

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**“ESTUDO DA SECAGEM DE LODO DE ESGOTO  
ATRAVÉS DA FRITURA DE IMERSÃO”**

Autor:a Daniela Pires da Silva

Orientador: Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química

**Campinas – SP**

**Dezembro/2003**

|                                                  |
|--------------------------------------------------|
| UNICAMP<br>BIBLIOTECA CENTRA<br>SEÇÃO CIRCULANTE |
|--------------------------------------------------|

IDADE 68  
CHAMADA Ilumicamp  
Si 38e  
EX  
MBO 80/ 57650  
DC 26.127.04  
P. A.  
EQD 21.000  
TA 16/04/2004  
CRQ

CM00196711-6

bib id: 314777

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38e

Silva, Daniela Pires da

Estudo da secagem de lodo de esgoto através da  
fritura de imersão / Daniela Pires da Silva.--Campinas,  
SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Osvaldir Pereira Taranto.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

I. Secagem. 2. Fritura. 3. Lodo. 4. Esgoto. I. Óleos  
e gorduras alimentícias. I. Taranto, Osvaldir Pereira. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Química. III. Título.

Tese de Doutorado defendida por Daniela Pires da Silva e aprovada em 16 de dezembro de 2003 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto



Profa. Dra. Sandra-Cristina dos Santos Rocha



Prof. Dr. Edson Tomaz



Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli



Profa. Dra. Miriam Carla Bonicontró Ambrosio Ugri

2003.02.22

Este exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Daniela Pires da Silva e aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de Dezembro de 2003.



---

Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto



*Aos meus pais, Elias e Fátima*

*Aos meus irmãos, Viviane e Rodrigo,*

*À minha família pelo amor, apoio e compreensão*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por estar sempre do meu lado nos momentos de dificuldade e nos de alegria, auxiliando-me em minhas decisões.

Aos meus pais e a toda minha família, pelo amor e apoio que sempre me ofereceram e por estarem sempre presentes em minha vida.

Ao Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto, pela sua dedicação em guiar-me em meus estudos e ensinar-me a superar medos e acreditar em minha capacidade.

Ao Prof Victor Rudolph, por me oferecer a oportunidade de desenvolver um projeto inédito, que me trouxe e ainda trará muitos benefícios, e também aos funcionários e amigos da amigos Universidade de Queensland, Austrália, por me receberem tão bem em sua instituição,

Ao Prof. Didier Lecomte e aos funcionários e colegas da Ecole des Mines, França, por me receberem calorosamente em sua instituição e pela contribuição que este período significou para o andamento da tese.

À CAPES, pelo apoio financeiro no Brasil e no Exterior.

À Prof. Dr<sup>a</sup> Fernanda Paula Collares da FEA, pelo empréstimo do laboratório para realização das análises de teor de gordura.

Ao Prof. Caio Sanchez da FEM, pelo empréstimo do laboratório para realização das análises de poder calorífico dos materiais sólidos.

Aos meus amigos do laboratório e da Unicamp, que partilham comigo as alegrias e dificuldades de ser um aluno de pós-graduação, tenham fé e boa sorte. A todos meus amigos, pela paciência nas noites e finais de semana em que não pude lhes fazer companhia por estar trabalhando.

*“Quem não entende um simples olhar, tão pouco entenderá uma longa explicação.”*

*Mário Quintana*

## RESUMO

O aumento da população e da industrialização tem resultado num aumento crescente no volume de resíduos gerados pelas atividades humanas. Parte considerável destes resíduos são os esgotos domésticos e o seu tratamento é uma necessidade básica de qualquer sociedade. O tratamento de esgotos é gerador de resíduos volumosos - lodo de esgoto - que devem ser posteriormente tratados devido a sua periculosidade e grande quantidade.

Este trabalho teve o objetivo de tratar o lodo de esgoto, resíduo do tratamento de esgotos, através de secagem por fritura de imersão. O trabalho experimental foi realizado em três diferentes instituições, Unicamp (Br), Universidade de Queensland (Au) e Ecole des Mines (Fr). Os ensaios de fritura foram feitos em fritadores comerciais modificados com a adição de termopares, agitador e balança analítica. Foram secos alguns materiais como madeira, levedura de padaria e purê de batata como testes preliminares, além de amostras de lodo originárias das regiões das respectivas universidades envolvidas no trabalho.

Foram obtidas curvas de variação de umidade com o tempo para os materiais citados e todas as curvas foram típicas de processos de secagem, com vantagem do processo de fritura ser bastante rápido. Durante a fritura do lodo, percebeu-se que, em relação aos parâmetros analisados: massa inicial, temperatura do óleo, tipo de óleo e geometria do material, o fator geometria foi o que mais influenciou a taxa de secagem, ao menos dentro das faixas estudadas para todas as variáveis.

Além das curvas de secagem, outros dois parâmetros de importância foram analisados: a incorporação de óleo e o valor energético. O percentual de gordura no lodo passou de 0,18% para o lodo *in natura* à em média 30% para o lodo frito, dependendo do tempo de fritura. Este aumento está diretamente relacionado à perda de água durante a secagem. O poder calorífico do lodo frito aumenta com o tempo de fritura atingindo valores

da ordem de 24MJ/kg após 600s de fritura. Este valor energético é da ordem de biocombustíveis como madeira e bagaço de cana.

O processo de fritura de imersão mostrou ter um grande potencial para secar materiais, em especial o lodo de esgoto, obtendo-se um lodo frito que possui um valor energético alto, valorizando a sua utilização como combustível.

## ABSTRACT

The increase in the population and in industrialization resulted in an increase in the volume of wastes. Part of these wastes is the wastewater and its treatment is a basic necessity of any society. Wastewater treatment generates large amounts of residues - sewage sludge - that must be treated as well due to its dangerous nature and its large quantities.

The objective of this work was to treat the sewage sludge, residue of a wastewater treatment plant, using a fry-drying process. Experimental work was developed in three different institutions, Unicamp (Br), University of Queensland (Au) e Ecole des Mines (Fr). The frying experiments were carried out in commercial fryers modified with the addition of thermocouples, agitators and a analytical scale. Some materials like wood, baker's yeast and potatoes were fried in preliminary tests, besides the sewage sludge from the different plant close to where the institutions were located.

Curves of variation of the moisture content with time were obtained for the cited materials and all curves were typical of drying processes, with the advantage that the frying process is quite faster. During the frying of sewage sludge, it was verified that, in relation to the parameters: initial mass, oil temperature, oil type and geometry of the sample, the factor geometry was the most influent on the drying rate, at least within the range chose for the variables studied.

Besides the drying curves, other two important parameters were analyzed: oil uptake and calorific value. The percentage of oil into the sewage sludge sample went from 0,18% (*in natura*) to a medium value of 30% to the fried sludge, depending on frying time. This increase is directly related to the loss of water during drying. The calorific value of the samples increase with frying time, reaching values around 24MJ/kg after 600s of frying.

This energetic value is in the same level as the value for known bio-combustibles as wood as sugarcane bagasse.

The process of immersion frying showed a great potential to dry materials, in special sewage sludge, obtaining a product - fried sludge – with a high energetic content, increasing its value as a combustible.

## NOMENCLATURA

|      |                                                      |
|------|------------------------------------------------------|
| d    | Diâmetro [cm]                                        |
| E    | Ensaio                                               |
| GHV  | Gross Heat Value = Poder Calorífico Superior [MJ/kg] |
| L    | Comprimento [cm]                                     |
| M, m | Massa [g]                                            |
| NHV  | Net Heat Value = Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]   |
| PC   | Ponto Central                                        |
| PCI  | Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]                    |
| R, r | Raio [cm]                                            |
| V    | Variável                                             |
| X    | Fração mássica [-]                                   |

*Subscritos*

|      |               |
|------|---------------|
| a    | Água          |
| b.s. | Base seca     |
| b.u. | Base úmida    |
| f    | Fritura       |
| i    | Inicial       |
| o    | Óleo          |
| ss   | Sólidos secos |
| t    | Total         |



## ÍNDICE

|                  |      |
|------------------|------|
| Dedicatória      | i    |
| Agradecimentos   | ii   |
| Epígrafe         | iii  |
| Resumo           | iv   |
| Abstract         | vi   |
| Nomenclatura     | viii |
| Lista de figuras | xiii |
| Lista de tabelas | xxii |

### **CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO**

|     |                  |   |
|-----|------------------|---|
| 1.1 | Introdução Geral | 1 |
| 1.2 | Objetivos        | 3 |

### **CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

|           |                                                                       |    |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1       | <i>Teoria Geral de Secagem</i>                                        | 5  |
| 2.1.1     | Introdução                                                            | 5  |
| 2.1.2     | Período de taxa de secagem constante                                  | 7  |
| 2.1.3     | Período de taxa de secagem decrescente                                | 7  |
| 2.1.4     | Ponto crítico e umidade crítica                                       | 10 |
| 2.1.5     | Tipos de umidade                                                      | 10 |
| 2.2       | <i>Lodo de Esgoto</i>                                                 | 11 |
| 2.2.1     | Introdução                                                            | 11 |
| 2.2.2     | Características do Esgoto e as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) | 13 |
| 2.2.2.1   | Características do Esgoto                                             | 13 |
| 2.2.2.2   | Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)                                | 15 |
| 2.2.2.2.1 | ETE da Bacia do Ribeirão Samambaia                                    | 17 |
| 2.2.3     | Lodo, subproduto de ETE's                                             | 20 |
| 2.2.3.1   | Formação do Lodo                                                      | 20 |

|           |                                                  |    |
|-----------|--------------------------------------------------|----|
|           |                                                  | x  |
| 2.2.3.2   | Produção de Lodo                                 | 22 |
| 2.2.3.3   | Tipos de Tratamento de Lodo                      | 23 |
| 2.2.3.3.1 | Estabilização                                    | 25 |
| 2.2.3.3.2 | Condicionamento térmico                          | 26 |
| 2.2.3.3.3 | Digestão Biológica                               | 26 |
| 2.2.3.3.4 | Remoção de Água: Desidratação e Secagem          | 27 |
| 2.2.3.3.5 | Processos Destrutivos                            | 28 |
| 2.2.4     | Descarte Final do Lodo                           | 29 |
| 2.2.5     | Características do lodo quanto à secagem         | 32 |
| 2.3       | <i>Fritura de Imersão</i>                        | 37 |
| 2.3.1     | Introdução                                       | 37 |
| 2.3.2     | O processo de fritura e suas características     | 38 |
| 2.3.2.1   | Equipamento para fritura                         | 40 |
| 2.3.2.2   | Meio de fritura: óleos e gorduras                | 41 |
| 2.3.2.2.1 | Propriedades dos óleos e gorduras                | 42 |
| 2.3.2.2.2 | Estrutura química dos óleos e gorduras           | 42 |
| 2.3.2.2.3 | Reações envolvendo óleos e gorduras              | 43 |
| 2.3.2.2.4 | Descarte dos óleos e gorduras                    | 46 |
| 2.3.3     | Parâmetros de qualidade do produto frito         | 47 |
| 2.3.3.1   | Conteúdo de umidade                              | 47 |
| 2.3.3.2   | Conteúdo de óleo                                 | 48 |
| 2.3.4     | Transferência de Calor e Massa durante a Fritura | 48 |

### **CAPÍTULO 3 MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL**

|         |                                                                  |    |
|---------|------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1     | <i>Etapas do Projeto</i>                                         | 53 |
| 3.2     | <i>Análises e procedimentos experimentais</i>                    | 54 |
| 3.2.1   | Planejamento Experimental                                        | 54 |
| 3.2.1.1 | Planejamento Fatorial $2^3$ e Ponto Central                      | 55 |
| 3.2.1.2 | Variáveis “Resposta” e Análise dos Resultados do Planejamento    | 55 |
| 3.2.2   | Determinação do Conteúdo de Umidade                              | 56 |
| 3.2.3   | Determinação de conteúdo de óleo (método a temperatura ambiente) | 57 |
| 3.2.4   | Determinação do Teor de Gordura                                  | 58 |

|                                                          |                                                              |    |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----|
|                                                          |                                                              | xi |
| 3.2.5                                                    | Determinação do Poder Calorífico                             | 59 |
| 3.2.6                                                    | Composição Elementar                                         | 59 |
| 3.3                                                      | <i>Trabalho desenvolvido na Universidade de Queensland</i>   | 60 |
| 3.3.1                                                    | Materiais usados                                             | 60 |
| 3.3.1.1                                                  | Material preliminar                                          | 60 |
| 3.3.1.2                                                  | Lodo de esgoto                                               | 61 |
| 3.3.1.3                                                  | Meio de fritura                                              | 61 |
| 3.3.2                                                    | Aparato experimental                                         | 62 |
| 3.3.3                                                    | Etapas experimentais e metodologia                           | 62 |
| 3.3.3.1                                                  | Ensaio preliminar                                            | 63 |
| 3.3.3.2                                                  | Ensaio com o lodo                                            | 63 |
| 3.4                                                      | <i>Trabalho desenvolvido Ecole des Mines d'Albi-Camiaux</i>  | 65 |
| 3.4.1                                                    | Materiais usados                                             | 65 |
| 3.4.1.1                                                  | Materiais preliminares                                       | 65 |
| 3.4.1.2                                                  | Lodo de esgoto                                               | 66 |
| 3.4.1.3                                                  | Meio de fritura                                              | 67 |
| 3.4.2                                                    | Aparato experimental                                         | 68 |
| 3.4.3                                                    | Etapas experimentais e metodologia                           | 69 |
| 3.4.3.1                                                  | Ensaio preliminar                                            | 69 |
| 3.4.3.2                                                  | Ensaio com o lodo                                            | 69 |
| 3.4.3.3                                                  | Experimentos Isolados de fritura de lodo                     | 70 |
| 3.5                                                      | <i>Trabalho desenvolvido na Unicamp</i>                      | 72 |
| 3.5.1                                                    | Materiais usados                                             | 72 |
| 3.5.1.1                                                  | Lodo de esgoto                                               | 72 |
| 3.5.1.2                                                  | Meio de fritura                                              | 72 |
| 3.5.2                                                    | Aparato experimental                                         | 73 |
| 3.5.3                                                    | Etapas experimentais e metodologia                           | 73 |
| <br><b>CAPÍTULO 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> |                                                              |    |
| 4.1                                                      | <i>Resultados obtidos na Universidade de Queensland (UQ)</i> | 76 |
| 4.1.1                                                    | Ensaio Preliminar                                            | 76 |
| 4.1.2                                                    | Ensaio com o lodo de esgoto de Toowoomba                     | 81 |

|                                                                 |                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                 |                                                                                 | xii |
| 4.1.2.1                                                         | Curvas de Secagem                                                               | 81  |
| 4.1.2.2                                                         | Composição elementar e poder calorífico do lodo frito a 180°C                   | 83  |
| 4.2                                                             | <i>Resultados obtidos na Ecole des Mines d'Albi- Carmaux</i>                    | 86  |
| 4.2.1                                                           | Ensaio Preliminares                                                             | 86  |
| 4.2.2                                                           | Ensaio com o lodo de esgoto de Mauberges                                        | 90  |
| 4.2.2.1                                                         | Estudo da temperatura do óleo e da forma geométrica do lodo                     | 90  |
| 4.2.2.2                                                         | Fritura de cilindros de lodo frito a 180°C: análise dos produtos                | 93  |
| 4.2.2.3                                                         | Imagens do produto frito: formação da crosta e estimativa da área de TC e TM    | 100 |
| 4.3                                                             | <i>Resultados obtidos na Unicamp</i>                                            | 105 |
| 4.3.1                                                           | Planejamento Experimental I                                                     | 105 |
| 4.3.2                                                           | Planejamento Experimental II                                                    | 110 |
| 4.3.2.1                                                         | Efeito do tipo de óleo usado para a fritura                                     | 115 |
| 4.3.2.2                                                         | Efeito da temperatura do óleo (meio de fritura)                                 | 115 |
| 4.3.2.3                                                         | Efeito do diâmetro do cilindro de lodo                                          | 117 |
| 4.3.2.4                                                         | Relação entre conteúdo de óleo e conteúdo de umidade no material frito          | 118 |
| 4.3.2.5                                                         | Determinação do calor de combustão do lodo frito e de sua porcentagem de cinzas | 121 |
| <b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> |                                                                                 |     |
| 5.1                                                             | Conclusões                                                                      | 125 |
| 5.2                                                             | Sugestões para trabalhos futuros                                                | 127 |
| <b>CAPÍTULO 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                    |                                                                                 | 128 |
| <b>ANEXO A</b>                                                  |                                                                                 | 138 |
| <b>ANEXO B</b>                                                  |                                                                                 | 150 |
| <b>ANEXO C</b>                                                  |                                                                                 | 163 |

