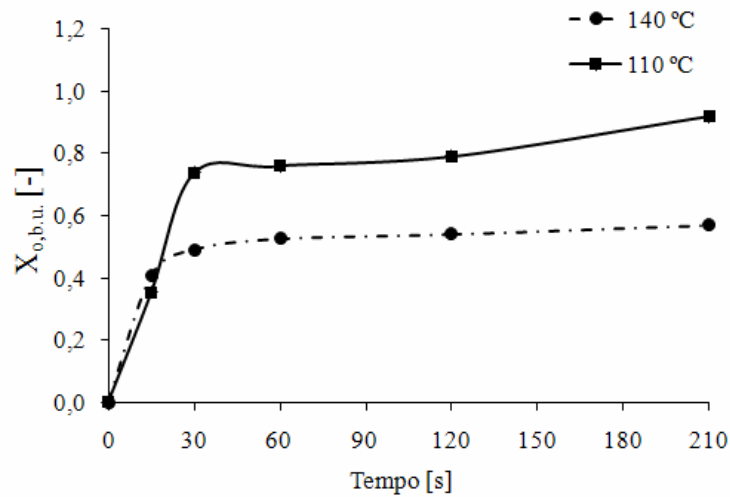


FIGURA 20: Curva de incorporação de óleo na secagem de bagaço de cana por fritura, nas temperaturas de 110°C e 140°C.

Da mesma forma que procedeu na primeira fritura por imersão, a incorporação de óleo pelo bagaço pode ser explicada devido à característica hidrofóbica associada à elevada porosidade das biomassas, conforme verificado por Silva et al. (2007). Comparando-se os gráficos das Figuras 19 e 20, verifica-se que existe uma relação entre o teor de água perdido pelo bagaço e a quantidade de óleo incorporada. Na Figura 21, esta relação é apresentada de maneira mais explícita.

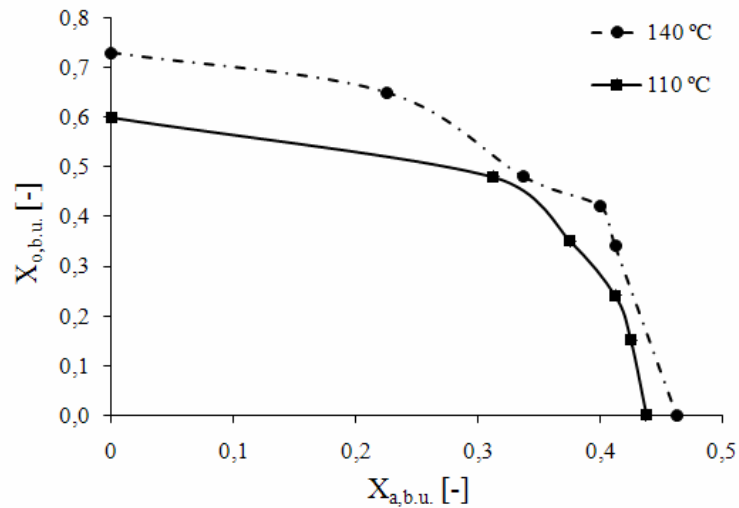


FIGURA 21: Curva de incorporação de óleo em função do teor de água do bagaço de cana nas temperaturas de 110°C e 140°C – Método Soxhlet.

Pela Figura 21, verifica-se que a proporção máxima de óleo observada ao se obter teor de água nulo foi de 60,00% para a temperatura de 110°C e de 73,00% para a temperatura de 140°C. Os resultados obtidos aqui corroboram os trabalhos de secagem por fritura de resíduos (Silva et al., 2005; Corrêa & Rudolph, 2007), conforme citado no item 4.2.1.

4.2.2.3 Poder calorífico

O poder calorífico do bagaço de cana foi obtido de acordo com o item 3.3.4. A curva de poder calorífico inferior obtida pela análise do bagaço frito pode ser observada na Figura 22. As amostras analisadas se encontravam sob as mesmas condições utilizadas no processo de secagem por fritura, com temperaturas de 110° e 140°C, óleo reutilizado e tempos de 15, 30, 60, 120 e 210

segundos. Também foi determinado o poder calorífico para amostras de bagaço de cana úmido e seco. A amostra de bagaço seco possuía teor de água de 8% (b.u.) e as amostras úmidas teor de água variando de 40% a 56% (b.u.). Para cada amostra foram realizados dois ensaios de determinação de poder calorífico.

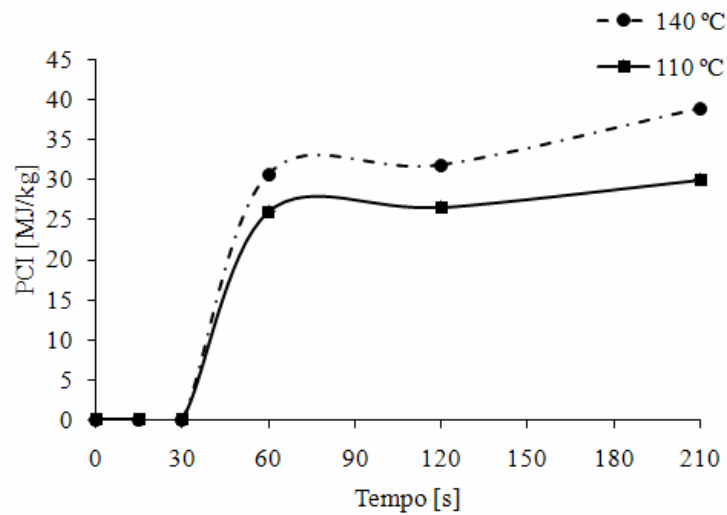


FIGURA 22: Variação do poder calorífico do bagaço de cana durante a fritura.

O bagaço como combustível tem a vantagem de ser renovável aliada ao fato de ter baixo teor de cinzas e uma quantidade ínfima de enxofre, embora apresente baixo poder calorífico quando comparado com outros combustíveis. Entretanto, após o processo de fritura, o bagaço de cana atinge valores proeminentes que proporcionam alta eficiência na queima. A incorporação de óleo ao bagaço durante o processo eleva o seu valor energético na ordem de 40 MJ/kg, valor próximo ao poder calorífico do óleo diesel.

Outros autores (Aralde et al., 1993; Ramos et al., 2003) também obtiveram valores de poder calorífico do bagaço de cana e cujos resultados são apresentados na Tabela 7, para a comparação com os dados experimentais aqui obtidos.

TABELA 7: PCI e Teor de água do bagaço de cana caracterizado por diversos autores.