## LISTA DE FIGURAS

|            |                                                                                                                                    |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1 | Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade (Sherwood, 1929)                                                                  | 6  |
| Figura 2.2 | Taxa de secagem e Coeficiente Global de Transferência de Calor (U) em função da umidade do sólido (Sherwood, 1929)                 | 8  |
| Figura 2.3 | Curva de secagem para condições de umidade relativa diferentes (Sherwood, 1929)                                                    | 9  |
| Figura 2.4 | Díagrama demonstrativo de um sistema de tratamento de esgoto                                                                       | 17 |
| Figura 2.5 | Curva de secagem características de lodo de esgoto (taxa de secagem x conteúdo de umidade) (Lowe, 1995).                           | 33 |
| Figura 2.6 | Visualização conceitual da distribuição da umidade no lodo (Tsang and Vesilind, 1990).                                             | 35 |
| Figura 3.1 | Imagem do fritador usado nos experimentos de fritura                                                                               | 62 |
| Figura 3.2 | Materiais preliminares: a) cilindro de lodo; b) placa de levedura; c) semi-cilindro de madeira ; d) flocos de batata desidratada.  | 66 |
| Figure 3.3 | Foto da montagem experimental                                                                                                      | 68 |
| Figure 3.4 | Fotos do aparato experimental                                                                                                      | 70 |
| Figura 3.5 | Desenho esquemático de um cilindro de lodo de raio R, onde r variando com o tempo de fritura.                                      | 71 |
| Figura 3.6 | Fritador usado nos experimentos realizados na Unicamp                                                                              | 73 |
| Figura 4.1 | Curvas de secagem ( $X_{abs}$ vs t) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com conteúdos de umidade inicial diferentes. | 77 |
| Figura 4.2 | Curvas de secagem ( $X_{abs}$ vs t) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com comprimentos diferentes.                 | 78 |
| Figura 4.3 | Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 2,0cm de comprimento.                          | 78 |

|             |                                                                                                                                                         |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.4  | Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 4,0cm de comprimento.                                               | 79 |
| Figura 4.5  | Variação do conteúdo de óleo ( $X_{\text{obu}}$ ) em função da umidade ( $X_{\text{abu}}$ ) durante a fritura de cilindros de madeira                   | 80 |
| Figura 4.6  | Variação do conteúdo de óleo ( $X_{\text{obu}}$ ) em função da umidade ( $X_{\text{abu}}$ ) durante a fritura de batata (Gamble et al, 1987).           | 80 |
| Figura 4.7  | Variação do conteúdo de umidade durante a fritura de cilindros de lodo. a) $X_{\text{abu}}$ vs t e b) $X_{\text{abs}}^*$ vs t.                          | 82 |
| Figura 4.8  | Variação da porcentagem mássica de a) carbono e b) hidrogênio de amostras de lodo fritos em óleo a 180°C. O ponto “zero” é referente ao lodo seco a ar. | 84 |
| Figura 4.9  | Poder calorífico de amostras de lodo fritos a 180°C: variação em relação ao a) tempo de fritura e b) umidade da amostra.                                | 84 |
| Figura 4.10 | Porcentagem de cinzas após a combustão de amostras de lodo fritos a 180°C: variação em relação ao tempo de fritura.                                     | 85 |
| Figura 4.11 | Fritura de levedura a diferentes temperaturas de óleo. a) base úmida, b) base seca.                                                                     | 87 |
| Figura 4.12 | Fritura de semi-cilindros de madeira (a) e de purê de batata (b)                                                                                        | 88 |
| Figura 4.13 | Curvas de secagem de madeira, levedura e purê de batata (a); e curva de secagem típica (Smollen, 1990) (b)                                              | 88 |
| Figura 4.14 | Variação da massa total do cilindro (a) e do “bolo” (b) durante a fritura de lodo a 160°C.                                                              | 90 |
| Figura 4.15 | Variação da massa total do cilindro (a) e do “bolo” (b) durante a fritura de lodo a 160°C.                                                              | 91 |
| Figura 4.16 | Variação da massa total do cilindro (a) e do “bolo” (b) durante a fritura de lodo a 180°C.                                                              | 92 |
| Figura 4.17 | Comparação da variação da umidade do lodo, cilindro e “bolo”. Temperatura do óleo = 180°C.                                                              | 92 |
| Figura 4.18 | Variação da umidade do cilindro de lodo durante frituras a temperaturas diferentes.                                                                     | 93 |
| Figura 4.19 | Curvas de secagem: experimentos isolados em comparação com o experimento de aquisição online. Temperatura do óleo 180°C.                                | 94 |

|             |                                                                                                                                                                              |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.20 | Variação da umidade e do óleo em função do tempo durante a fritura de lodo a 180°C                                                                                           | 95  |
| Figura 4.21 | Relação entre o conteúdo de óleo incorporado ao lodo e seu conteúdo de umidade                                                                                               | 96  |
| Figura 4.22 | Variação da porcentagem mássica dos elementos C, H e N durante a fritura de lodo                                                                                             | 97  |
| Figura 4.23 | Variação do poder calorífico do lodo durante a fritura de lodo                                                                                                               | 98  |
| Figura 4.24 | Porcentagem de carbono das amostras de lodo frito (a) e variação do poder calorífico (b) das amostras de lodo em função do seu conteúdo de umidade                           | 99  |
| Figura 4.25 | Variação do poder calorífico das amostras de lodo em função do seu conteúdo de carbono.                                                                                      | 100 |
| Figura 4.26 | Fotografias dos cilindros de lodo antes da fritura (a) e após 20 s de fritura (b)                                                                                            | 101 |
| Figura 4.27 | Cilindro de lodo após 50 (a) e 75 (b) segundos de fritura                                                                                                                    | 101 |
| Figura 4.28 | Cilindro de lodo após 169 (a) e 263 (b) segundos de fritura                                                                                                                  | 102 |
| Figura 4.29 | Cilindro de lodo após 356 (a) e 450 (b) segundos de fritura                                                                                                                  | 102 |
| Figura 4.30 | Cilindro de lodo após 570 (a) e 690 (b) segundos de fritura                                                                                                                  | 102 |
| Figura 4.31 | Cilindro de lodo frito por 810 segundos                                                                                                                                      | 103 |
| Figura 4.32 | Diminuição do raio do cilindro (a) e aumento da espessura da crosta (b) formada durante a fritura                                                                            | 104 |
| Figura 4.33 | Diminuição em função do tempo da área interfacial de transferência de calor e massa                                                                                          | 104 |
| Figura 4.34 | Estimativa de efeitos das variáveis e suas combinações sobre a resposta umidade, $X_{\text{abs}}$ (A = tempo de fritura, B = massa de lodo e C = temperatura do óleo)        | 107 |
| Figura 4.35 | Estimativa de efeitos das variáveis e suas combinações sobre a resposta fração de óleo, $X_{\text{obs}}$ (A = tempo de fritura, B = massa de lodo e C = temperatura do óleo) | 107 |
| Figura 4.36 | Superfície de resposta para o conteúdo de umidade, $X_a$ (bu). Efeito do tempo de fritura (t) e da massa de lodo (m)                                                         | 109 |

|             |                                                                                                                                                                          |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.37 | Superfície de resposta para o conteúdo de umidade, $X_a$ (bu). Efeito da temperatura do óleo (T) e do tempo de fritura (t)                                               | 109 |
| Figura 4.38 | Relação entre a quantidade de umidade e a quantidade de óleo no material frito                                                                                           | 110 |
| Figura 4.39 | Curva de secagem obtida no ensaio 8, a) $X_{abu}$ vs t, b) $X_{abs}^*$ vs t                                                                                              | 112 |
| Figura 4.40 | Variação do conteúdo de óleo em função do tempo de fritura para os ensaios com óleo novo, a) $X_{obu}$ e b) $X_{obs}$                                                    | 113 |
| Figura 4.41 | Comparação entre $X_{abs}$ e $X_{abs}^*$ para os ensaios onde o conteúdo de óleo pode ser determinado, a) ensaio 5 e b) ensaio 6                                         | 114 |
| Figura 4.42 | Comparação entre $X_{abs}$ e $X_{abs}^*$ para os ensaios onde o conteúdo de óleo pode ser determinado, a) ensaio 7 e b) ensaio 8                                         | 114 |
| Figura 4.43 | Efeito do tipo de óleo na curva de secagem para a fritura de lodo                                                                                                        | 115 |
| Figura 4.44 | Efeito da temperatura do óleo na curva de secagem, a) $d=2,0\text{cm}$ , $\Delta T=20,0^\circ\text{C}$ e b) $d=2,6\text{cm}$ , $\Delta T=23,6^\circ\text{C}$             | 116 |
| Figura 4.45 | Efeito da temperatura na fritura do lodo, $\Delta T = 42,8^\circ\text{C}$                                                                                                | 117 |
| Figura 4.46 | Efeito do diâmetro do cilindro na curva de secagem para fritura de lodo, a) T = nível inferior e b) T = nível superior                                                   | 118 |
| Figura 4.47 | Relação da perda de água com o aumento de concentração de óleo no lodo frito. Efeito da temperatura, a) $d=2,0\text{cm}$ e b) $2,6\text{cm}$ .                           | 119 |
| Figura 4.48 | Relação da perda de água com o aumento de concentração de óleo no lodo frito. Efeito do diâmetro do cilindro de lodo, a) T=nível inferior e b) T=nível superior          | 120 |
| Figura 4.49 | Relação da perda de água com o aumento de concentração de óleo no lodo frito, a) plan II e b) ajuste do plan II e resultado de Albi                                      | 120 |
| Figura 4.50 | Calor de combustão (PCS) (a) e porcentagem de cinzas (b) do lodo frito em função do tempo de fritura.                                                                    | 122 |
| Figura 4.51 | Calor de combustão (PCS) (a) e porcentagem de cinzas (b) do lodo frito em função do tempo de fritura. Comparação entre os resultados obtidos nas três fases do trabalho. | 123 |



|            |                                                                                                                                      |     |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura A.1 | Curvas de secagem ( $X_{abs}$ vs $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com conteúdos de umidade inicial diferente  | 138 |
| Figura A.2 | Curvas de secagem ( $X_{abs}$ vs $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com conteúdos de umidade inicial diferentes | 139 |
| Figura A3  | Curvas de secagem ( $X_{abs}$ vs $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com comprimentos diferentes                 | 139 |
| Figura A4  | Curvas de secagem ( $X_{abu}$ vs $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com comprimentos diferentes                 | 140 |
| Figura A5  | Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 2,0cm de comprimento. Base úmida                 | 140 |
| Figura A6  | Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 2,0cm de comprimento. Base seca.                 | 141 |
| Figura A7  | Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 4,0cm de comprimento. Base úmida                 | 141 |
| Figura A8  | Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 4,0cm de comprimento. Base seca.                 | 142 |
| Figura A9  | Variação do conteúdo de óleo ( $X_{obu}$ ) em função da umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de madeira              | 142 |
| Figura A10 | Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de lodo. Temperatura do óleo igual a 140°C              | 143 |
| Figura A11 | Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abs}^*$ ) durante a fritura de cilindros de lodo. Temperatura do óleo igual a 140°C.           | 143 |
| Figura A12 | Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de lodo. Temperatura do óleo igual a 160°C              | 144 |
| Figura A13 | Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abs}^*$ ) durante a fritura de cilindros de lodo. Temperatura do óleo igual a 160°C.           | 144 |
| Figura A14 | Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de lodo. Temperatura do óleo igual a 180°C              | 145 |
| Figura A15 | Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abs}^*$ ) durante a fritura de cilindros de lodo. Temperatura do óleo igual a 180°C            | 145 |
| Figura A16 | Efeito da temperatura do óleo nas curvas $X_{abu}$ vs tempo                                                                          |     |

|            |                                                                                                                                         |     |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|            |                                                                                                                                         | 146 |
| Figura A17 | Efeito da temperatura do óleo nas curvas $X_{abs}^*$ vs tempo                                                                           | 146 |
| Figura A18 | Variação da porcentagem mássica de carbono nas amostras de lodo frito em óleo a 180°C. O ponto “zero” é referente ao lodo seco a ar.    | 147 |
| Figura A19 | Variação da porcentagem mássica de hidrogênio nas amostras de lodo frito em óleo a 180°C. O ponto “zero” é referente ao lodo seco a ar. | 147 |
| Figura A20 | Poder calorífico de amostras de lodo fritos a 180°C: variação em relação ao tempo de fritura                                            | 148 |
| Figura A21 | Poder calorífico de amostras de lodo fritos a 180°C: variação em relação à umidade da amostra.                                          | 148 |
| Figura A22 | Porcentagem de cinzas após a combustão de amostras de lodo fritos a 180°C: variação em relação ao tempo de fritura.                     | 149 |
| Figura B1  | Curvas de $X_{abu}$ vs tempo durante a fritura de levedura a diferentes temperaturas de óleo                                            | 150 |
| Figura B2  | Curvas de $X_{abs}$ vs tempo durante a fritura de levedura a diferentes temperaturas de óleo                                            | 150 |
| Figura B3  | Fritura de semi-cilindros de madeira ( $X_{abs}$ vs tempo)                                                                              | 151 |
| Figura B4  | Fritura de semi-cilindros de purê de batata ( $X_{abs}$ vs tempo)                                                                       | 151 |
| Figura B5  | Variação da massa total do cilindro durante a fritura de lodo a 160°C                                                                   | 152 |
| Figura B6  | Variação da massa total do do “bolo” durante a fritura de lodo a 160°C                                                                  | 152 |
| Figura B7  | Comparação da variação da umidade do lodo, cilindro e “bolo”.<br>Temperatura do óleo = 160°C.                                           | 153 |
| Figura B8  | Variação da massa total do cilindro durante a fritura de lodo a 180°C.                                                                  | 153 |
| Figura B9  | Variação da massa total do “bolo” durante a fritura de lodo a 180°C                                                                     | 154 |
| Figura B10 | Comparação da variação da umidade do lodo, cilindro e “bolo”.<br>Temperatura do óleo = 180°C.                                           | 154 |

|            |                                                                                                                                        |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura B11 | Variação da umidade do cilindro de lodo durante frituras a temperaturas diferentes.                                                    | 155 |
| Figura B12 | Curvas de secagem em base úmida: experimentos isolados em comparação com o experimento de aquisição online. Temperatura do óleo 180°C. | 155 |
| Figura B13 | Curvas de secagem em base seca: experimentos isolados em comparação com o experimento de aquisição online. Temperatura do óleo 180°C.  | 156 |
| Figura B14 | Variação da umidade e do óleo em função do tempo durante a fritura de lodo a 180°C. Base úmida                                         | 156 |
| Figura B15 | Variação da umidade e do óleo em função do tempo durante a fritura de lodo a 180°C. Base seca.                                         | 157 |
| Figura B16 | Relação entre o conteúdo de óleo incorporado ao lodo e seu conteúdo de umidade, base úmida                                             | 157 |
| Figura B17 | Relação entre o conteúdo de óleo incorporado ao lodo e seu conteúdo de umidade, base seca.                                             | 158 |
| Figura B18 | Variação da porcentagem mássica dos elementos C, H e N durante a fritura de lodo                                                       | 158 |
| Figura B19 | Variação do poder calorífico do lodo com o tempo de fritura.                                                                           | 159 |
| Figura B20 | Porcentagem de carbono das amostras de lodo frito em função do seu conteúdo de umidade.                                                | 159 |
| Figura B21 | Variação do poder calorífico das amostras de lodo em função do seu conteúdo de umidade.                                                | 160 |
| Figura B22 | Variação do poder calorífico das amostras de lodo em função do seu conteúdo de carbono.                                                | 160 |
| Figura B23 | Diminuição do raio do cilindro durante a fritura                                                                                       | 161 |
| Figura B24 | Aumento da espessura da crosta formada durante a fritura                                                                               | 161 |
| Figura B25 | Diminuição em função do tempo da área interfacial de transferência de calor e massa                                                    | 162 |
| Figura C1  | Superfície de resposta para o conteúdo de umidade, $X_a$ (bu). Efeito do tempo de fritura (t) e da massa de lodo (m)                   | 163 |