Autores	Teor de água (b.u) [-]	Fritura	PCI [MJ/kg]
Aralde et al., (1993)	–	Não	9,18
Uchôa (2005)	50%	Não	7,74
Ramos et al., (2003)	50%	Não	7,74
Este trabalho	45%	Não	2,26
	8%	Não	18,20
	14%	Sim	30,86
	30%	Sim	30,81
	35%	Sim	30,67

Foi possível observar que o processo de secagem teve efeito satisfatório para utilização do bagaço como combustível. Naqueles trabalhos, a média dos valores energéticos variou de 4,25 a 9,18 MJ/kg, para bagaços com teores de água de 50% em base úmida, conteúdo ao qual este produto sai das moendas.

Neste trabalho, para o bagaço com teor de água de 8% (b.u.), verificou-se que houve um aumento significativo no seu poder calorífico, traduzindo em um maior rendimento para a sua combustão. Por conseguinte, à medida que o teor de água diminui, o poder calorífico aumenta, devido à evaporação da água

presente no material que consome parte do calor produzido para sua queima. A mesma análise também foi feita por Silva et al. (2005) que determinaram o poder calorífico do lodo frito como combustível e obtiveram valores na ordem de 24 MJ/kg.

Para análise energética das amostras fritas, observou-se que, durante os ensaios na bomba calorimétrica, o alto teor de água impediu a autocombustão da amostra. Dessa forma, não foi possível notificar o valor energético em amostras com tempo de fritura menor que 30 segundos (Figura 22). Entretanto, o bagaço de cana frito alcançou valores relevantes para ser utilizado como combustível (38,86 MJ/kg para a temperatura de 140°C e 29,94 MJ/kg, na temperatura de 110°C), devido à significativa incorporação de óleo. O óleo de soja possui poder calorífico aproximado de 40,00 MJ/kg (Moreira et al., 2005). Portanto, quando este adere ao material sólido, o valor energético do bagaço aumenta, chegando a valores próximos ao valor energético do óleo de soja, tornando-se possível caracterizá-lo como um potencial biocombustível sólido. Seu uso pode ser interessante em situações em que seja necessário um material sólido de alto poder calorimétrico em volume reduzido, como em lareiras domésticas.

4.2.3 Terceira fritura de imersão

4.2.3.1 Teor de água

Os ensaios foram realizados utilizando-se três dimensões diferentes de bagaço de cana, escolhidos após análise granulométrica. Na Tabela 8 é apresentado o resultado da análise granulométrica das amostras de bagaço utilizadas nos experimentos de secagem por fritura. As amostras utilizadas para o processo de fritura foram retidas nas peneiras de 4, 14 e 28 mesh, de acordo com a faixa Tyler, escolhidas por apresentarem dimensões distintas,

caracterizadas, respectivamente, por fibras (formato cilíndrico) e partícula (formato de pó).

TABELA 8: Distribuição granulométrica do bagaço de cana.

Faixa Tyler [mesh]	Abertura [mm]	Fração mássica [%]	Diâmetro médio [mm]
- 4	4,75	25,50	4,75
- 4 + 8	2,36	8,37	2,36
- 8 + 14	1,20	39,60	1,20
- 14 + 28	0,60	25,68	0,60
- 28 + 35	0,42	0,68	0,42
- 35 + 48	0,30	0,12	0,30
- 48	0,00	0,04	0,00

O bagaço retido nas peneiras com diâmetro médio de 4,75 mm, 1,20 mm e 0,60 mm apresentou frações mássicas representativas para a realização da secagem por fritura nos cinco intervalos de tempo, em duplicata. Como as amostras obtidas em cada peneira foram reumidificadas, os teores de água relativos às massas retidas nas peneiras 4, 14 e 28 mesh foram, respectivamente, de 0,73; 0,71 e 0,75 (b.u.), para as temperaturas de 130°C e 0,68; 0,77 e 0,85 (b.u.), para a temperatura de 160°C.

De acordo com os dados da Tabela 9, apenas as variáveis tempo e dimensões do bagaço mostraram-se influentes nos ensaios de secagem por fritura com relação à perda do teor de água do bagaço. A influência da temperatura e as interações entre as respectivas variáveis mostraram-se inexpressivas.

TABELA 9: Análise de variância do teor de água do bagaço de cana (variáveis: temperatura-dimensão-tempo).

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr<Fc
Temperatura	1	0,000009	0,000009	0,001	0,9813
Dimensão	2	0,098829	0,049415	3,195	0,0552*
Tempo	4	0,753263	0,188316	12,177	0,0000*
Temperatura x dimensão	2	0,047647	0,023824	1,540	0,2308
Temperatura x tempo	4	0,065476	0,016369	1,058	0,3941
Dimensão x tempo	8	0,027419	0,003427	0,222	0,9842
Temperatura x dimensão x tempo	8	0,034314	0,004289	0,277	0,9684
Erro	30	0,463950	0,015465		
Total corrigido	59	1,490908			
CV (%)	23,93				
Média geral	0,5197	Número de observações: 60			

* Nível de significância de 10% ($p < 0,01$).

Pelo gráfico da Figura 23 observa-se que o teor de água do bagaço diminuiu com o passar do tempo. A Equação 40 apresenta o ajuste quadrático obtido da curva de cinética de secagem (Figura 23). Esta equação apresentou um coeficiente de correlação de 0,9965.

$$X_a' = -0,00005t^2 - 0,0026t + 0,6633 \quad (40)$$

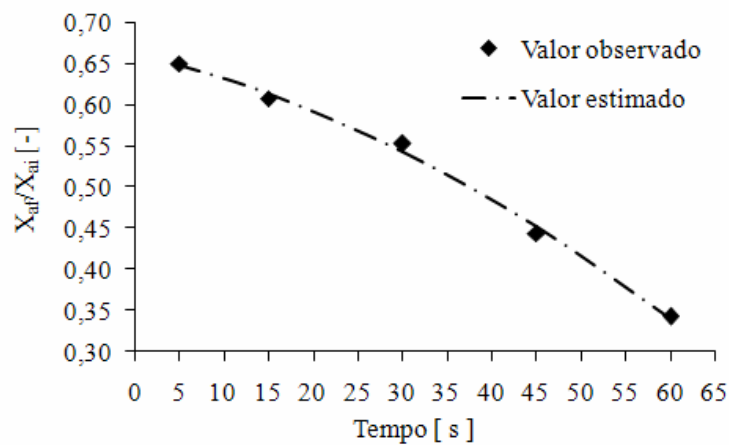


FIGURA 23: Cinética de secagem para a fritura por imersão do bagaço de cana.