|            |                                                                                                                            |     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura C2  | Superfície de resposta para o conteúdo de umidade, $X_a$ (bu). Efeito da temperatura do óleo (T) e do tempo de fritura (t) | 163 |
| Figura C3  | Superfície de resposta para o conteúdo de óleo, $X_o$ (bu). Efeito do tempo de fritura (t) e da massa de lodo (m)          | 164 |
| Figura C4  | Superfície de resposta para o conteúdo de óleo, $X_o$ (bu). Efeito da temperatura do óleo (T) e do tempo de fritura (t)    | 164 |
| Figura C5  | Superfície de resposta para o conteúdo de umidade, $X_a$ (bs). Efeito do tempo de fritura (t) e da massa de lodo (m)       | 165 |
| Figura C6: | Superfície de resposta para o conteúdo de umidade, $X_a$ (bs). Efeito da temperatura do óleo (T) e do tempo de fritura (t) | 165 |
| Figura C7  | Superfície de resposta para o conteúdo de óleo, $X_o$ (bs). Efeito do tempo de fritura (t) e da massa de lodo (m)          | 166 |
| Figura C8  | Superfície de resposta para o conteúdo de óleo, $X_o$ (bs). Efeito da temperatura do óleo (T) e do tempo de fritura (t)    | 166 |
| Figura C9  | Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 1 e b)ensaio 2           | 167 |
| Figura C10 | Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 3 e b)ensaio 4           | 167 |
| Figura C11 | Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 5 e b)ensaio 6           | 168 |
| Figura C12 | Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 7 e b)ensaio 8           | 168 |
| Figura C13 | Variação do conteúdo de umidade do material (base seca*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 1 e b)ensaio 2           | 169 |
| Figura C14 | Variação do conteúdo de umidade do material (base seca*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 3 e b)ensaio 4           | 169 |
| Figura C15 | Variação do conteúdo de umidade do material (base seca*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 5 e b)ensaio 6           | 170 |
| Figura C16 | Variação do conteúdo de umidade do material (base seca*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 7 e b)ensaio 8           | 170 |
| Figura C17 | Variação do conteúdo de umidade do material (base seca) em função do tempo de fritura. a) ensaio 5 e b)ensaio 6            | 171 |

|             |                                                                                                                                                        |     |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura C18  | Variação do conteúdo de umidade do material (base seca) em função do tempo de fritura. a) ensaio 7 e b)ensaio 8                                        | 171 |
| Figura C19: | Curvas de secagem do lodo, fritura a $T_{\text{óleo}}=193,25^{\circ}\text{C}$ e diâmetro do cilindro de 2,0cm . a) base úmida e b) base seca*          | 172 |
| Figura C20  | Curvas de secagem do lodo, fritura a $T_{\text{óleo}}=168$ e $190,3^{\circ}\text{C}$ e diâmetro do cilindro de 2,6cm . a) base úmida e b) base seca*   | 172 |
| Figura C21  | Curvas de secagem do lodo, fritura a $T_{\text{óleo}}=214,6$ e $213,2^{\circ}\text{C}$ e diâmetro do cilindro de 2,0cm . a) base úmida e b) base seca* | 173 |
| Figura C22  | Curvas de secagem do lodo, fritura a $T_{\text{óleo}}=210,8$ e $213,9^{\circ}\text{C}$ e diâmetro do cilindro de 2,6cm . a) base úmida e b) base seca* | 173 |
| Figura C23  | Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,0cm e óleo usado. a) base úmida e b) base seca*                         | 174 |
| Figura C24  | Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,6cm e óleo usado. a) base úmida e b) base seca*                         | 174 |
| Figura C25  | Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,0cm e óleo novo. a) base úmida e b) base seca*                          | 175 |
| Figura C26: | Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,6cm e óleo novo. a) base úmida e b) base seca*                          | 175 |
| Figura C27  | Verificação do efeito da temperatura nas curvas (base seca). a) $d=2,0\text{cm}$ e b) $d=2,6\text{cm}$                                                 | 176 |
| Figura C28  | Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes, $T_{\text{óleo}}=$ nível inferior. a) base úmida e b) base seca*                       | 176 |
| Figura C29  | Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes, $T_{\text{óleo}}=$ nível superior, e óleo usado. a) base úmida e b) base seca*         | 177 |
| Figura C30  | Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes, $T_{\text{óleo}}=$ nível inferior, e óleo novo. a) base úmida e b) base seca*          | 177 |
| Figura C31  | Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes, $T_{\text{óleo}}=200^{\circ}\text{C}$ , e óleo novo. a) base úmida e b) base seca*     | 178 |
| Figura C32  | Verificação do efeito do diâmetro nas curvas (base seca). a) $T=$ nível inferior e b) $T=$ nível superior                                              | 178 |
| Figura C33  | Curvas de secagem do lodo e de absorção de óleo. a) ensaio 5 e b)ensaio 7                                                                              | 179 |

|            |                                                                                       |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura C34 | Curvas de secagem do lodo e de absorção de óleo. a) ensaio 6 e<br>b)ensaio 8          | 179 |
| Figura C35 | Conteúdo de óleo em função da água presente no material. a) ensaio 5 e<br>b) ensaio 6 | 180 |
| Figura C36 | Conteúdo de óleo em função da água presente no material. a) ensaio 7 e<br>b) ensaio 8 | 180 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                                                             |     |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1  | Porcentagem de municípios com serviço de esgotamento sanitário, por regiões (Revista Isto É, 03 de Abril de 2002, no. 1696) | 20  |
| Tabela 2.2  | Plano Diretor de Tratamento de Esgotos, Sanasa. Características das ETE's                                                   | 21  |
| Tabela 2.3  | Produção de esgoto e de lodo para alguns estados brasileiros (Machado, 2001)                                                | 23  |
| Tabela 2.4  | Diferentes tecnologias de tratamento do lodo de esgoto.                                                                     | 25  |
| Tabela 2.5  | Destino final do lodo no Brasil                                                                                             | 32  |
| Tabela 2.6  | Estrutura molecular de ácidos graxos simples (Stauffer, 1996).                                                              | 43  |
| Tabela 2.7  | Reações de degradação do óleo (Moreira et al, 1999)                                                                         | 45  |
| Tabela 2.8  | Características limites para o descarte dos óleos e gorduras                                                                | 47  |
| <br>        |                                                                                                                             |     |
| Tabela 3.1  | Variáveis independentes e seus níveis                                                                                       | 55  |
| Tabela 3.2  | Relações para o cálculo de umidade e óleo                                                                                   | 57  |
| Tabela 3.3  | Dimensões dos cilindros madeira                                                                                             | 61  |
| Tabela 3.4  | Composição do óleo de girassol poliinsaturado                                                                               | 61  |
| Tabela 3.5  | Geometria e características dos materiais preliminares                                                                      | 66  |
| Tabela 3.6  | Características do lodo proveniente da ETE de Mauberges, França                                                             | 67  |
| Tabela 3.7  | Características do óleo de fritura (óleo de amendoim)                                                                       | 68  |
| Tabela 3.8  | Composição química média de óleo de palma e de óleo de soja (Stauffer, 1996)                                                | 72  |
| Tabela 3.9  | As variáveis e níveis escolhidos para o primeiro planejamento                                                               | 74  |
| Tabela 3.10 | As variáveis e níveis escolhidos para o segundo planejamento                                                                | 75  |
| <br>        |                                                                                                                             |     |
| Tabela 4.1  | Condições iniciais dos ensaios preliminares e taxas de secagem obtidas                                                      | 89  |
| Tabela 4.2  | Valores de calor de combustão do lodo de esgoto frito                                                                       | 98  |
| Tabela 4.3  | Calor de combustão de algumas biomassas, resíduos e óleos                                                                   | 99  |
| Tabela 4.4  | Raio do cilindro e interface de transferência de calor e massa                                                              | 103 |
| Tabela 4.5  | Condições experimentais do Planejamento I e respostas (**)                                                                  | 106 |

|            |                                                                                                         |     |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 4.6 | Condições experimentais do Planejamento II                                                              | 111 |
| Tabela 4.7 | C Variação do calor de combustão do lodo frito e da porcentagem de cinzas em função do tempo de fritura | 121 |
| Tabela 4.8 | Valores energéticos encontrados em literatura de biomassas e óleos                                      | 124 |



## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

#### **1.1 – Introdução Geral**

A cada ano, a Humanidade produz uma quantidade maior de resíduos, sejam domésticos ou industriais. A disposição destes resíduos em corpos d'água e em aterros tem se tornado cada vez mais restrita, devido aos riscos de poluição ambiental que este descarte pode acarretar. No mundo todo, normas regulativas estão se tornando mais exigentes no intuito de proteger os oceanos, rios, lagos, o solo e, em especial, os aquíferos, que representam a reserva de água potável para a população mundial.

O saneamento é uma necessidade básica de qualquer população, contudo, o tratamento de esgotos domésticos implica na produção de resíduos que apresenta potencial perigoso e poluidor. O lodo de esgoto produzido no tratamento das águas usadas é uma mistura complexa de materiais orgânicos e inorgânicos, podendo conter agentes patogênicos e também metais pesados. Além destas características, o lodo é um sub-produto muito volumoso, contendo cerca de 95-98% de água.

Por ser um assunto de bastante interesse na área ambiental, a disposição do lodo de esgoto é bastante estudada. Existem três rotas de descarte: água, solo e ar. A disposição do lodo em corpos d'água vem sendo oficialmente banida nos últimos anos. A disposição em aterros é bastante usada, porém a cada ano, diminuem mais o número de locais apropriados para tal, em especial em grandes centros urbanos. O alto custo de transporte é um fator essencial nesta escolha da rota, pois o transporte de um material tão volumoso quanto o lodo apresenta um custo significativo.

O descarte via ar, que englobaria processos como incineração, pirólise, gaseificação, vem ganhando espaço e estudos, pois são encarados como processos com potencial de futuro.

A primeira providência para o tratamento do lodo de esgoto é a sua desidratação. Ela pode ser feita por via mecânica, química ou térmica. Contudo, o processo de desidratação pode ser bastante complicado e oneroso.

Este estudo visa a análise desidratação do lodo através de uma tecnologia alternativa na Engenharia Ambiental, a fritura de imersão.

A fritura é um processo de secagem e cozimento conhecido do Homem há muitos séculos e hoje em dia movimenta grande parte do mercado de produtos alimentícios.

A fritura tem como características a remoção de umidade e a incorporação do meio secante (o óleo) do material que está sendo frito. A combinação destes dois fenômenos pode levar a produção de um material com alto valor energético, que pode ser reaproveitado em sistemas de recuperação de calor.

O trabalho apresentado neste texto é o resultado de trabalhos realizados em três universidades, a UNICAMP, a Universidade de Queensland (Austrália) e a Ecole des Mines d'Albi-Carmaux (França).

O projeto de fritura de lodo é um projeto pioneiro e, ideologicamente, surgiu da cooperação de pesquisadores da Universidade de Queensland e da Ecole des Mines. Os primeiros passos concretos foram realizados a partir da realização do trabalho apresentado neste texto.

A parte experimental foi desenvolvida nas três universidades, daí o texto estar desenvolvido de forma a apresentar os materiais, métodos, resultados e discussões, separadamente.

## **1.2 - Objetivos**

O projeto propõe uma alternativa para a secagem do lodo proveniente do tratamento de águas residuárias. Como método alternativo de secagem, é estudada a fritura do material em óleo quente.

O processo de fritura é um fenômeno de transferência de calor e massa amplamente utilizado na indústria alimentícia, mas não existe registro de fritura de materiais que não sejam produtos alimentícios.

O objetivo deste trabalho é aplicar a técnica de fritura de imersão na secagem do lodo e avaliar a potencialidade do produto frito como um combustível.

Assim, este trabalho tem as seguintes etapas:

- estudar a transposição da tecnologia de fritura, usada na secagem de alimentos, adaptando-a para a secagem de lodo;
- aplicar os conhecimentos existentes sobre as características do lodo, especialmente em relação à sua desumidificação;
- estudar a maneira como o material será introduzido no óleo e o seu comportamento durante o processo;
- analisar a variação de umidade do material com o tempo de fritura, e caracterizar os tipos de umidade presentes nos materiais usados;
- analisar a incorporação de óleo durante o processo;
- verificar a relação entre a perda de umidade e a absorção de óleo;
- determinar o calor de combustão do material;

- verificar a relação entre o valor energético do material e outros parâmetros como umidade e concentração de óleo;
- buscar as melhores condições operacionais para atingir-se a secagem do lodo através da fritura;
- avaliar o lodo frito como potencial biocombustível.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1. - Teoria Geral de Secagem**

##### **2.1.1 - Introdução**

Em qualquer operação de secagem, a maneira na qual a água deixa o sólido e se evapora em sua superfície é muito importante para a taxa de secagem (Strumillo and Kudra, 1986). Este conhecimento se adquire através de ensaios de secagem.

Obtêm-se as características de secagem de um material, submetendo-se uma pequena amostra deste a um fluxo de ar sob condições constantes de temperatura, velocidade e umidade. O comportamento do sólido durante este processo pode ser caracterizado medindo-se a perda do conteúdo de umidade (água) do sólido com o tempo, ou seja, estudando-se a sua cinética de secagem.

O resultado desta investigação é usualmente expresso na forma de curvas de taxa de secagem, e a natureza destas curvas é usada para interpretar o comportamento do material durante o processo.

Segundo Sherwood (1929), todo material úmido, seco sob condições de temperatura, velocidade e umidade do ar constantes, exibe um período onde a taxa de secagem é constante. Esta taxa permanece constante até que o conteúdo de água do material atinja um valor, chamado umidade crítica, a partir da qual a taxa de secagem passa a diminuir até que se atinja o final do processo de secagem.

A Figura 2.1 apresenta uma curva de secagem típica, obtida durante a secagem de uma fina lâmina de uma pasta de  $\text{CaCO}_3$  e água. A divisão do processo de secagem em um *período de taxa de constante* e um *período de taxa de secagem decrescente* é visualizado pela diferença da inclinação das curvas, e pode-se notar ainda que o segundo pode ser dividido em duas zonas distintas.

A menos que o ar esteja absolutamente seco, o sólido reterá uma quantidade de água mesmo depois de um tempo infinito de secagem. Este conteúdo de umidade de equilíbrio depende da umidade relativa do ar e da natureza do sólido.

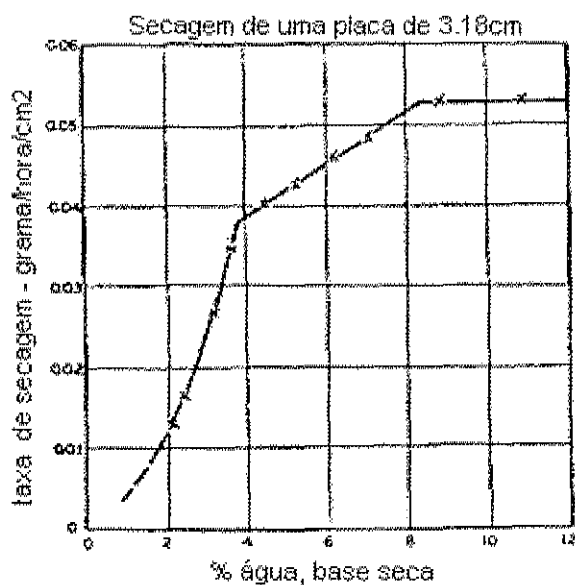


Figura 2.1: Taxa de secagem em função do conteúdo de umidade (Sherwood, 1929)

### 2.1.2. Período de Taxa de Secagem Constante

Durante este período, a evaporação ocorre na superfície do sólido, sendo a taxa de secagem limitada pela evaporação da água do filme líquido na superfície para o ar. A secagem neste período é similar à evaporação de água a partir de uma superfície livre, assumindo uma temperatura constante e igual à temperatura de bulbo úmido da corrente gasosa.