Pelo gráfico da Figura 24 pode-se observar que houve uma diminuição do teor de água do bagaço, em função da redução do tamanho das partículas. O ajuste linear obtido para as três dimensões de bagaço utilizadas foi representado na Equação 41, obtida por meio da regressão linear, apresentando um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9702.

$$y = - 0,0041x + 0,5827 \quad (41)$$

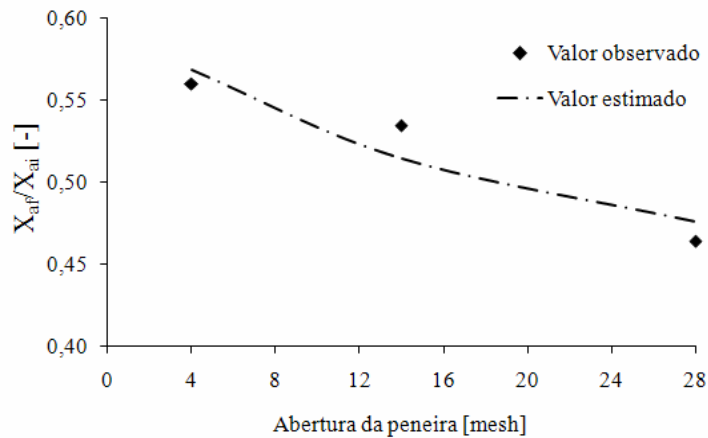


FIGURA 24: Influência do teor de água do bagaço de cana, em função das dimensões de bagaço de cana.

É importante notar que o diâmetro médio das partículas de bagaço é inversamente proporcional à abertura da peneira, de acordo com o padrão Tyler. Verificou-se que o maior conteúdo de bagaço retido na peneira de abertura de 28 mesh foi caracterizado como partículas de pó de bagaço. A redução do tamanho das partículas acarreta uma maior área de contato e menor porosidade, o que leva a uma maior perda do conteúdo de água presente no material, conforme se observa no gráfico na Figura 24.

4.2.3.2 Teor de óleo

Os gráficos das Figuras 25 e 26 mostram, respectivamente, a incorporação de óleo no bagaço para as temperaturas de 130° e 160°C no processo de secagem. Pode-se observar que houve uma significativa incorporação de óleo pelo bagaço de cana e que o incremento da temperatura

durante a secagem resultou em maior incorporação de óleo pelo bagaço, para as mesmas faixas granulométricas utilizadas.

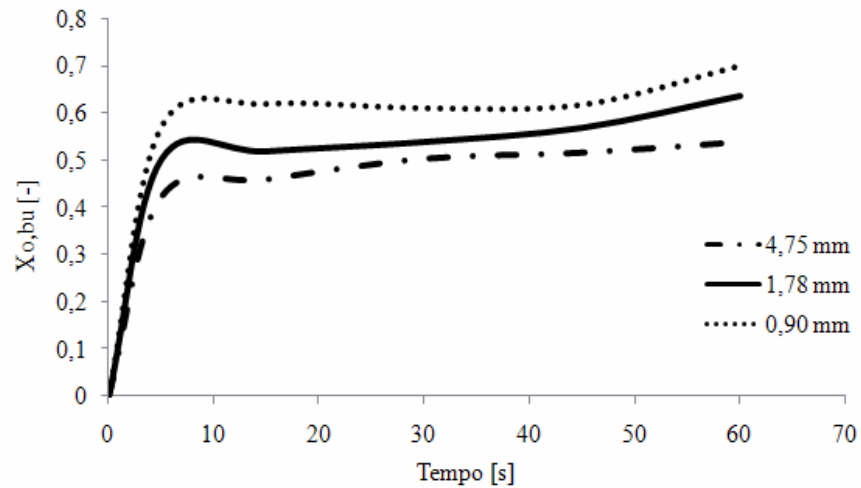


FIGURA 25: Curva de incorporação de óleo na secagem de bagaço de cana por fritura, na temperatura de 130°C, em tamanhos diferentes das partículas de bagaço.

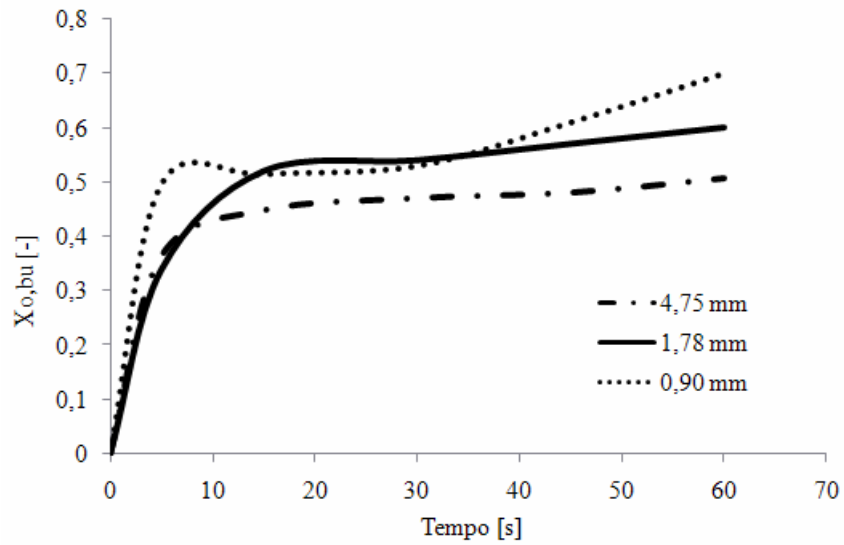


FIGURA 26: Curva de incorporação de óleo na secagem de bagaço de cana por fritura na temperatura de 160°C, em tamanhos diferentes das partículas de bagaço.

4.3 Secagem por leito fixo

O bagaço de cana fornecido pela Usina Luciânia apresentava teor de água inicial de 46,0%±2,0% (b.u.). Os dados experimentais de secagem foram ajustados utilizando diversos modelos. Os parâmetros obtidos de acordo com tais modelos encontram-se na Tabela 10.

TABELA 10: Modelos matemáticos ajustados para a secagem de bagaço de cana em leito fixo, nas temperaturas de 50°, 60° e 70°C.

Equação	Constantes	50°C	60°C	70°C
Newton	k	0,084785	0,099209	0,138714
	R ²	0,92273	0,99988	0,92639
	SE	0,00461	0,00448	0,00437
Page (1949)	k	0,012002	0,014503	0,017706
	n	1,755319	1,779354	1,960761
	R ²	0,99611	0,99999	0,99865
	SE	0,00232	0,00210	0,00008
*Page modificado 1 (1949)	-----	-----	-----	-----
* Page modificado 2 (1949)	k	0,080491	0,092628	1,01E-05
	n	1,755319	1,779354	5,18E-10
	R ²	0,99999	0,99655	-----
	SE	0,00232	0,00210	0,06026
Henderson & Pabis (1961)	a	1,170492	1,175341	1,193599
	k	0,098122	0,114371	0,160387
	R ²	0,95056	0,95241	0,95220
	SE	0,00295	0,00290	0,00284

“... continua...”

“TABELA 10, Cont.”