### 2.1.3 Período de Taxa de Secagem Decrescente

O período de taxa de secagem decrescente dividido em duas zonas é comum para a secagem de sólidos. Sherwood (1929) encontrou este comportamento para madeira, argila, polpa de madeira e fibras de bagaço. A primeira zona, imediatamente após o ponto crítico, é freqüentemente, mas não necessariamente, caracterizada pela relação linear entre a taxa de secagem e o conteúdo de umidade. A segunda zona é caracterizada por uma curva. Freqüentemente, uma ou outra zona pode dominar o processo.

A taxa de difusão de água para a superfície é função do conteúdo de umidade para qualquer material a ser seco. No caso de finas lâminas de sólido, a taxa de difusão interna de líquido é grande, mesmo a baixos conteúdos de umidade, e ainda assim o ponto crítico é relativamente alto. Logo, o decréscimo da taxa de secagem após o ponto crítico não é devido à difusão ter se tornado a etapa controladora do processo, apesar deste mecanismo prevalecer na segunda zona do período decrescente. Mas devido a mudanças na natureza da superfície, ou melhor, à diminuição da área realmente molhada. A taxa de secagem por área úmida não diminui, mas como aparecem áreas secas na superfície do sólido, a taxa de secagem por área total cai.

Quando o conteúdo de umidade cai para um valor tal que a taxa máxima de difusão de água em direção à superfície do sólido é menor que a evaporação da superfície para o ar, a difusão interna passa a controlar o mecanismo de secagem. Entra-se então na segunda zona de taxa de secagem decrescente, caracterizada por uma curva (Figura 2.1) Os fatores que influenciam esta zona são os mesmos que influenciam a difusão da água através de um sólido (a taxa de difusão de água em sólidos também pode ser representada por uma curva).

Para confirmar estas afirmações, Sherwood (1929) estudou o comportamento do coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ) durante a secagem da pasta de  $\text{CaCO}_3$ , e o resultado pode ser visto na Figura 2.2. Enquanto  $U$  mantém-se constante e igual ao valor obtido no período de taxa constante, a evaporação deve ocorrer na superfície do sólido. O decréscimo do coeficiente global de transferência de calor significa o aumento na resistência ao fluxo de calor e conseqüentemente, que a evaporação não ocorre mais na superfície e sim no interior do sólido. Percebe-se, observando-se a Figura 2.2, que  $U$  permanece substancialmente constante durante o período de secagem constante e durante o primeiro período de secagem decrescente. Contudo, começa a diminuir coincidentemente com o segundo período de secagem decrescente.

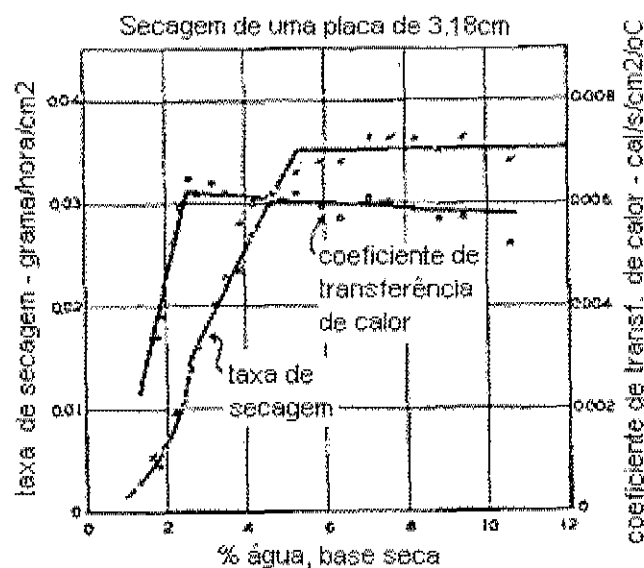


Figura 2.2: Taxa de secagem e Coeficiente Global de Transferência de Calor ( $U$ ) em função da umidade do sólido (Sherwood, 1929)



Para apoiar esta conclusão, o autor estudou também a influência da umidade relativa do ar e da espessura da placa de sólido. Os resultados dos ensaios mostraram que condição do ar modifica a taxa de secagem durante a fase constante e o primeiro período decrescente, e não interfere no segundo período de taxa de secagem decrescente. A Figura 2.3 apresenta uma visualização desta afirmação.

Sherwood (1929) percebeu também que a taxa de secagem não foi influenciada pela espessura da lâmina nos dois primeiros períodos. A partir destes dados pode-se afirmar que o segundo período de taxa de secagem é controlado pela difusão interna da umidade, enquanto nos dois primeiros períodos de secagem o mecanismo predominante é a evaporação da umidade na superfície do sólido.

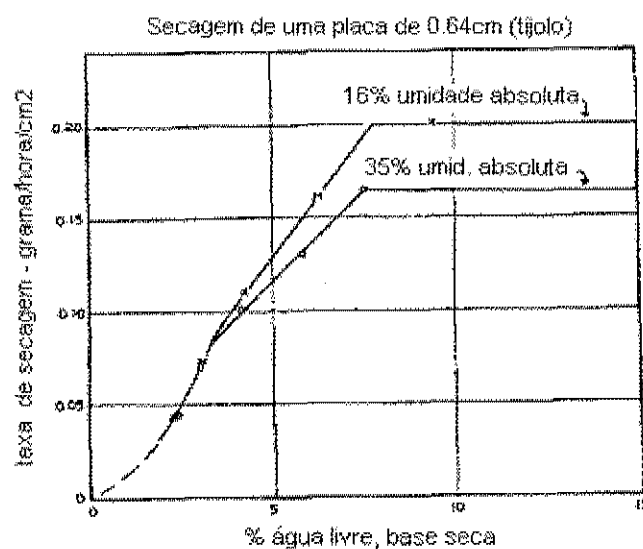


Figura 2.3: Curva de secagem para condições de umidade relativa diferentes  
(Sherwood, 1929).

#### 2.1.4. Ponto crítico e umidade crítica

O teor de umidade existente no final do período de taxa constante é chamado de umidade crítica. Neste ponto, como visto anteriormente, o movimento do líquido do interior para a superfície do sólido é insuficiente para compensar o líquido que está sendo evaporado. Tem-se que a umidade crítica depende da facilidade que a umidade possui de se movimentar através do material, conseqüentemente, da estrutura do sólido em relação à taxa de secagem.

Pode-se dizer que a umidade crítica de um material é função da estrutura do material, da espessura com que o mesmo é seco e da taxa de secagem. Somando-se a estes dois fatores a estrutura complicada irregular de muitos sólidos, pode-se salientar a dificuldade de previsão da umidade crítica. Portanto, é muito importante a determinação da umidade crítica experimentalmente, simulando-se condições de secagem e levando-se em conta os fatores que influenciam a mesma. A estrutura do material sempre é levada em consideração, pois nas determinações experimentais faz-se uso de amostras do material cuja umidade crítica se quer determinar.

#### 2.1.5. Tipos de Umidade

Strumillo & Kudra (1986) apresentam a seguinte classificação:

- **umidade livre ou superficial:** é o líquido presente na película externa do material úmido, devido aos efeitos das tensões superficiais;
- **umidade não-ligada:** é a umidade retida nos interstícios entre as partículas, ou nos poros rasos ou abertos. Esta umidade desloca-se até a superfície por força dos capilares e está contida em sólidos não higroscópicos.

- **umidade ligada:** também chamada de umidade higroscópica ou dissolvida, é o líquido que exerce uma pressão de vapor menor que a exercida pelo líquido puro, a certa temperatura de referência.

## 2.2. – Lodo de Esgoto

### 2.2.1. Introdução

O aumento da urbanização e da industrialização tem resultado num aumento significativo do volume de águas residuárias produzidas no mundo todo. Leis ambientais cada vez mais rígidas tem forçado o tratamento destas águas para que possam ser descartadas de modo seguro (Priestley, 2001). Estes processos concentram os poluentes num lodo normalmente contendo de 1 a 2 % de sólidos secos. Devido ao grande aumento no volume de águas residuárias, grandes volumes de lodo residuais são gerados e conseqüentemente devem ser tratados e descartados de maneira ambientalmente segura e econômica.

As três rotas, que praticamente recebem toda forma de lodo descartada, são terra, ar e água. Cada uma destas rotas tem seus próprios impactos ambientais e o conhecimento dos componentes do lodo é essencial para se determinar seus efeitos sobre a rota escolhida. Por exemplo, resíduos de organocloreto causam severos problemas aos organismos aquáticos através da bioacumulação, mas não parece ser transferido do adubo para as plantações (Kampe, 1988 apud Priestley, 2001). Por outro lado, metais pesados, como chumbo, mercúrio, cádmio e cromo, transferem-se para as plantações se estiverem presentes nos fertilizantes e através da cadeia alimentar chegam até o homem; mas existem poucas evidências de que, em baixas concentrações, eles tenham efeitos maléficos no meio aquático.

Políticas de descarte de lodo devem levar em consideração o conhecimento científico a fim de escolher a melhor rota. E como maneira de agilizar este processo, as restritas leis ambientais vêm colocando em crescente ênfase o desenvolvimento de tecnologias custo-efetivas para resolver os problemas identificados em cada rota de descarte.

O descarte do lodo em terra é muito praticado em vários lugares do mundo, mas vem sofrendo muitas pressões uma vez que existem cada vez menores áreas disponíveis para tal fim e o controle de materiais tóxicos fica mais exigente. Tanto as operações de aterro como aplicação na agricultura são praticadas, mas as limitações vêm de fatores como: organismos patogênicos e tóxicos, metais pesados e dificuldades de transporte e aplicação.

O descarte no ar ocorre através do emprego da incineração e da pirólise do lodo, etc. A incineração converte todo o material orgânico do lodo em dióxido de carbono, restando cinzas e a maioria do material inorgânico. A pirólise, por outro lado, produz  $\text{CO}_2$ , cinzas e um hidrocarboneto líquido, que também pode ser usado como combustível. Contudo, como todo processo a altas temperaturas, requer um alto custo de capital, de manutenção e de operação.

O descarte do lodo nos oceanos já foi muito praticado, mas vem sendo banido devido aos seus efeitos ambientais. Contudo, os resultados deste procedimento são muito específicos e influenciados pelos constituintes do lodo. Materiais preocupantes são: matéria orgânica, óleo e graxa, bactérias e vírus, metais pesados, organoclorados e nutrientes, como nitratos e fosfatos.

Em 1996, o Conselho das Comunidades Europeias lançou uma Diretiva sobre o tratamento de águas residuárias requerendo que, a partir de 31 de dezembro de 2005, toda cidade com mais de 2000 pessoas deva tratar seu esgoto antes de ser descartado. Além

disto, esta diretiva bane o descarte no mar a partir de 31 de dezembro de 1998 (Davis, 1996).

Este exemplo evidencia uma tendência mundial em se preocupar com o meio ambiente e com a saúde pública. Por isto, é urgente a busca de novas tecnologias para tratamento, descarte e possível reuso dos resíduos da urbanização e industrialização pelo qual o mundo passou no último século e continuará atravessando no milênio que se inicia.

Atualmente, a produção de lodo no Brasil pode ser considerada pequena, se comparada aos países da Europa e dos Estados Unidos, o que deve mudar no futuro, agravando-se assim os problemas relativos à disposição final deste material.

## **2.2.2 – Características do Esgoto e as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)**

### **2.2.2.1 - Características do Esgoto**

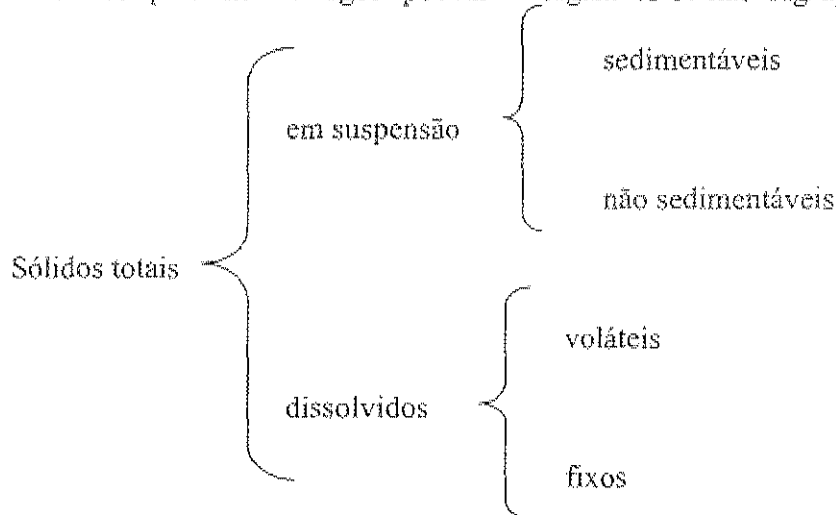
Água servida, dejetos ou líquido residuário é o líquido conduzido pelas canalizações de esgoto. Ele pode ser constituído de um só líquido ou uma mistura deles que separadamente se definem (Steel, 1979):

- Esgoto sanitário, também conhecido como esgoto doméstico;
- Despejo industrial, despejo líquido proveniente de um processo industrial como os das tinturarias, cervejarias, fábricas de papel, etc;
- Águas de infiltração, que penetra na canalização por infiltração do terreno.

Embora o esgoto seja composto de 99,9% de água, a pequena porção de sólidos em suspensão e em solução é de grande importância em seus efeitos. Quanto maior a

concentração de esgoto, mais pronunciados serão o odor e a turbidez. A concentração pode ser definida como “força”, sendo que o esgoto mais forte é o que tem maior proporção de matéria putrescível. A maior ou menor concentração de esgoto depende do consumo *per capita* e da quantidade de dejetos industriais.

Os sólidos presentes no esgoto podem ser orgânicos ou não. Agrupam-se em:



Um parâmetro muito usado na caracterização do esgoto tanto doméstico, ou sanitário, quanto industrial é a DBO, ou Demanda Biológica de Oxigênio.

A DBO é, por definição, a quantidade de  $O_2$  utilizada por uma população mista de microorganismos durante a oxidação aeróbia da matéria orgânica contida numa amostra de esgoto a temperatura de  $20^\circ C$ . O consumo de oxigênio é diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica biodegradável (Hammer, 1979). Suas aplicações residem na medição da carga orgânica imposta a uma estação de tratamento de esgotos e na avaliação da eficiência destas estações. É freqüente o uso da  $DBO_5$ , que corresponde à quantidade de oxigênio consumida durante 5 dias de medição.

As águas residuárias não podem ser descartadas sem um tratamento conveniente por várias razões. Primeiramente, a decomposição biológica dos materiais orgânicos consome oxigênio e, assim, reduz a quantidade de oxigênio disponível para a vida aquática que irá

receber estas águas. A decomposição também produz grandes quantidades de odores malcheirosos. Em segundo lugar, o grande número de organismos patogênicos nas águas não-tratadas é um risco à saúde dos seres humanos.

Em terceiro lugar, os componentes tóxicos, especialmente os metais pesados, são perigosos tanto para as plantas quanto para os animais, e finalmente, a presença de compostos fosfatados e nitrogenados podem levar a um crescimento descontrolado de plantas aquáticas. É, então, necessário reduzir os componentes orgânicos, fosfatados e nitrogenados, compostos tóxicos, assim como, destruir os microorganismos patogênicos antes do descarte das águas.

#### **2.2.2.2 – Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)**

A disposição de esgotos brutos no solo ou em corpos receptores naturais, como lagoas, rios, oceanos, é uma alternativa que foi e ainda é empregada de forma muito intensa (Campos, 1999).

Dependendo da concentração da carga orgânica lançada, os esgotos provocam a total degradação do ambiente (solo, água e ar) ou, em outros casos, o meio demonstra ter condições de receber e de decompor os contaminantes até alcançar um nível que não cause problemas ou alterações acentuadas, prejudicando assim, o ecossistema local e circunvizinho.

Esse fato demonstra que a natureza tem condições de promover o tratamento de esgotos, desde que não ocorra sobrecarga e que haja boas condições ambientais que permitam a evolução, reprodução e crescimento de organismos que decompõem a matéria orgânica. Em outras palavras, o tratamento biológico é um fenômeno que pode ocorrer naturalmente no solo ou na água, desde que haja condições adequadas.

Uma estação de tratamento de esgotos é, em essência, um sistema que explora esses mesmos organismos que proliferam no solo e na água. Nas estações procura-se, no entanto, otimizar os processos e minimizar custos, para que se consiga a maior eficiência possível na remoção da DBO (ou matéria orgânica).

Nas Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's), todos os componentes poluidores são separados da água antes de retornarem ao meio ambiente. O esgoto bruto que chega às estações passa por diversas etapas de tratamento, que acontece em duas fases, a sólida e a líquida.

As principais etapas podem ser divididas em:

- Tratamento preliminar: gradeamento e desarenadores. Nesta etapa ocorre a remoção de sólidos grosseiros e areia;
- Tratamento primário: decantadores primários. A decantação ocorre em tanques retangulares ou circulares, onde o esgoto é mantido quiescente para permitir que as partículas sólidas decantem;
- Tratamento secundário: reatores biológicos, decantadores secundários e filtros. O tratamento biológico visa a remoção de matéria orgânica não sedimentável. Os decantadores e filtros visam a separação sólido-líquido;
- Tratamento terciário: aplicação de ultravioleta em camada fina. Tratamento para eliminação de patogênicos, não usual devido a custos elevados.

A Figura 2.4 mostra o esquema de um sistema de tratamento de esgoto típico ([www.sabesp.com.br](http://www.sabesp.com.br)). Através da figura pode-se identificar as fases de tratamento e algumas operações unitárias, como, decantadores e digestores.



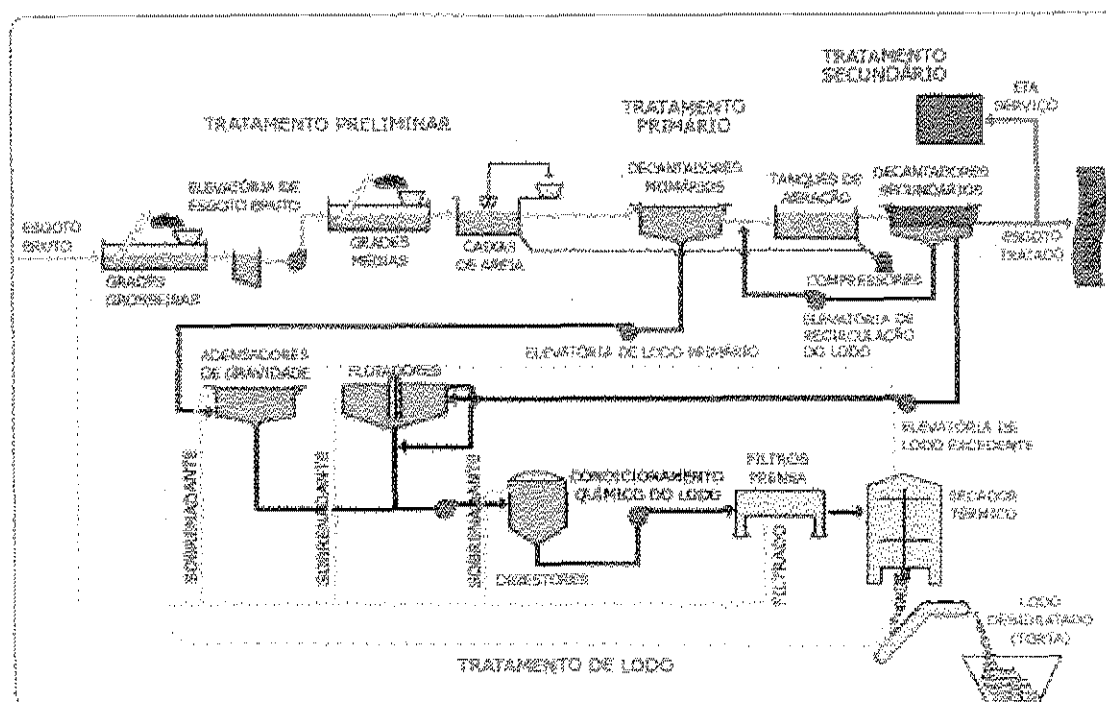


Figura 2.4: Diagrama demonstrativo de um sistema de tratamento de esgoto

#### 2.2.2.2.1 - Estação de Tratamento de Esgoto da Bacia do Ribeirão Samambaia (fonte: E.T.E. Samambaia, Sanasa Campinas S.A.)

Tendo entrado em operação recentemente, a ETE Samambaia recebe um esgoto tipicamente doméstico. Operando em condições de projeto, esta estação, juntamente com as outras já existentes no município de Campinas, trataria 12% do esgoto coletado na cidade.

As etapas do processamento de esgoto na ETE Samambaia estão divididas em:

1. *Estação elevatória de esgoto bruto*: entrando na estação elevatória para ser bombeado por conjuntos moto-bombas, o esgoto é inicialmente gradeado em um cesto removível, cujas barras são espaçadas em 4 cm, retirando assim, os sólidos grosseiros.

2. *Gradeamento fino*: após a eliminação dos sólidos grosseiros, o esgoto a ser tratado passa para a fase de remoção de sólidos finos, composta de duas grades, sendo uma curva mecanizada com braços rotativos e outra de limpeza manual.

3. *Caixa de areia*: remove a areia contida no esgoto afluyente à estação, constituindo-se de canais retangulares onde o ar é introduzido na caixa de areia através de sopradores. A aeração tem como objetivo manter a matéria orgânica em suspensão, sendo a areia acumulada no fundo, de modo a impedir que a mesma passe às unidades de tratamento subseqüentes, causando desgaste de equipamentos bem como inconvenientes às referidas unidades.

4. *Lagoas aeradas*: o esgoto bruto, já gradeado e desarenado, é introduzido nas lagoas aeradas que funcionam em série, constituindo-se de alimento para uma biomassa a ser desenvolvida na massa líquida, a qual constitui-se principalmente de bactérias e protozoários que promovem a decomposição aeróbia da matéria orgânica. Os 18 aeradores flutuantes, sendo 10 com capacidade de 50cv e 8 com capacidade de 30cv, tem a finalidade de introduzir oxigênio na massa líquida bem como proporcionar a homogeneização do conteúdo do tanque.

5. *Decantadores secundários*: o efluente proveniente da lagoa entra nos decantadores secundários onde é efetuada a clarificação de efluente final. Nesta fase ocorre a separação do lodo floculado, composto de bactérias vivas e mortas e matérias orgânicas em suspensão do efluente final tratado, que é lançado no Ribeirão Samambaia com remoção de DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio – e de sólidos em suspensão de 90%.

6. *Digestor*: o lodo é enviado ao digestor, onde ocorre um processo biológico de destruição da matéria orgânica degradável na presença de oxigênio livre, obtendo-se assim lodo digerido estável, praticamente sem cheiro.

7. *Adensador de lodo* : a operação de adensamento do lodo proveniente do digestor consiste no aumento da concentração de sólidos nele contidos, através da remoção parcial da quantidade de água que caracteriza seu grau de umidade, visando desta forma a redução do volume do lodo no seu destino final. O adensamento ocorre em uma unidade denominada de adensador por gravidade, onde o lodo adensado no fundo é enviado para a centrífuga e o líquido sobrenadante é devolvido para a estação elevatória de esgoto bruto para ser novamente tratado.

8. *Desaguamento mecânico do lodo*: a operação de desaguamento destina-se a remoção da umidade do lodo através de centrífuga onde o lodo desidratado ou bio-sólido atinge uma porcentagem de sólidos secos de 20%.

9. *Estação elevatória de recirculação e descarte do lodo*: destina-se às seguintes operações de manuseio do lodo: retorno (recirculação) de lodo biológico decantado do decantador secundário para a lagoa aerada e descarte do lodo de excesso para o digestor.

A Tabela 2.1 apresenta dados sobre as estações já existentes no município de Campinas e os projetos futuros de acordo com o Plano Diretor de Tratamento de Esgotos da Sanasa S.A. em 2002.

Como se pode notar pelos dados da Tabela 2.2, a tendência futura é o aumento da quantidade de esgoto tratado na região de Campinas, que pretende atingir um nível de tratamento de 70% do esgoto coletado.

Segundo pesquisa do IBGE (Revista Isto É, 03 de Abril de 2002, nº1696), 47,5% dos municípios brasileiros não possuem sistema de coleta de esgotamento sanitário, 35% do esgoto coletado na cidade de São Paulo e 52% do esgoto coletado na cidade do Rio de Janeiro não recebem tratamento. Estes números, e outros (Tabela 2.1), confirmam a necessidade de investimento na área de Saneamento Básico.

Tabela 2.1: Porcentagem de municípios com serviço de esgotamento sanitário, por regiões (Revista Isto É, 03 de Abril de 2002, no. 1696):

|              |       |
|--------------|-------|
| NORTE        | 7,1%  |
| NORDESTE     | 42,9% |
| SUDESTE      | 92,9% |
| SUL          | 38,9% |
| CENTRO-OESTE | 17,9% |

Como pode ser visto ver na Tabela 2.2, a tendência no aumento do volume de águas usadas leva ao aumento dos resíduos produzidos durante este tratamento. E esta não é somente uma tendência brasileira como uma tendência mundial.

### 2.2.3 – Lodo de Esgoto, subproduto do tratamento de águas residuárias

#### 2.2.3.1. Formação do Lodo

O lodo é um produto das estações de tratamento de águas residuárias. Estas são uma combinação das águas utilizadas nas residências, nos estabelecimentos comerciais, institucionais e industriais (esgotos em geral). Estas águas podem conter componentes indesejáveis, como substâncias orgânicas, inorgânicas e tóxicas, além de microorganismos patogênicos (Werther e Ogada, 1999).

O lodo de esgoto é um complexo de matéria orgânica e inorgânica ligadas por uma alta porcentagem de água (Lowe, 1995). Parte desta água é vista como água livre e pode ser separada do material sólido por sistemas de baixa energia como a decantação. O restante

está ligado à ou preso à estrutura da fração sólida e requer energia térmica ou química para ser removido.

Tabela 2.2: Plano Diretor de Tratamento de Esgotos, Sanasa. Características das ETE's.

| ETE                            | Pop. (hab.)<br>Ano 2002 | Vazão média<br>(l/s) * | Estágio do empreendimento<br>2º semestre 2002                |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <i>Samambaia</i>               | 39.892                  | 98                     | <i>Em operação</i>                                           |
| Sousa /Joaquim Egídio          | 10.478                  | 72                     | Em licitação Projeto Executivo / início das obras 2003       |
| Arboreto dos <i>Jequitibás</i> | 706                     | 4                      | <i>Em operação</i>                                           |
| Barão Geraldo                  | 45.585                  | 168                    | Serão solicitados estudos e projetos / início das obras 2003 |
| Anhumas                        | 247.345                 | 1044                   | Em licitação Projeto Executivo / início das obras 2003       |
| San Martin                     | 4.219                   | 17                     | Serão solicitados estudos e projetos / início das obras 2003 |
| Santa Mônica                   | 25.401                  | 63                     | Em construção                                                |
| <i>Boa Vista / CIATEC</i>      | 36.727                  | 158                    | <i>Em operação. Ampliação prevista para 2003</i>             |
| Piçarrão/St Bárbara            | 208.489                 | 551                    | Em construção                                                |
| Santa Lúcia                    | 132.322                 | 219                    | Projeto conceitual                                           |
| Bandeiras                      | 20.316                  | 67                     | Projeto conceitual                                           |
| Nova América                   | 4.266                   | 11                     | Projeto conceitual                                           |
| <i>Icarai</i>                  | 1.114                   | 3                      | <i>Em operação</i>                                           |
| Mercedes                       | 2.140                   | 8                      | Projeto conceitual                                           |
| PUCC II                        | 13.302                  | 35                     | Projeto conceitual                                           |
| <i>Santa Rosa</i>              | 4.254                   | 13                     | <i>Em operação</i>                                           |
| Florence                       | 57.968                  | 88                     | Projeto conceitual                                           |
| Ouro Verde                     | 64.417                  | 256                    | Projeto conceitual                                           |
| Marajó                         | 6.847                   | 35                     | Projeto conceitual                                           |
| Itajai                         | 8.080                   | 38                     | Projeto conceitual                                           |
| Viracopos                      | 30.000                  | 35                     | Projeto conceitual                                           |
| Total                          | 963.868                 | 2.983                  | -                                                            |

\* valores nominais de projeto

Normalmente, sistemas gravimétricos, dado o tempo necessário, podem atingir uma concentração de sólidos de 3 a 9 %. Uma maior concentração requer o uso de energia mecânica ou química, o que leva a valores de 25-35% de sólidos secos. Para reduzir ainda mais a umidade é necessário o uso de calor para remover a água.

Segundo Jordão e Pessoa (1995), as características do lodo afetam diretamente o processo de disposição final. Estas características variam em função do tipo de esgoto, do processo e do grau de tratamento e influem na qualidade e na quantidade de lodo gerado, podendo o mesmo ser orgânico, inorgânico, biodegradável, inerte, combustível ou não.

#### **2.2.3.2. - Produção de Lodo**

O mundo vem assistindo a um aumento rápido na produção de lodo e espera-se que isto continue até o próximo século. Tanto nos países desenvolvidos (aumento de 5% ao ano, segundo Hall e Dalimier, 1994 apud Werther and Ogada, 1999) quanto nos países em desenvolvimento, este aumento é devido à vários fatores, dos quais podem ser destacados: o crescente número de estações conectadas às estações centrais, a diminuição dos limites de descarte dos efluentes, assim como a disponibilidade de novas tecnologias capazes de atingir alta eficiência no tratamento de água.

Segundo Machado (2001) a produção de lodo em alguns estados brasileiros pode ser visto na Tabela 2.3.

O aumento da quantidade de lodo produzida fica relevante quando se olha para o crescente aumento dos custos de transporte e descarte. Logo há uma necessidade de encontrar maneiras de diminuir seu conteúdo de umidade, a fim de reduzir a quantidade de material a ser descartado.