Logarítmica	a	1,523805	1,35218	1,247573
	k	0,049851	0,072693	0,132021
	c	-0,43327	-0,24005	-0,0849
	R ²	0,98881	0,98155	0,96605
	SE	0,00067	0,00112	0,00202
Dois termos	a	0,585201	0,587672	0,5968
	k ₀	0,098122	0,114371	0,160387
	b	0,58529	0,587669	0,5968
	k ₁	0,098122	0,114371	0,160387
	R ²	0,99992	0,95241	0,99992
	SE	0,0029	0,0098	0,0028
Dois termos exponencial	a	0,99995	2,145875	0,999875
	k	0,084785	0,161989	0,138714
	R ²	0,92273	0,99998	99,988%
	SE	0,0046	0,0008	0,0044
Wang & Singh (1978)	a	-0,05848	0,07078	-0,09587
	b	0,00075	0,001206	0,002191
	R ²	0,98533	0,99997	0,99996
	SE	0,0009	0,0011	0,0016

“... continua...”

“TABELA 10, Cont.”

Aproximação por difusão	a	-57,0699	-49,8203	-76,0656
	k	0,190661	0,222836	0,324092
	b	0,980363	0,977029	0,983092
	R ²	0,98922	0,99998	0,99999
	SE	0,0006	0,0006	0,0004
Verma & Shukla (2000)	a	-20,0699	-21,4959	-21,8702
	k	0,018833	0,031632	0,065901
	k ₁	0,020767	0,033545	0,06811
	R ²	0,98214	0,99996	0,99993
	SE	0,0029	0,0029	0,0028
Modificado de Henderson & Pabis (1961)	a	0,389988	0,257075	0,397867
	k	0,098122	0,114371	0,160387
	b	0,390228	0,256962	0,397866
	k ₀	0,098122	0,114371	0,160387
	c	0,390276	0,661304	0,397867
	k ₁	0,098122	0,114371	0,160387
	R ²	0,95056	0,99992	0,99992
SE	0,0011	0,0016	0,0028	

“... continua...”

“TABELA 10, Cont.”

	a	0,175873	0,259014	0,17632
	k	8,19E-09	-0,36037	-0,29108
Midilli et al.,(2002)	n	6,77497	0,00000	0,00000
	b	0,894335	0,384965	0,628106
	R ²	0,98008	0,99875	0,99931
	SE	0,0012	0,0469	0,0260

* Ajustes não obtidos.

Entre os modelos matemáticos utilizados, verificou-se que o de Page (1949) foi o que obteve melhor ajuste aos dados experimentais. O gráfico da Figura 27 apresenta os dados experimentais de cinética secagem do bagaço de cana, para as temperaturas de 50°, 60° e 70°C e as curvas obtidas com o uso do modelo de Page (1949). Através da Figura 27 verifica-se que as taxas de secagem são proporcionais à temperatura utilizada no processo. Pode-se observar também o ótimo ajuste obtido pela equação de Page, anteriormente demonstrado pelo coeficiente de correlação e desvio padrão apresentados na Tabela 10.

Vijayaraj et al., (2006a), que também estudaram a secagem de bagaço de cana em leito fixo, constataram que o modelo de Page foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, obtendo coeficiente de correlação de 0,99627. No trabalho desses autores foram utilizadas temperatura do ar de 80° a 120°C, velocidade de 0,5 a 2 m/s e espessura do produto de 20 a 60 mm.

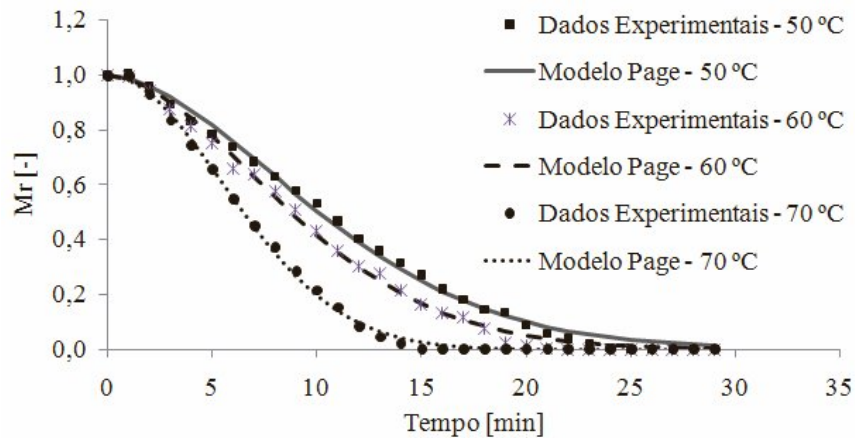


FIGURA 27: Valores experimentais e estimados pelo modelo de Page para a secagem de bagaço de cana, para temperaturas de 50°, 60° e 70°C.

4.4 Isoterma de dessorção

O bagaço de cana utilizado para os testes de isoterma de dessorção era procedentes da Usina Ester.

No gráfico da Figura 28 observa-se a relação entre os dados obtidos da isoterma de dessorção do bagaço para a temperatura de 50°C e os dados ajustados utilizando-se o modelo de Jaafar & Michalowski (1990), que foi o que obteve melhor ajuste entre os modelos de isoterma de sorção testados.

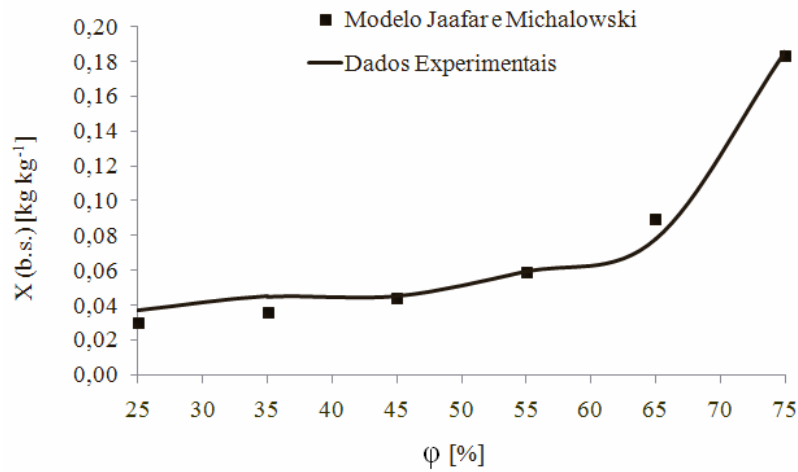


FIGURA 28: Isoterma de dessorção de bagaço de cana a 50°C.

Na Tabela 11 são mostrados os modelos matemáticos utilizados no ajuste das equações com os respectivos coeficientes e erro estimado para a curva de isoterma de dessorção do bagaço de cana, na temperatura de 50°C. Os ajustes foram selecionados com base no coeficiente de correlação (R^2) e no erro padrão da estimativa (SE), dado pelas equações 42 e 43, respectivamente. Consideraram-se ajustes em que R^2 fosse maior que 0,9825, para equações que não levam em consideração a pressão de vapor de saturação.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{PRED} - \overline{\text{OBS}})^2}{\sum_{i=1}^n (\text{OBS} - \overline{\text{OBS}})^2} \quad (42)$$

$$\text{SE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{OBS} - \text{PRED})^2}{n}} \quad (43)$$

em que OBS é o valor de cada observação; $\overline{\text{OBS}}$ é o valor médio das observações; PRED é o valor calculado e n é o número de observações.

TABELA 11 Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de isoterma de dessecção do bagaço de cana, a 50°C.

Modelos	Constantes					R ²	SE
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅		
Jaafar & Michalowski (1990)	-0,020	0,789	0,802	0,982	0,007	0,982	0,007
Hailwood & Horrobin (1946)	2,618	48,254	-0,571	-----	-----	0,981	0,007
Anderson & Hall (1948)	0,021	144,06	0,045	0,265	-----	0,981	0,007
Peleg (1993)	0,0001	2,632	-0,0001	2,631	-----	0,799	0,023
Huttig & Theimer (1950)	0,074	0,0004	-----	-----	-----	0,768	0,025
Caurie (1970)	0,005	-0,047	-----	-----	-----	0,877	0,029
Kühn (1964)	-1,314	0,4205	-----	-----	-----	0,473	0,037

“... continua...”

“TABELA 11, Cont.”

Polinômio de 5°	-96,83	4723,9	-4320	1145	42245	0,974	2,759
Harkins & Jura (1944)	4,389	0,002	-----	-----	-----	0,962	3,327
Halsey (1983)	3×10^{-5}	-15,47	-0,032	-----	-----	0,743	8,661

O resultado aqui obtido corrobora o de Corrêa et al. (2007) que ajustaram 40 modelos matemáticos de isotermas de sorção para dados experimentais de 53 produtos alimentícios, verificando que o melhor ajuste obtido foi o modelo para o modelo de Jaafar & Michalowski (1990).

5 CONCLUSÕES

As amostras de bagaço de cana das usinas Luciânia e Ester apresentaram maior percentual de passante acumulado na peneira com abertura 4,75 mm, entre as peneiras de abertura 0,6 e 1,2 mm e entre as peneiras de abertura 1,2 e 2,36 mm, que correspondem, respectivamente, às aberturas de 4, 14 e 28 mesh, de acordo com a série Tyler. A diferença de percentual retido nas peneiras ocorreu devido ao tipo de moenda e ao número de ternos presentes em cada moenda.

Observaram-se grande dispersão do tamanho de partículas de bagaço de cana e tendência do aumento do teor de fibras com o incremento do diâmetro médio das peneiras empregadas na análise granulométrica. Nas faixas granulométricas de diâmetro médio maior, verificou-se que o formato fibras predominou sobre o formato pó.

Com um maior teor de água, o bagaço apresenta-se aglomerado e com maior aderência às telas das peneiras, reduzindo a fração mássica em peneiras de menor abertura.

A densidade aparente mostrou-se dependente do tamanho das partículas de bagaço e do seu teor de água. Neste trabalho, observou-se que a densidade é inversamente proporcional ao tamanho das partículas de bagaço de cana e diretamente proporcional ao teor de água do mesmo.

Os altos valores de taxa de secagem e o baixo tempo total para a secagem podem ser atribuídos ao mecanismo dominante de transferência de calor, que se dá do interior para fora da partícula, fazendo com que a umidade superficial predominante no bagaço de cana inicie sua secagem imediatamente depois de iniciado o processo de fritura. As dimensões menores (partículas de pó) apresentaram maior superfície de contato e facilitaram o fenômeno de transferência de massa e calor durante o processo de secagem.

A fritura pode ser utilizada como um processo rápido de secagem, obtendo-se teores de água baixos, em pequenos intervalos de tempo.

A redução do teor de água e a incorporação de óleo pelo bagaço mostraram-se dependentes do tamanho das partículas e a incorporação de óleo durante o processo de fritura apresentou-se inversamente proporcional ao teor de água do bagaço. Houve um aumento do poder calorífico do bagaço de cana frito, o qual atingiu valores na ordem de 38,86 MJ/kg. Quanto mais úmido o bagaço, menor o seu poder calorífico inferior (PCI) e menor será a energia disponível para uma mesma quantidade de combustível.

O bagaço de cana frito, como combustível, tem apresentado um potencial promissor, apresentando a vantagem de possuir valor energético semelhante ao do óleo de soja e próximo ao do óleo diesel. Seu uso pode ser interessante em situações em que se necessite de um material sólido de alto poder calorimétrico em volume reduzido, como em lareiras domésticas.

Além disso, apresenta enorme contribuição ao meio ambiente pela redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental e também como fonte estratégica de energia renovável em substituição ao óleo diesel e outros derivados do petróleo.

Dentre os modelos de cinética de secagem testados, o modelo de Page (1949) foi o que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais de secagem de bagaço em leito fixo, para as temperaturas de 50°, 60° e 70 °C.

Para os testes de isoterma de dessorção de bagaço de cana, o modelo de Jaafar & Michalowski (1990) foi o que apresentou melhor ajuste para as umidades relativas de 25% a 75%, utilizando-se ar de secagem de 50°C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICANA SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **Annual book for ASTM standards** : construction materials & engineering. New York, NY, 1997. v. 40, p.679.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis**, 16. ed. Arlington: AOAC International, 2005, 932 p.

ANDERSON, R. B.; HALL, W. K. Sorption studies on american coals. **Journal of the American Chemical Society**, v. 70, n. 3, p. 1727-1734, June, 1948.

ARALDE, L. E.; VAZQUEZ, D. P.; CÁRDENAS, G. J. Analisis del funcionamiento de un prototipo para secado de bagazo. **Revista Industrial y Agrícola de Tucumán**, Argentina, Tomo, v. 70, n. 1/2, p.7-14, ene./dic. 1993.

ARLABOSSE, P. Etude des procédés de séchage des boues urbaines et industrielles. 2001. 184 p. Thèse. (Docteur en Sciences Appliquées) - Ecole des Mines d'Albi Carmaux & Association. R.E.C.O.R.D., Albi, France.

ATHANASE, W. **Optimisation d' un procede combine de dehydration osmotique couple a une operation de sechage par friture. Application a La production de chips d' ananas**. 1998.182 p. Dissertação. (Sciences de la Vie et de la Terre) - Ecole Pratique des Hautes Etudes , Centre de Coopération Internationale en Recherche Agrononique pour le Développement. Montpellier, France.

BAIK, O. D.; MITTAL, G. S. Heat and moisture transfer and shrinkage simulation of deep-fat tofu frying. **Food Research International**, v. 38, n. 2, p.183–191, Mar. 2005.

BARBOSA, R. D. **Secagem de Bagaço de Cana em Sistema Pneumático**. 1992. 223 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade Estadual de Campinas, São Paulo.