Tabela 2.3: Produção de esgoto e de lodo para alguns estados brasileiros (Machado, 2001)

| Estado             | Média <i>per capita</i> da<br>contribuição de esgoto<br>(litros/hab.dia) | Média <i>per capita</i> de<br>lodo gerado<br>(kg SST*/hab.ano) | Média <i>per capita</i> de<br>lodo gerado<br>(g SST*/hab.dia) |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Bahia              | 150                                                                      | -                                                              | -                                                             |
| Ceará              | 176,2                                                                    | 7,1                                                            | 20                                                            |
| Distrito Federal   | 157,08                                                                   | 12,37                                                          | 34                                                            |
| Espírito Santo     | 246,27                                                                   | 7,99                                                           | 22                                                            |
| Goiás              | 137,39                                                                   | 6,21                                                           | 17                                                            |
| Mato Grosso        | 172,93                                                                   | 11,41                                                          | 31                                                            |
| Mato Grosso do Sul | 226,7                                                                    | 5,58                                                           | 15                                                            |
| Minas Gerais       | 69,45                                                                    | 12,56                                                          | 35                                                            |
| Paraíba            | 216                                                                      | 5,48                                                           | 15                                                            |
| Paraná             | 159,86                                                                   | 7,14                                                           | 19                                                            |
| Pernambuco         | 99,84                                                                    | 13,35                                                          | 37                                                            |
| Rio de Janeiro     | 98,57                                                                    | 14,62                                                          | 40                                                            |
| Rio Grande do Sul  | 119,15                                                                   | 10,78                                                          | 30                                                            |
| Roraima            | 201,6                                                                    | 5,48                                                           | 15                                                            |
| Santa Catarina     | 135,23                                                                   | 12,73                                                          | 35                                                            |
| São Paulo          | 154,43                                                                   | 13,31                                                          | 36                                                            |
| Sergipe            | 111,8                                                                    | 9,97                                                           | 27                                                            |
| Tocantins          | 282,82                                                                   | 7,47                                                           | 20                                                            |
| <i>média</i>       | <i>153,43</i>                                                            | <i>9,08</i>                                                    | <i>24,8</i>                                                   |

\* SST= sólidos suspensos totais

### 2.2.3.3 - Tipos de Tratamento de Lodo

O lodo é de longe o subproduto mais volumoso de um sistema de tratamento de águas e seu processamento e descarte, um dos mais complexos problemas ambientais que

os engenheiros enfrentam. Isto ocorre porque o lodo resultante dos processos de tratamento de água é, usualmente, uma suspensão muito diluída, que contém tipicamente de 0,25 a 12% de sólidos, dependendo da operação e do processo usado.

O tratamento dos subprodutos sólidos gerados nas diversas unidades de uma ETE é uma etapa essencial do tratamento dos esgotos. Ainda que o lodo possa, na maior parte das etapas do seu manuseio, ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo do líquido sendo tratado.

De maneira geral, os subprodutos sólidos gerados no tratamento biológico dos esgotos são o material gradeado, a areia, a espuma, o lodo primário e o lodo secundário.

Destes subprodutos, o principal em termos de volume e importância é representado pelo lodo. Determinados sistemas de tratamento têm a retirada do lodo apenas eventual. Nestes casos, o lodo já sai usualmente estabilizado, requerendo apenas a sua disposição final. Tal é o caso dos sistemas de tratamento anaeróbio. Em outros sistemas, como o das lagoas facultativas, o lodo usualmente permanece retido no sistema durante todo o horizonte de operação, não necessitando ser removido e tratado.

Os fluxogramas dos sistemas de tratamento de lodo possibilitam diversas combinações de operações e processos unitários, compondo distintas seqüências. As principais etapas de tratamento, com os respectivos objetivos, são:

- Adensamento: remoção de umidade (redução de volume)
- Estabilização: remoção de matéria orgânica (redução de sólidos voláteis)
- Condicionamento: preparação para a desidratação (principalmente mecânica)
- Desidratação: remoção de umidade (redução de volume)
- Disposição final: destino final dos subprodutos.



Segundo Hudson e Lowe (1996), os processos típicos de processamento de lodo são mostrados na Tabela 2.4:

Tabela 2.4: Diferentes tecnologias de tratamento do lodo de esgoto.

|                            |                                                  |
|----------------------------|--------------------------------------------------|
| Adensamento                | Gravimétrico, Mecânico, Flotação                 |
| Condicionamento            | Químico, Térmico                                 |
| Tratamentos biológicos     | Digestão anaeróbia<br>Digestão aeróbia           |
| Estabilização com calcário | -                                                |
| Compostagem                | -                                                |
| Desidratação               | Filtros, Centrífuga, Membranas e Secagem térmica |
| Métodos de destruição      | Pirólise<br>Oxidação Úmida<br>Incineração        |

#### 2.2.3.3.1 - Estabilização

Estabilização com calcário consiste na adição de calcário ao lodo bruto em quantidade suficiente para elevar o pH a 12 ou a um valor maior, ambiente impróprio para a sobrevivência de microorganismos (Werther and Ogada, 1999).

A estabilização através de adição de calcário leva a um aumento na quantidade de lodo e diminui seu poder calorífico. Para o descarte em aterros a adição de calcário aumenta os custos do descarte.

#### **2.2.3.3.2 – Condicionamento térmico**

O tratamento térmico também estabiliza e condiciona o lodo. Envolve dois estágios de aquecimento, a 30-70 e 75-190°C e a uma pressão de 26 bar por um curto tempo. Isto coagula os sólidos, quebra a estrutura dos géis e reduz a afinidade da água com os sólidos (Werther e Ogada, 1999).

O tratamento térmico não causa mudanças significativas na quantidade de lodo, mas experiências em aplicações em larga escala mostraram que devido ao retorno das substâncias orgânicas dissolvidas, metais pesados e  $\text{NH}_3$  retornam para o lodo inicial e a qualidade do efluente diminui.

#### **2.2.3.3.3 - Digestão biológica**

A digestão biológica, que é usada em forma de lagoas ou leitos, envolve a conversão parcial da matéria orgânica em gases e resíduos estáveis com a ajuda de bactérias, algas e fungos, tanto na ausência (anaeróbia) como na presença (aeróbia) de oxigênio, durante a qual as bactérias patogênicas são destruídas.

A digestão é muito usada para o lodo municipal, mas não é adequada para o lodo industrial, o qual pode conter uma alta concentração de substâncias não digeríveis e/ou substâncias químicas que podem destruir os microorganismos digestores .

Dentro desta categoria de tratamento encontram-se as lagoas anaeróbias, aeróbias e facultativas (anaeróbias no fundo e aeróbias na superfície), além dos leitos ativados e dos reatores biológicos.

A estabilização através da digestão leva a um decréscimo da quantidade de lama, desde que parte das substâncias orgânicas é convertida em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . Isto, contudo, reduz seu poder calorífico de aproximadamente 17,5 MJ/kg (b.s.) a 10,5 MJ/kg (b.s.), então se pode dizer que o processo de digestão não é desejável quando se pretende incinerar o lodo (Werther e Ogada, 1999).

#### **2.2.3.3.4. Remoção da água do lodo: desidratação e secagem**

O efeito do conteúdo de umidade no volume do lodo é enorme, e as técnicas de manuseamento são direcionadas a reduzir esta umidade e assim diminuir o volume do material a ser descartado. A desidratação é, portanto, um pré-requisito para qualquer posterior tratamento da lama, assim como manuseamento, transporte e descarte final. O lodo pré-seco é mais fácil de ser guardado, transportado e alimentado em equipamentos.

A desidratação pode ser atingida de várias maneiras. Através de simples decantação ou espessamento, ou seja, o esgoto é mantido quiescente, em tanques retangulares ou circulares, para permitir que as partículas sólidas decantem. Outra maneira, é a desidratação mecânica, que utiliza os filtro a vácuo, por pressão, e as centrifugas. Por fim, a incineração e a secagem, também são métodos de eliminar a umidade do esgoto.

A lama de esgoto que vem direto do sistema de tratamento de água possui um conteúdo de umidade médio de 99%. Quando ela passa por um processo de espessamento (sedimentação) sua concentração pode chegar a 90%.

A desidratação mecânica, que inclui filtros-prensa, filtros a vácuo e centrifugas, pode diminuir a umidade para cerca 80% de  $\text{H}_2\text{O}$ , sendo que, juntamente com a adição de coagulantes (Smollen e Kafaar, 1997), pode chegar a 65% .

Através da secagem, realizada em leitos fluidizados e deslizantes ou em fornos, uma grande redução do conteúdo de umidade pode ser atingido (5% ou menos).

#### 2.2.3.3.5. - Processos térmicos destrutivos

Existem muitas tecnologias disponíveis, tanto no mercado quanto em desenvolvimento, para a eliminação do lodo. Elas podem ser divididas em três grupos básicos:

- mono-incineração: fornos múltiplos, leitos fluidizados, fornos rotativos; fornos ciclones, etc;
- co-combustão: com carvão em plantas de produção de energia, com outros combustíveis, com resíduos sólidos municipais e em outros processos, como na produção de tijolos, cimento e asfalto;
- processos alternativos: oxidação úmida, pirólise, gaseificação, etc.

Alguns fatores são comuns a estas tecnologias (Werther e Ogada, 1999):

- Após a queima, até 50% em massa do material de entrada transforma-se em cinzas e, a maior parte dos metais pesados tóxicos são retidos nesta fase sólida, complicando sua disposição final;
- Durante a secagem, o lodo passa através de uma fase “grudenta” ou *sticky*, que ocorre quando a concentração de sólidos está entre 50 a 60%. Nesta fase o lodo não flui livremente, complicando o processo de secagem;
- Nitrogênio, cloro, enxofre, dioxinas e furanas, etc presentes no lodo são liberados como gases poluidores sob várias formas durante a combustão; o gás de exaustão

necessita de uma limpeza extensiva para atingir os limites de emissão rígidos normalmente impostos à incineração de resíduos;

- O lodo mecanicamente desidratado tem de 70 a 80% de umidade; o valor calórico líquido deste material não é suficiente para uma combustão autotérmica, e combustível suplementar é necessário.

Segundo Werther and Ogada (1999), a mono-combustão de lodo de esgoto, especialmente em fornos múltiplos e em leitos fluidizados, terão um papel importante no futuro; co-incineração, particularmente com resíduos sólidos municipais é uma alternativa atrativa devido ao fato de que se espera que o volume de resíduos sólidos aumentará muito no futuro em vista da diminuição dos aterros disponíveis.

As outras tecnologias alternativas estão apenas sendo introduzidas no mercado e não foram tão estudadas quanto a mono-combustão.

#### **2.2.4 – Descarte Final do Lodo**

Geralmente, a seleção do melhor tipo de rota de descarte para o lodo de uma planta de tratamento particular começa pela identificação do destino final mais seguro e ambientalmente aceitável e isto, na verdade, indicará o tipo de tratamento requerido. Este procedimento de seleção de rotas dificilmente ocorre, sendo que cada estação de tratamento acaba por determinar qual a melhor solução para o seu problema. Frequentemente, as rotas existentes são reciclo como fertilizante, aterramento, despejo no mar e incineração.

O reciclo do lodo como fertilizante possui várias vantagens, como o retorno dos materiais orgânicos ao biociclo, e também substituição da aplicação de fertilizantes artificiais, cuja produção requer uma grande quantidade de energia (Werther e Ogada,

1999). Sua maior limitação é a concentração de metais pesados (cromo, cádmio, níquel, zinco são alguns exemplos). Uma alta concentração destes metais impede que o lodo possa ser usado na agricultura (Hall e Zmyslowska, 1997).

A utilização de lodo desidratado na produção de materiais de construção e como aditivos para asfalto foram estudados (Azia e Koe apud Bowen et al, 1991). O uso do lodo em concreto e em misturas betuminosas teve sucesso. A incorporação de lodo contendo metais em tijolos não resultou na liberação destes durante a fabricação dos tijolos (Alleman et al, 1990 apud Bowen et al, 1991).

O lodo também pode ser usado para gerar vapor e eletricidade (Oslos, 1990 apud Bowen et al, 1991). Conversão de lodo em óleo através de conversão térmica aprisionou todos os metais pesados no resíduo sólido da combustão, exceto arsênico e mercúrio (Bridle et al, 1990 apud Bowen et al, 1991).

O descarte do lodo em aterros sanitários ainda constitui um dos meios mais usados pelas nações desenvolvidas. Cerca de 40% (em média) do lodo produzido na União Européia é descartado desta maneira.

Um emissário submarino de águas residuárias no Brasil foi monitorado de 1974 até 1988, não mostrando um impacto adverso no ecossistema marinho (Jordão e Leitão, 1995). Contudo, o descarte no mar vem sendo amplamente rejeitado devido a critérios ambientais. Na Europa, o despejo do lodo no oceano não é mais permitido a partir de 31 de dezembro de 1998, devido a um acordo da Conferência do Mar do Norte (Goldsmith, apud Wether and Ogada, 1999).

A incineração do lodo apresenta uma série de vantagens não apresentada por outros tratamentos, incluindo a redução de um grande volume do lodo a pequena quantidade de cinzas estáveis. Além de que, o poder calorífico do lodo seco é correspondente ao do

carvão e, portanto, através da incineração esta energia pode ser recuperada (Werther e Ogada, 1999).

Em vastas áreas urbanas, onde grandes quantidades de lodo são produzidas, a falta de espaço disponível para descarte, a necessidade de eliminar a formação de odores dos aterros e as objeções das populações vizinhas fazem da incineração um método de descarte de lodo muito atraente.

Existem muitos avanços na tecnologia da incineração. Pode-se controlar a emissão de gases e os custos estão se tornando muito mais competitivos, de modo que a incineração está sendo vista como a única solução para os problemas crescentes de descarte de lodo (Hall, 1995 apud Wether and Ogada ,1999)).

Todas as indicações sugerem que a produção do lodo, ou lama, resíduo do tratamento de água, vai continuar a crescer e, em algum momento, muitas cidades dos países desenvolvidos ou não, terão que encontrar uma solução adequada para o descarte da quantidade esperada deste material. Com o futuro dos aterros e do reciclo na agricultura restritos, e com o fim do despejo nos oceanos, um crescente interesse está agora sendo direcionado ao processo de incineração e de outros tratamentos térmicos.

Dentro da União Européia, a maioria dos países que tratam e descartam seus lodos usam aterros (40% em média) ou disposição na agricultura (37% em média). O descarte no mar ainda é utilizado em países como Irlanda (35%), Espanha (10%) e Reino Unido (30%).

Na Austrália, o tratamento do lodo e seu descarte são amplamente centrados na forma de lagoas de estabilização. O despejo no oceano vem sido diminuído e incineração é relativamente muito cara em comparação às grandes áreas disponíveis para depósito.

No Brasil não existe muita informação a respeito do tipo de processo que se faz para tratar águas residuárias. Segundo Machado (2001) os dados são bastante escassos, podendo-se ter algumas estimativas, que são mostradas na Tabela 2.5. Alguns estados e algumas cidades brasileiras tem programas de coleta e estações de tratamento, como por exemplo, Paraná, Santa Catarina, Sergipe, Viçosa (MG), Penápolis (SP), e Campinas (SP). Basicamente, os sistemas se concentram em: filtros biológicos e de areia, lagoas anaeróbias, aeróbias, facultativas e de maturação e reatores de fluxo anaeróbio ascendente.

Tabela 2.5: Destino final do lodo no Brasil

| Destino final    | Quantidade estimada (t SST*/ano) | % total |
|------------------|----------------------------------|---------|
| Aterro Sanitário | 75844,25                         | 50,0    |
| Agricultura      | 22973,25                         | 15,1    |
| Indefinido       | 52907,00                         | 34,9    |

\* SST= sólidos suspensos totais

No caso da cidade de Campinas por exemplo, segundo dados da Sanasa, 90% do esgoto da cidade é coletado sendo que 5% é tratado antes de voltar para os rios da região. Estes 5% são tratados por filtros de areia e biológicos, e lagoas anaeróbias. Após o tratamento do esgoto bruto, e lodo remanescente (basicamente composto de material biológico) é seco em tanques de secagem natural e o material seco é depositado em aterros.

### 2.2.5 – Características do lodo quanto à secagem

De um modo geral, qualquer que seja a rota de descarte ou o processo de tratamento do lodo produzido em uma planta de tratamento de água, a sua desidratação e/ou secagem é uma condição necessária e crítica, servindo, em última instância, para reduzir os custos de transporte e facilitar o manuseio. No caso da incineração, a umidade é indesejável já que diminui o poder calorífico do lodo, além de influenciar nos projetos dos incineradores, não



sendo possível incinerar materiais com umidade superior a 70%. Assim, vê-se necessária uma pequena discussão sobre as características de secagem do lodo de esgoto.

O lodo é uma mistura complexa de matéria orgânica e inorgânica ligada por uma alta porcentagem de água. Coackley e Allos (1962) apud Lowe (1995) estudaram a secagem de vários lodos baseando-se na abordagem clássica de Sherwood (1929).

Usando o conceito de umidade crítica, concluíram que a umidade no lodo se apresenta de quatro formas, mostradas na Figura 2.5 e definidas como:

- **umidade livre**, o limite sendo o primeiro ponto de umidade crítica;
- **umidade capilar**, presa entre o primeiro e segundo pontos críticos\*;
- **umidade flocular ou particulada**, presa entre as partículas do lodo, abaixo do segundo ponto crítico;
- **umidade quimicamente ligada**, abaixo do ponto de equilíbrio.

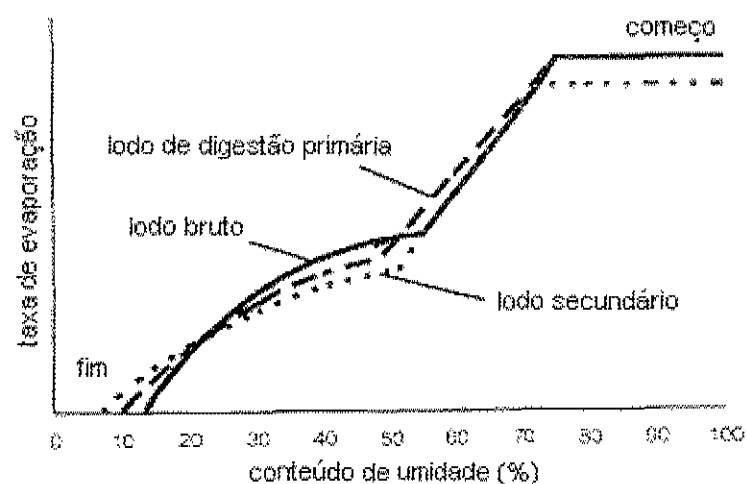


Figura 2.5: Curva de secagem características de lodo de esgoto  
(taxa de secagem x conteúdo de umidade) (Lowe, 1995).

As curvas apresentadas na Figura 2.5, são curvas de secagem para lodos em diferentes estágios de processamento, como lodo bruto, lodo de digestão primária e secundária. As curvas têm as mesmas características, com ligeiras diferenças, como por exemplo, a curva de lodo bruto tem uma umidade final ou quimicamente ligada superior aos lodos processados, o que mostra que o processo de digestão, além de consumir a matéria orgânica, muda a forma com que a água se liga às partículas sólidas.

Outros trabalhos foram realizados: Sato et al., 1982; Smollen, 1990; Tsang & Vesilind, 1990. Mais recentemente, Vesilind and Hsu (1997) apresentaram a água, ou umidade, de quatro formas, em relação ao tipo de separação:

- **umidade livre:** água que não está ligada aos sólidos e que pode ser separada por sedimentação, ou espessamento;
- **umidade intersticial:** água que está presa entre as estruturas dos flocos que se formam, ou dentro das células. Poder ser recuperada quando a estrutura dos flocos é quebrada ou quando a célula é destruída. Ela pode ser removida por desidratação mecânica, como por exemplo centrifugação;
- **umidade vicinal ou superficial:** água associada às partículas sólidas. Está presa à superfície das partículas devido à estrutura molecular das moléculas de água e não pode ser removida por meios mecânicos;
- **umidade de hidratação:** água quimicamente ligada à partícula e que só pode ser removida pela destruição da mesma.

A Figura 2.6 mostra o esquema de distribuição da umidade no lodo.

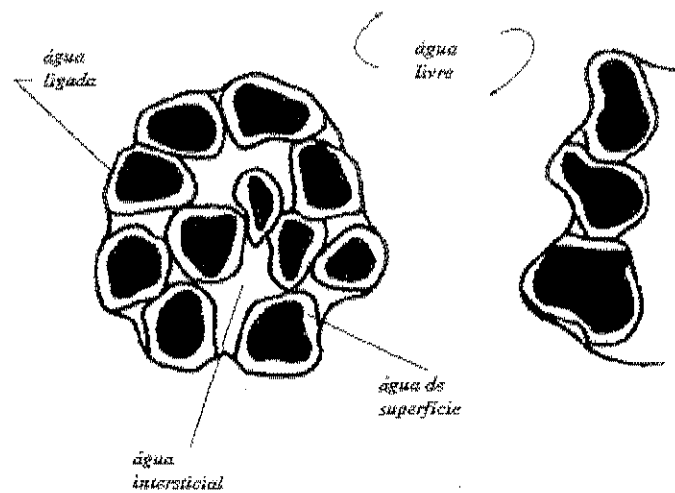


Figura 2.6: Visualização conceitual da distribuição da umidade no lodo  
(Tsang and Vesilind, 1990).

Toda esta preocupação em descobrir o tipo de umidade está relacionada com a curva de secagem. Smollen (1990) ateve-se à determinação dos pontos críticos da curva de secagem do lodo. Segundo seus estudos, estes pontos variam para os diversos tipos de lodo que secou, mostrando mais uma vez que a estrutura das partículas sólidas é um fator importante.

A umidade pode ser definida em termos da força de ligação água-sólido e a magnitude destas forças influenciam na energia específica necessária para a sua separação. Este conhecimento é um pré-requisito para uma seleção racional de um processo mais custo-efetivo para a redução de volume do lodo.

Enquanto vários trabalhos discutem os tipos de umidade e os pontos críticos da curva de secagem, são as mudanças nas características físicas nestes pontos que interessam ao processo. Pois tecnologias já estabelecidas, desenvolvidas a partir da teoria clássica de secagem, não podem ser simplesmente adotadas para a secagem de lodo (Lowe, 1995).

Gruter et al. (1990) descreveu como estas mudanças ocorreram quando se processou o lodo através de um secador de camada fina. Houve a formação de três zonas:

- 1) zona úmida, quando o lodo escorre bem e pode ser atomizado sobre o tubo quente;
- 2) zona “grudenta” (*sticky*), quando o lodo toma uma forma pastosa;
- 3) zona granular, quando o lodo desintegra-se facilmente e mistura-se livremente.

Em termos operacionais, a zona 2 é a grande vilã das tecnologias existentes de secagem, pois é uma fase aderente, onde a lama fica pastosa e não flui.

Esta zona é atingida ao se chegar a aproximadamente 60% de umidade e, recorrendo à Figura 2.5, ao atingir-se a segunda zona de secagem decrescente. De acordo com as classificações mencionadas, esta fase está ligada à umidade vicinal ou superficial, a qual é associada à estrutura das partículas.

Este comportamento acaba dificultando a secagem completa do lodo numa só etapa ou unidade. Uma das maneiras de contorná-lo é fazer o reciclo do lodo seco à entrada do secador.

## 2.3 – FRITURA DE IMERSÃO

### 2.3.1. Introdução

A secagem de sólidos é possível usando diferentes abordagens, sendo uma delas a fritura. Uma de suas vantagens é a curta duração – 90s, dependendo da espessura do produto (Trystram et al, 1998). O processo de fritura pode ser considerado uma rápida combinação de secagem e cozimento (Gamble et al, 1987).

Fritura de imersão é uma das operações unitárias mais usadas na preparação de alimentos, tanto industrialmente quanto domesticamente. Pode ser definida como um processo de cozimento e secagem através do contato com o óleo quente e envolve, assim, transferência de calor e massa simultâneos (Mittelman Ashkenazi et al, 1984).

A maior parte dos trabalhos encontrados em literatura concentra-se na fritura e análise de comportamento de vegetais, em especial da batata (Mittelman Ashkenazi et al, 1984; Gamble et al, 1987; Guillaumin, 1988; Gamble e Rice, 1988; Lamberg et al, 1990; Kozempel et al, 1991; Reddy e Das, 1993; Baumann e Escher 1994, Farkas et al, 1994; Singh, 1995, Dincer, 1996, Farkas et al, 1996 a e b; Costa et al, 1998; Hubbard & Farkas, 1998; Costa et al, 1999; Costa e Oliveira, 1999; Sahin et al, 1999; Gupta et al, 2000; Farkas & Hubbard, 2000; Krokida et al, 2001 e Farid, 2002), mas também da banana (Totte et al, 1996; Diaz et al, 1996; Trystam, et al, 1998; Courtois et al, 1998; Diaz et al, 1999), e da mandioca (Vitrac 2000, Vitrac et al, 2002).

Outros trabalhos são encontrados sobre a fritura de massas a base de cereais ou grãos (Moreira et al, 1995; Moreira et al, 1997; Osman et al, 2000, Kadan et al, 2001) e carnes de vaca e frango (Ateba & Mittal, 1994 a e b; Rao & Delaney, 1995; Dincer & Yildiz, 1996, Ngadi et al, 1997; Balasubramaniam et al, 1997; Mittal & Zhang, 2000) .

Em relação ao estudo de materiais não alimentícios pode-se citar o trabalho publicado em 1984 por Mittelman sobre a fritura de uma espuma de formaldeído como material modelo para certos tipos de alimentos. Vitrac (2000) apresentou extenso estudo sobre a fritura de tubérculos tipo mandioca, contudo apresenta resultados também sobre fritura de pedaços de madeira.

### **2.3.2. O Processo de Fritura e suas Características**

A fritura de imersão é um dos processos mais antigos de preparação de alimentos. Há décadas, os consumidores apreciam os produtos fritos por sua combinação única de aroma e textura. Alguns exemplos são, batatas fritas, sonhos, salgadinhos, peixes e frango frito. A tecnologia de fritura originou-se e desenvolveu-se ao redor do mar mediterrâneo, devido à influência do óleo de oliva (Varela et al. 1988). Hoje, os produtos fritos são encontrados em muitos países na Europa, Ásia e Américas do Norte e do Sul (Moreira et al, 1999).

Apesar da fritura ser uma das operações mais utilizadas no preparo de alimentos, ela é pouco entendida e pouco discutida na literatura (Levine, 1990a,b e c).

A fritura de imersão pode ser definida como um processo no qual um alimento é imerso num banho de óleo ou gordura a uma temperatura superior ao ponto de ebulição da água, normalmente entre 150-200°C (Farkas et al, 1996a e b ).

Alguns modelos teóricos que descrevem a fritura podem ser encontrados na literatura. É uma modelagem bastante complexa, necessitando de solução simultânea de equações de transferências de calor e massa complexas.

A maior parte das operações de fritura pode ser dividida em dois casos mais simples. O primeiro caso assume que a fritura é limitada pela transferência de calor – ou seja, a remoção de água do produto é controlada pela velocidade de aquecimento do objeto sendo frito. Este calor é usado para transformar água líquida em vapor, o qual sai do alimento assim que é formado. Esta situação parece descrever a fritura de espumas rígidas (Mittelman et al, 1984) e a fase inicial de fritura de qualquer material. Esta fase é quando a crosta se forma. Esta crosta é menor que um milímetro, mas tem um papel muito importante na textura do produto.

De uma maneira análoga ao congelamento, nesta fase há o crescimento de uma camada seca, comparável ao crescimento de uma camada de gelo. A interface entre a camada seca e o material úmido está a 100°C° (ponto de ebulição da água). O que controla a taxa de transferência de calor nesta situação é o gradiente entre a temperatura do óleo e o ponto de ebulição da água.

Depois da fase inicial, onde se forma a crosta, o processo de fritura não é mais limitado pela transferência de calor. Neste segundo caso, o fenômeno passa a ser controlado pela transferência de massa. A taxa de remoção de umidade do material é controlada pela difusão da umidade do centro do produto em direção à superfície externa. A força-motriz para a difusão é a diferença entre a umidade do material e a umidade de equilíbrio do meio. Umidade de equilíbrio é a umidade que o produto atingirá se mantida uma temperatura de fritura e a uma pressão parcial de umidade no fritador.

Guillaumin (1988) descreve um material frito como possuindo três zonas características:

- superfície: uma camada enrugada formada pela desidratação da parte mais externa do alimento durante a fritura. Sua formação começa quando a temperatura do meio de fritura está perto de 100°C. Sua umidade é de 3%, aproximadamente;

- crosta: durante a fritura, o alimento perde água, na forma de vapor; uma crosta se forma com inúmeras cavidades, poros e uma maior superfície. O óleo preenche parcialmente os espaços deixados pela água;
- núcleo: a parte interna ou núcleo é o alimento cozido.

O produto da fritura de imersão possui diferentes estruturas e propriedades: mudanças de textura, superfície atraente e saborosa, crosta, aumento de palatabilidade, e reações de escurecimento.

Durante a fritura, a gordura é continuamente e repetitivamente usada a altas temperaturas. Transformações oxidativas usualmente acompanham e provavelmente precedem as transformações térmicas de um meio de fritura. O produto frito absorve este óleo aquecido e contribui consideravelmente na ingestão de gorduras dos consumidores (Guillaumin, 1988).

A temperatura, o tipo de óleo e o tempo de residência são fatores importantes no processo de fritura. A temperatura e o tempo de residência dentro do banho de óleo afetam a quantidade de energia transferida para o produto e estão intimamente ligados. O óleo é não somente o meio de transferência de calor, mas também entra no alimento conferindo-lhe nutrientes e aromas (Gamble et al, 1987).

#### **2.3.2.1. Equipamento para fritura**

Um fritador consiste de uma câmara onde o óleo é aquecido e o alimento é colocado. O tamanho do fritador pode variar de pequenos banhos de óleo a grandes câmaras industriais de processo contínuo (Moreira et al, 1999).



Num fritador em batelada, o alimento é posicionado numa cesta que é introduzida no banho de óleo. Num fritador contínuo, uma esteira transporta o material através do banho. O produto é geralmente retirado do óleo com a ajuda de uma rede ou de pás.

A velocidade e a eficiência dos processos de fritura dependem da temperatura e da qualidade do óleo. Esta temperatura varia de 150 a 190°C.

### **2.3.2.2. Meio de fritura: óleos e gorduras**

Gorduras e óleos incluem óleos vegetais, óleos de palma, e óleos animais. Os mais consumidos são, segundo Moreira et al (1999):

- Óleos vegetais comestíveis: algodão, oliva, amendoim, canola, soja e girassol;
- Óleos de palma: coco, palma e palma kernel;
- Gorduras animais: manteiga e sebo.

Gorduras e óleos têm um papel funcional e sensorial bastante importante nos alimentos. Eles são responsáveis por carregar, aumentar e liberar aromas de seus ingredientes assim como interagir com outros ingredientes para desenvolver a textura e a sensação características dos alimentos fritos.

Além disto, gorduras e óleos são fontes de energia, fornecendo 9kcal/g (mais de duas vezes o valor fornecido pelas proteínas ou carboidratos), vitaminas lipossolúveis (A, D, E e K) e os essenciais ácidos linolêicos e linolênicos, responsáveis pelo crescimento (Giese, 1996).

### 2.3.2.2.1 - Propriedades dos óleos e gorduras

Basicamente, a diferença entre gordura e óleo é que a gordura tem origem animal e o óleo tem origem vegetal. Gorduras são sólidas a temperatura ambiente, enquanto óleos mantêm-se líquidos nesta condição.

Mais de 95% das gorduras e óleos são compostos por triglicérides, um composto formado por glicerol e ácidos graxos. O tipo e a localização destes ácidos graxos na estrutura do glicerol definem as características físicas e químicas das várias gorduras.

### 2.3.2.2.2 - Estrutura química dos óleos e gorduras

Gorduras são ésteres de ácidos graxos e glicerol (Moreira et al, 1999). A maioria das gorduras aparece na forma de triglicérides, na qual três ácidos graxos estão ligados ao glicerol. Ácidos graxos contêm um grupo carboxílico (COOH) e uma cadeia de carbono de comprimento variável. Sua fórmula geral é R-COOH, onde R é o grupo alifático. Com raras exceções, os ácidos graxos são lineares, variando de 4 a 24 carbonos e contendo um número par de carbonos.

Gorduras são ésteres, mais comumente derivados de uma reação simples de uma molécula de glicerol e três moléculas de ácidos graxos, produzindo uma molécula de triglicérides e três moléculas de água (Stauffer, 1996).