BLUMENTHAL, M. M. Rapid test for deterioration of frying oils. **Chemical Society**, Phoenix, Arizona, v. 106, n. 11, p.715-721, May 2004.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café** : a água nos frutos e nos grãos de café. Lavras: UFLA, 2008. 631 p.

BRANDÃO, P. C. **Avaliação do uso do bagaço de cana como adsorvente para a remoção de contaminantes, derivados do petróleo, de efluentes.** 2006. 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

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

BROSSARD, L. E. G.; CORTEZ, L. A.; BRAUNBECH, O. A.; LOMARDI E. A. Sistema de alimentação de biomassa polidispersa. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 2000, Campinas. **Anais...**Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, v. 3, n.1, 2000, p. 112-125.

CAURIE, M. J. Moisture sorption characteristics of milk burfi, an traditional Indian sweet, using sugar substitutes. **Food Technology**, v. 5, n. 1, p.301-307, Oct. 1970.

CELLA, R. C. F.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. Refined soybean oil performance in vegetable deep-fat frying. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 22, n. 2, p. 111-116, maio/ago. 2002.

CHEN, C. Factors which effects equilibrium relative humidity of agricultural products. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 43, n. 3, p. 673-683, May 2000.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA-DE-AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Cana-de-açúcar.** São Paulo, 2008.

Disponível em:

http://www.copersucar.com.br/institucional/por/academia/cana_acucar.asp>.

Acesso em: 12 fev. 2008.

CORRÊA, J. L. G.; BORGES, S.V.; NASCIMENTO, F. R. Isotermas de secagem de insumos alimentícios. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 33, 2007, Aracaju, SE. **Anais...** Aracaju, SE, 2007. 8 p..

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

CORRÊA, J. L.G.; GRAMINHO, D.R.; SILVA, M. A.; NEBRA, S. A. The cyclonic Dryer : a numerical and experimental analysis of the geometry on

average particle residence time. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 21, n.1, p.103-112, Jan./Mar. 2004.

CORRÊA, J. L.G.; RIOS, M.T.T.; NEBRA, S.A. Sugar cane bagasse characterization and a feeder study. In: NATIONAL CONFERENCE OF MECHANICAL ENGINEERING, 14., 2000, Natal. **Anais...** Natal, RN, 2000. p. 251-258.

CORRÊA, J. L. G.; RUDOLPH, V. Secagem de bagaço de cana por fritura de imersão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODIESEL, 4., 2007, Varginha, MG. **Anais...** Lavras: UFLA, 2007. p.346-354.

CORSINI, M. S.; JORGE, N. Estabilidade oxidativa de óleos vegetais utilizados em frituras de mandioca palito congelada. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 26, n.1, p. 27-32, jan./mar. 2006.

COSTA, J. M. G.; CORRÊA, J. L. G.; HIROTA, M. L.; BATISTA, G. Z.; PEREIRA, D. N. Estudo da secagem do bagaço de cana através de fritura por imersão com diferentes granulometrias. In: CONGRESSO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA UFLA, 16., 2007, Lavras. **Anais...** Lavras, MG, 2007. p.1-6.

COSTA, J. M. G.; CORRÊA, J. L. G.; SANTOS, J. C. P.; AZEVEDO, V. M. Caracterização do bagaço de cana. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 17., 2008, Recife, PE. **Anais...** Recife, PE, 2008. p.1-6.

COSTA, R. M.; OLIVEIRA, F. A. R.; DELANEY, O.; GEKAS, V. Analysis of the heat transfer coefficient during potato frying. **Journal of Food Engineering**, London, v. 39, n. 3, p.293-299, Feb. 1999.

ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A.; LOZANO, M. A.; SERRA, L. M. Analysis of cogeneration systems in sugar cane - Factories alternatives of steam and combined cycle power plants.. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL CONFERENCE ON EFFICIENCY, COST, OPTIMIZATION, SIMULATION, AND ENVIRONMENTAL IMPACT OF ENERGY SYSTEM, 19., 2006, Aghia Pelagia, Crete, Greece. **Anais...** Aghia Pelagia, Crete, Greece, 2006. v. 3, p.1177-1184.

FARKAS, B. E.; HUBBARD, L. J. Analysis of convective heat transfer during immersion frying. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 18, n. 6, p.1269-1285, July 2000.

FARKAS, B. E.; SINGH, R.P.; RUMSEY, T.R. Modelling heat and mass transfer in immersion frying I, model development. **Journal of Food Engineering**, London, v. 29, n. 2, p.211-226, Ago. 1996a.

FARKAS, B. E.; SINGH, R. P.; RUMSEY, T. R. Modelling heat and mass transfer in immersion frying II, model solution and verification. **Journal of Food Engineering**, London, v. 29, n. 2, p.227-248, Ago. 1996b.

FERREIRA, D. F. **Programa Sisvar - Sistema de Análises de variância** : versão 5.0. 1999-2007. Lavras: UFLA, 2007.

FORTES, M.; FERREIRA, D.A.; FERREIRA, W.R.; SOUZA, A. C. Modelagem de um condicionador de ar de alta pressão para uso em processamento agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p.578-589, maio/ago. 2006.

FOUST, A. S. **Princípios das operações unitárias**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1982. p. 617-620.

GAMBLE, M. H.; RICE, P.; SELMAN, J. D. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. Tubers. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 22, n. 3, p. 233-241, July 1987.

HAILWOOD, A. J.; HORROBIN, S. S. Adsorption of water by polymers : analysis in terms of a simple model. **Transactions of the Faraday Society**, v. 42, n. 84, 1946.

HALSEY, G. J. Physical adsorption on non-uniform surfaces. **Journal of Chemical Physical**, v. 16, n. 10, p. 931-937, Sept. 1933.

HARKINS, W.; JURA, G. Surface of solids. X. Extension of the attractive energy of a solid into an adjacent liquid or film, the decrease of energy with distance, and the thickness of films **Journal American Chemical Society**, Chicago, United States, v. 66, n. 6, p.919-927, June 1944.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I : temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe, v. 6, n. 3, p.169-174, 1961.

HUGOT, E. **Manual para ingenieros azucareros (La sucrerie des cannes)**. México: Compañía Editorial Continental, 1964. p. 617-625.

HUTTIG, G. F.; THEIMER, O. Zur theorie der adsorption I. **Colloid & Polymer Science**, Berlin, Heidelberg, v. 119, n. 2, p. 69-73, Nov. 1950.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção Agrícola 2007**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/textolspa022007.pdf>>. Acesso em: 7 mar. 2008.

INSTITUTO CUBANO DE PESQUISADORES DE DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR.. **Manual de los derivados de la cana de azucar : bagazo**. 2. ed. México: Cuban Institute of Research on Sugarcane, 1990. 474 p.

INSTITUTO CUBANO DE PESQUISADORES DE DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR.. **Manual dos derivados da cana-de-açúcar : diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço, derivados do melaço, outros, energia**. Brasília, 1999, 474 p.

JAAFAR, F.; MICHALOWSKI, S. Modified BET equation for sorption/desorption isotherms. **Drying Technology**, New York, v. 8, n. 4. p.811-827, 1990.

JAIS, P. C. **Regulagem das moendas**. 2007. Disponível em: <<http://www.sugarsoft.com.br/moenda2.htm>> Acesso em: 17 maio 2008.

JANK, M. S. Cana-de-açúcar : o novo paradigma da energia limpa e renovável. União da Industria de cana-de-açúcar. **Boletim técnico**, São Paulo. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/opiniaio/show.asp?msgCode={388F00C1-93A1-4752-842F-DEE18769F62E}>> 2007. Acesso em: 10 jan. 2008.

JAYAS, D. S.; MAZZA, G. Equilibrium moisture characteristics of safflower seeds. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 34, n. 5, p.2099-2103, June 1991.

- JORGE, N.; SOARES, B. B. P.; LUNARDI, V.M.; MALACRIDA, C. R. Alterações físico-químicas dos óleos de girassol, milho e soja em frituras. **Revista Química Nova**, v. 28, n. 6, p. 947-951, 2005.
- JUNQUEIRA, M. O Brasil é líder em projetos de carbono. **Jornal Gazeta Mercantil**, São Paulo, SP, 07 de abril, 2006, p 3-3.
- KOZEMPEL, M. F. Correlation of moisture and oil concentration in french fries. **Journal of Food Science and Technology**, Philadelphia, v.24, n.3, p.445-448, march, 1991.
- KÜHN, I. Adsorption isotherms **Journal of College Science**, Japan, Tokyo, v.19, n.1, p.685-698, 1964.
- KUROZAWA, L. E.; EL-AOUAR, A. A.; MURR, F. E. X. Obtenção de isotermas de dessecamento de cogumelo in natura e desidratado osmoticamente. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 25, n. 4, p. 828-834 out./dez. 2005.
- LABUZA, T. P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, v. 22, n. 3, p. 263-272, 1986.
- LEMAIRE, H.; REYNES, M.; NGALANI, J.; TCHANGO, T.; GUILLAUMONT, A. Aptitude à la friture de cultivars de plantains et bananes à cuire. **Fruits**, Lion, France, v. 52, p. 273-282, July 1997.
- MASSARANI, G.; VALENÇA, G. C. Secagem de bagaço de cana. In: ENCONTRO NACIONAL DE SECAGEM, 3., 1981, Viçosa. **Anais...** Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1981. v. 1, p.355-361.
- MARQUES, M. O. **Extração do caldo**. FCAVJ/UNESP. Disponível em: <<http://www.fcav.unesp.br/omir/aulastaa/aulasacucar/aulaacucar4c.pdf>> Acesso em: 14 maio 2008. Notas de aula.
- MEDEIROS, J. L.; MASSARANI, G. Secagem de bagaço de cana III. In: ENCONTRO SOBRE MEIOS POROSOS, 10., 1982, São Carlos, SP. **Anais...** São Carlos, SP, 1982. v.1, p. 222-241.
- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 20, n. 7, p.1503–1513, 2002.

MITTELMAN, A. N.; MIZRAHI, S.H.; BERK, Z. Heat and mass transfer in frying. In: MCKENNA, B.M. (Ed.). **Engineering and food**. North Carolina: State University, Raleigh, Elsevier Applied Science, 1984. chap. 12, 654 p.

MOHAN, R. **Desenvolvimento de bioprocessos : bagaço de cana-de-açúcar como suporte alternativo na fase de enraizamento e aclimação de plântulas de macieira, morangueiro e cafeeiro**. 2005. 129 p. Tese (Doutorado em Processos Biotecnológicos) - Universidade Federal do Paraná, Paraná.

MOHSENIN, N. R. **Physical properties of plant and animal materials**. 2. ed. New York: Gordon, 1970. p.101-103.

MONTEIRO NETO, A. Q.; ANDRADE, J. C. L.; JUCÁ, W.; CAVALCANTE, C. R. R.; BOAS, H. V. **O novo ciclo da cana : estudo sobre a competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar e prospecção de novos empreendimentos**. Brasília: IEL/INC; SEBRAE, 2005. 337 p.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying : principles, classification, and selection of dryers**. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.1287 p.

NEBRA, S. A.; MACEDO, I. C. Bagasse particle shape and size and their free-setting velocity, **International Sugar Journal**, United Kingdom v. 90, p.168-170, 1988.

NEBRA, S. A. **Secagem pneumática de bagaço de cana**. 1985. 129 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, Campinas.

NÚCLEO DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA.; SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **Caderno 02: biocombustíveis**. Brasília, n. 2, jul. 2004. Disponível em: <http://www.nae.gov.br/site/>. Acesso em: 10 set. 2007.

OLIVEIRA, J. G. **Perspectivas para cogeração com bagaço de cana-de-açúcar : potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista**. 2007. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

OREOPOULOU, V.; KROKIDA M.; MARINOS-KOURIS D. Frying of food. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. cap.52, p. 1225-1244.

PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer.** 1949. 103 p. Thesis (Physical doctor) – Purdue University, Indiana.

PAIVA, S. M. E.; NEBRA, S. A.; GALLO, W. L. R. Análise exergética comparativa de sistemas de recuperação de energia dos gases efluentes de caldeiras de bagaço de cana. In: BRAZILIAN CONGRESS OF ENGINEERING AND THERMAL SCIENCES, 7., 1998, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, 1998. p.347 - 352.

PARK, K. J. ; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem.** Campinas: CT&EA/ Faculdade de Engenharia Agrícola, Unicamp, 2007. 127 p.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, Connecticut,USA, v. 16, n. 1, p. 21-37, 1993.

PELLEGRINI, M.C. **Inserção de centrais cogedoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo : exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética.** 2002. 187 p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PEREGRINA, C.; ARLABOSSE, D.; RUDOLPH, V. Heat and mass transfer during fry-drying of sewage sludge. **Drying Technology**, Philadelphia, v. 24, n. 7, p. 797-818, Aug. 2006.

PIETRO, M. G. C. **Alternativas de cogeração na indústria Sucro-Alcooleira, estudo de caso.** 2003. 282 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica -Energia Térmica e Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

PINEDO, R. A. **Manutenção dos atributos de qualidade do camu-camu (*Myrciaria dúbia* H.B.K. (Mc Vaugh)) desidratado, durante armazenamento.** 2002. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.

PONCE, N.; FRIEDMAN, P.; LEAL, D. Geometric properties and density of vagasse particles. **International Sugar Journal**, La Habana, Cuba, v. 85, n. 1018, p. 291-295, 1983.

- PRADO, M. M. **Secagem de sementes de mamão papaya**. 1999. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- QUERIDO, A.F. **Estudo da influência de técnicas na minimização da incorporação de óleo durante o processo de fritura de maçã**. 2005. 184 p. Tese (Doutor Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- RAHMAN, M. S. **Food properties handbook**. Boca Raton, Florida, CRC, 1995, 500 p.
- RAMOS, R. A. V.; MAIA, C. R. M.; GASCHÉ, J. L.; UCHOA, T. B.; BRANCO, F. P. **Análise energética e exergética de uma usina sucro-alcooleira com sistema de cogeração de energia em expansão**. Ilha Solteira, SP: Faculdade de Engenharia Mecânica, Unesp, 2003. p. 1-9..
- RÍPOLI, T. C. C.; MOLINA JÚNIOR, W. F.; RÍPOLI, M.L.C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 677-681, out./dez. 2000.
- ROCA, G. A. A.; SANCHEZ, C. G.; GÓMEZ, E. O.; CORTEZ, L. A. B. Caracterização del bagazo de la caña de azúcar - Parte I: Características física. In: 6º Encontro de Energia no Meio Rural - AGRENER GD 2006, Campinas - SP. **Anais...**, Campinas, 2006. v.5, n.7, p. 327-437.
- RODRIGUES, N. S. S. Processos de fritura. **Food Express**, São Caetano do Sul, SP, v. 2, n. 8, p.39-42, abr. 1997.
- ROMERO-PENA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. Influência nas condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian Journal of Food Technology**, Madri, Espanha, v. 6, n. 1, p. 69-76, jan./jun. 2003.
- SANTOS, E. G.; ALSINA, O. L. S.; SILVA, F. L. H. Desempenho de biomassa na adsorção de hidrocarbonetos leves em efluentes aquosos. **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 327-331, mar./abr. 2007.
- SERVIÇO BRASILEIRO DE RESPOSTAS TÉCNICAS. **Meio ambiente, reciclagem e tratamento de resíduos**. Disponível em: <<http://www.sbrt.ibict.br>>. Acesso em: 14 abr. 2008.

SILVA, D. P. **Estudo da secagem de lodo de esgoto através da fritura de imersão**. 2003. 179 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP.

SILVA, D. P.; RUDOLPH, V.; TARANTO, O. P. Drying of sewage sludge through immersion frying. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 14., 2004. São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2004. p. 1005-1012.

SILVA, D. P.; RUDOLPH, V.; TARANTO, O. P. The drying of sewage sludge by immersion frying. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 22, n. 2, p. 271 - 276, Apr./June 2005.

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S. Utilização do bagaço de cana de açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande, PB, v. 2, n. 1, p.27-32, abr. 2007.

SOSA-ARNAO, J. H.; CORRÊA, J. L. G., SILVA, M. A.; NEBRA, S. A. Sugar cane bagasse drying : a review. **International Sugar Journal**, Tumbidge Well, UK, v. 108, n. 1291, p. 381- 392, July 2006.

SOUZA-SANTOS, M. L. A study on pressurized fluidized-bed gasification of biomass through the use of comprehensive simulation. In: GORDON AND BREACH PUBLISHERS. (Org.). **Combustion technologies for a clean environment**. Holanda: Gordon and Breach, 1998. v. 4, p.102-121.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying** : principles, applications and design. New York: Gordon and Breach Science, 1986, v. 3, p.68-98.

TREYBALL, R. B. **Drying** : mass transfer operations. New York: McGraw-Hill, 1968, p. 569-575.

UCHÔA, T. B. **Análise da viabilidade técnica e econômica da utilização de gás natural como combustível complementar em usinas sucroalcooleiras**. 2005. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, São Paulo.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor sucroalcooleiro** : tendências no terceiro milênio. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 10 jan. 2008.

VALENÇA, G. C.; MASSARANI, G. **Secagem de bagaço de cana II**. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA, 1., 1982, La Plata. **Actas...** La Plata: Universidade Federal de La Plata, 1982. v. 2, p.798-811.

VARELA, G.; BENDER, A. E.; MORTON, I. D. **Frying of food** : principles, changes, new approaches. Chichester, U.K: Ellis Harwood, 1988. p. 10-16.

VERMA B.; SHUKLA, N. P. Removal of Nickel (II) from electroplating industry effluent by agrowaste carbons. **Indian Journal Environmental Health**, Kanpur, India, v. 42, n. 4, p. 145-150, 2000.

VIJAYARAJ, B.; SARAVANAN, R.; RENGANARAYANAN, S. Energy and exergy analysis of bagasse drying. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN ENERGY RESEARCH, 1., 2006, Bombay, India. **Anais...** Bombay, India, 2006a. p. 77-82.

VIJAYARAJ, B.; SARAVANAN, R.; RENGANARAYANAN, S. Studies on thin layer drying of bagasse. **International Journal of Energy Research**, Chennai, India, v. 31, n. 4, p. 422-437, Aug. 2006b.

VITRAC, O.; DUFOUR, D.; TRYSTRAM, G.; RAOULT-WACK, A. L. Characterization of heat and mass transfer during deep-fat frying and its effect on cassava chip quality. **Journal of Food Engineering**, London, v. 53, n. 2, p.161-176, June 2002.

VITRAC, O.; TRYSTAM, G.; RAOULT-WACK, A. L. Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material. **European Journal of Lipid Science Technology**, Allemagne, v. 102, n. 8/9, p.529-538, 2000.

WAACK, R. S.; NEVES, M. F.; MORAES, S.; MARINO, M. K.; MAMONE, A.; SZASZ, A. H. **Competitividade do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998. v. 5, p.72.

WANG, C.Y.; SINGH, R.P. A single layer drying equation for rough rice. **The Society for Engineering in Agricultural, Food, and Biological Systems - ASAE Paper**, Udaipur, India, v. 78, n. 3001, June 1978.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherms characteristics of potatoes at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, London, v.14, n. 4, p. 269-287, 1991.

WIMMERSTEDT, R. Drying of peat and biofuels. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. cap.32, p.743-752.

ZHANG, X. W.; LIU, X.; GU, D. X.; ZHOU, W.; WANG, R. L.; LIU, P. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of Science of Food and Agriculture**, v. 70, n. 3, p. 303-306, Mar. 1996. WIMMERSTEDT, R. Drying of peat and biofuels. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. Singapore: Taylor & Francis Group, LLC, 2006. cap.32, p.743-752.

ZHANG, X. W.; LIU, X.; GU, D. X.; ZHOU, W.; WANG, R. L.; LIU, P. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of Science of Food and Agriculture**, v. 70, n. 3, p. 303-306, Mar. 1996.

*“A mente que se abre a uma nova idéia
jamais volta seu tamanho original”
Albert Einstein*