A cadeia carbônica do ácido pode ser saturada (somente ligações simples), mono-insaturada (contendo uma ligação dupla) ou poli-insaturada (duas ou mais ligações duplas). Os ácidos graxos mais comuns, encontrados em gorduras e óleos comestíveis, contêm 16

ou 18 átomos de carbono. Estes incluem os ácidos saturados: palmítico (C16:0) e esteárico (C18:0); o ácido mono-insaturado oléico (C18:1), e os ácidos poli-insaturados linoléico (C18:2), com duas ligações duplas e o linolênicos (C18:3), com três (Tabela 2.6).

Tabela 2.6: Estrutura molecular de ácidos graxos simples (Stauffer, 1996).

| Ácido graxo                      | Estrutura molecular                                                                                       |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ácido palmítico (saturado)       | $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_{15}\text{CH}_3$                                                                |
| Ácido Oléico (monoinsaturado)    | $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{CH}_3$                                 |
| Ácido Linoléico (poliinsaturado) | $\text{HOOC}(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_4\text{CH}_3$ |

A reatividade química dos ácidos graxos insaturados é determinada tanto pela posição quanto pelo número de duplas ligações na molécula. A reatividade aumenta notadamente com o aumento do número de duplas ligações, contanto que elas sejam conjugadas (separadas somente por uma simples ligação) ou separadas por uma unidade metileno ( $-\text{CH}_2-$ ). Se o ácido graxo tem duas duplas isoladas (separadas por duas ou mais unidades metileno), sua reatividade é somente um pouco maior que a de um ácido graxo que tem somente uma dupla ligação. Estas diferenças são importantes quando o ácido graxo é submetido à oxidação e também ao processo de hidrogenação.

#### 2.3.2.2.3 - Reações envolvendo óleos e gorduras

Durante a fritura de imersão, gorduras e óleos são continuamente usados a altas temperaturas em presença de oxigênio atmosférico e são abusados térmica e oxidativamente. O aquecimento na presença de ar causa conversão parcial das gorduras e óleos em produtos voláteis, em derivados não voláteis, em dímeros, polímeros e substâncias cíclicas.

As reações pelas quais eles passam são chamadas reações de degradação, pois estas reações mudam a composição do óleo, e na maioria das vezes, ele se torna não adequado para sua função como alimento.

O óleo deteriora-se o tempo todo. Desde o momento em que é produzido, quando da sua estocagem, durante o aquecimento e resfriamento e principalmente durante a fritura. Estas reações estas resumidas na tabela 2.7.

Durante a fritura, o óleo é exposto ao ar, vapor, calor e ao alimento. É quando o óleo passa por muitas mudanças químicas e físicas. A maior reação química que acontece durante a fritura é a hidrólise (Moreira et al, 1999).

Reação de Hidrólise :  $\text{TRIGLICÉRIDES} + \text{H}_2\text{O} = \text{AGL} + \text{GLICEROL}$

O vapor produzido durante a fritura reage com os triglicerídeos para formar ácidos graxos livres (AGL), monoglicerídeos, diglicerídeos e glicerol (glicerina). A quantidade de AGL presente e seus produtos de quebra têm um odor característico. Eventualmente, eles provocam o aparecimento de odores desagradáveis (O'Brien, 1993).

Além das alterações químicas, mudanças nas propriedades físicas e térmicas dos óleos, tais como tensão superficial, viscosidade, densidade, calor específico e coeficiente de transferência de calor podem afetar a qualidade do produto final.

O primeiro sinal de deterioração do óleo é a formação de odores e aromas distintos. Muitos dos produtos de decomposição são de baixo peso molecular e são carregados pelo vapor assim que são formados.

Tabela 2.7: Reações de degradação do óleo (Moreira et al, 1999)

| Período                    | Fator                          | Temperatura | Reação        | Velocidade da reação |
|----------------------------|--------------------------------|-------------|---------------|----------------------|
| Estocagem                  | Ar ( $O_2$ )                   | Ambiente    | Oxidação      | Baixa                |
| Aquecimento e resfriamento | Ar ( $O_2$ )                   | Quente      | Oxidação      | Alta                 |
|                            |                                |             | Isomerização  | Alta                 |
|                            |                                |             | Polimerização | Baixa                |
|                            |                                |             | Pirólise      | Baixa                |
| Fritura                    | Ar ( $O_2$ ), água, e alimento | Quente      | Oxidação      | Alta                 |
|                            |                                |             | Isomerização  |                      |
|                            |                                |             | Polimerização |                      |
|                            |                                |             | Pirólise      |                      |
|                            |                                |             | Hidrólise     |                      |

A cor do óleo também escurece, o que é resultado principalmente das reações oxidativas; compostos altamente coloríficos são formados por um mecanismo não totalmente compreendido.

O óleo torna-se mais viscoso quando é aquecido, devido ao processo de polimerização e também à oxidação, hidrólise e isomerização. Na fritura, o óleo é o meio de transferência de calor. Espessamento reduz a taxa de transferência de calor e isto significa um maior tempo para o cozimento e coloração do alimento. Isto também aumenta a absorção de óleo (McGill, 1980).

Perda de parte dos alimentos no óleo, esgotamento do próprio óleo e absorção de oxigênio na interface óleo-alimento contribuem para transformar um meio que é pura triglicéride em uma mistura de centenas de compostos.

As substâncias que afetam a transferência de calor na interface óleo-alimento contribuem para reduzir a tensão superficial entre dois materiais imiscíveis. Estas substâncias agem como agente molhantes ou surfactantes. Com a degradação do óleo, mais

surfactantes são formados e causam o aumento do contato entre o alimento e o óleo. Isto causa uma absorção excessiva e um aumento na taxa de transferência de calor na superfície do alimento. Eventualmente, ocorrem o escurecimento excessivo e a secagem da superfície do produto, enquanto a condução do calor em direção ao interior é constante (Blumenthal, 1991).

#### **2.3.2.2.4 - Descarte dos óleos e gorduras**

Descarte do óleo usado: plantas industriais normalmente usam óleos com menos que 25% de produtos de decomposição (materiais polares totais), pois de outro modo, o alimento ficaria rançoso no tempo em que seria consumido, devido à oxidação dos AGL. Contudo, restaurantes podem usar um óleo contendo até 40% de materiais polares totais (Blumenthal, 1991).

Destino destes óleos: servem de matéria prima para produção de outros compostos químicos, para a produção de sabões, de bio-combustíveis, ou descarte em aterros.

Segundo Jorge (1996), muitos países (Arábia Saudita, Austrália, Brasil, Canadá, Holanda, Inglaterra, Irlanda, Israel, Itália, Japão, Luxemburgo, Malásia, Nova Zelândia, Países Escandinavos, África do Sul e Suíça) não possuem legislação específica que controla os óleos e gorduras de fritura na produção de alimentos e nos restaurantes.

A tabela 2.8 apresenta informações sobre o controle dos óleos e gorduras em alguns países europeus.

Tabela 2.8: Características limites para o descarte dos óleos e gorduras

| País     | Índice de Acidez (%) | Ponto de fumaça (°C) | Compostos polares (%) | Ácidos graxos oxidados (%) |
|----------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------------|
| Áustria  | 2,5                  | 170                  | 27                    | 1                          |
| Bélgica  | 2                    | 170                  | 25                    | 2,5                        |
| França   | 2                    | Nd                   | 25                    | Nd                         |
| Alemanha | nd                   | 170                  | 27                    | 1                          |
| Espanha  | nd                   | Nd                   | 25                    | nd                         |

nd = não disponível

### 2.3.3. - Parâmetros de qualidade do produto frito

Os principais parâmetros de qualidade do produto frito são os conteúdos de umidade e óleo. Além destes, existem outros parâmetros, como por exemplo, a textura, sabor e aroma do produto.

#### 2.3.3.1 - Conteúdo de Umidade

O conteúdo de umidade é uma propriedade importante na verificação da qualidade dos produtos fritos. Os métodos de determinação do conteúdo de umidade de diferentes produtos são classificados como diretos ou indiretos. Métodos diretos determinam a quantidade de água por remoção da umidade da amostra. Incluem: a) reação química, b) secagem em forno, c) destilação, d) radiação de microondas, e e) radiação infravermelha. Métodos indiretos requerem a medida de uma propriedade elétrica do produto, como resistência ou capacitância.

### 2.3.3.2 - Conteúdo de Óleo

Este parâmetro é muito importante na qualidade do produto frito. Altas concentrações de óleo no produto significam custo para o produtor e resulta num produto rançoso. Contudo, a textura de um produto com baixo conteúdo de óleo pode ser dura e desagradável.

Os métodos usados para determinação de óleo podem ser classificados como: 1) extração; 2) refratométrico, 3) prensa hidráulica e 4) espectroscopia de infravermelho (NIR).

O método de extração usa solventes como éter dietílico, éter de petróleo, hexano, acetona, etanol e clorofórmio/metanol para extrair o óleo do produto. Éter de petróleo, éter dietílico e hexano dão resultados similares de extração; o etanol dissolve carboidratos e sais inorgânicos além dos óleos, e misturas de clorofórmio/metanol têm sido usadas para extrair também gordura quimicamente ligada.

A distribuição de tamanho da amostra também afeta a extração. Uma amostra finamente dividida dá altos valores de concentração de óleo comparados aos de uma amostra menos dividida, devido a maior área de superfície disponível da primeira.

### 2.3.4. - Transferência de calor e massa durante a fritura

A abordagem de como se dá a fritura é essencial para o seu entendimento e para a modelagem matemática do processo. Existem duas abordagens principais, a que admite que a transferência de calor é convectiva, ou seja, controlada pela diferença de temperatura do



óleo e do ponto de ebulição da água; e outra que assume que o fenômeno é controlado pela difusão da umidade através do sólido.

Mittelman Ashkenazi et al (1984) estudaram o processo de fritura de pequenas barras de espuma ( $1 \times 1 \times 8$ cm) e de batatas ( $1 \times 1 \times 7$ cm). Baseando-se em seus experimentos, concluíram que o mecanismo controlador do processo para a espuma é a transferência de calor convectiva, ou evaporação da água na superfície do produto. Já para as fatias de batata, o modelo mais adequado mostrou ser o da difusão da umidade dentro da estrutura do material. A análise de Kozempel et al (1991) também foi a de que a difusão da umidade é o passo controlador do processo de fritura de batatas.

De modo oposto, a maior parte dos pesquisadores considera a transferência de calor convectiva como o mecanismo mais importante da fritura das batatas (Farkas et al, 1996; Hubbard e Farkas, 1998 e Costa et al, 1998). Assim, em termos de transferência de calor, tem-se que o coeficiente de transferência de calor convectiva é um instrumento chave no entendimento do processo de fritura. Alguns trabalhos se preocupam em determiná-lo (Costa et al., 1998; Hubbard e Farkas, 1998 e Sahin et al., 1999).

Hubbard e Farkas (1998) assumiram o modelo de duas zonas, a crosta e o núcleo, e calcularam o coeficiente de transferência de calor convectiva ( $h_{fp}$ ) entre o sólido e o meio de fritura. O valor do  $h_{fp}$  varia com o tempo, passando por um máximo e depois decaindo até o final do experimento. Este máximo coincide com o valor máximo da taxa de secagem e do fluxo de calor. Este fenômeno pode ser explicado pela transição entre a superfície com água evaporando em forma de bolhas e a formação da crosta.

Costa et al (1990) encontraram uma relação entre o coeficiente de transferência de calor e a taxa de secagem; a relação é aproximadamente linear, sendo que o coeficiente é cerca de duas vezes maior na fase de formação de bolhas que no período sem borbulhamento.

O comportamento durante a secagem de materiais biológicos pode ser classificado em período com taxa de secagem constante e com taxa de secagem decrescente (Moreira et al, 1999).

O período de taxa de secagem constante é observado em produtos cuja resistência interna ao transporte de umidade é bem menor que a resistência externa à remoção do vapor da superfície. O produto comporta-se como se houvesse uma fina camada de água cobrindo sua superfície. O transporte da umidade é controlado pela convecção.

No período de taxa de secagem decrescente, a resistência interna ao transporte de umidade é muito maior que a resistência externa. Neste caso, a difusão é o mecanismo controlador do transporte de massa.

A taxa de secagem de materiais alimentícios durante esta fase pode ser estimada pela equação de difusão em estado não estacionário (Brooker et al, 1992 apud Moreira et al, 1999):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \nabla^2 (M) \quad (1)$$

As condições iniciais e de contorno para resolver a equação (1) são:

$$M(x,0) = M_0 \text{ for } x < L/2 \quad (2)$$

$$M(x_0,t) = M_e \text{ for } t > 0,$$

para qual  $x_0$  indica condições na superfície e  $L/2$  é o centro do produto;  $L$  é a espessura do produto,  $M_0$  é a umidade inicial,  $M_e$  a umidade de equilíbrio e  $t$  o tempo.

A solução analítica da umidade média para diferentes formas geométricas pode ser obtida diretamente de textos sobre transferência de calor e difusão (Crank, 1975).

A solução analítica da equação (1) para uma placa infinita com as condições iniciais e de contorno (2) é:

$$\frac{\overline{M}(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{L^2}\right] \quad (3)$$

A simplificação da equação (3) tem sido útil na predição da secagem de alimentos. Ao invés de usar uma série infinita, somente o primeiro termo da equação (3) é aplicado. A seguinte equação semi-empírica resulta:

$$\frac{\overline{M}(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp\left[-\frac{D \pi^2 t}{L^2}\right] = \frac{8}{\pi^2} \exp(-k_1 t) \quad (4)$$

onde D refere-se ao coeficiente de difusão da umidade através do material.

As equações (3) e (4) dão valores significativamente diferentes somente para valores de t pequenos. Uma correlação similar à equação (4) é usualmente empregada, assume-se que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre a umidade do produto e a sua umidade de equilíbrio:

$$\frac{\overline{M}(t) - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k_2 t) \quad (5)$$

onde  $k_1$  e  $k_2$  são constantes de secagem.

Equações de secagem puramente empíricas são freqüentemente usadas para alimentos pois representam o comportamento de secagem melhor que as teóricas ou semi-empíricas. Um exemplo é a equação proposta por Rice & Gamble (1989) para batatas chips:

$$t = A + BM^2$$

onde A e B são específicos para o produto e A é uma função da temperatura.

Baumann & Escher (1995) apresentam uma equação exponencial de um termo para descrever o comportamento de secagem de batatas.

$$M(t) = a \exp(-b)t$$

onde a e b são constantes do produto.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1. Etapas do Projeto

A parte experimental deste estudo foi realizada em três laboratórios diferentes, em três universidades distintas. Esta diversidade é fruto da cooperação entre as universidades e entre os pesquisadores a fim de estudar um processo inédito e que se encaixa em varias áreas de especialidade.

A primeira parte do trabalho experimental foi realizada na Universidade de Queensland, Austrália, sob a supervisão do Prof. Dr. Victor Rudolph. Esta também foi a fase inicial do trabalho, onde se procurou entender o processo de fritura e a melhor abordagem no estudo da secagem utilizando esta técnica.

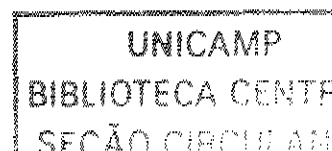
A segunda fase realizou-se na Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, França, sob supervisão do Prof. Dr. Didier Lecomte. Nesta fase, houve um intenso progresso no projeto de fritura, em especial em relação a análises do produto formado após a fritura.

As universidades citadas possuem uma cooperação no projeto de Fritura de Materiais Não-Alimentícios.

A última fase experimental foi realizada nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Química da Unicamp sob a orientação do Prof. Dr. Osvaldir Pereira Taranto. Esta fase foi o resultado das experiências acumuladas nos meses anteriores e procurou resgatar os conhecimentos adquiridos para tratar os materiais encontrados aqui no Brasil.

Este capítulo apresenta a metodologia e os materiais usados e segue na seguinte ordem:

1. Trabalho desenvolvido na Universidade de Queensland



2. Trabalho desenvolvido Ecole des Mines d'Albi-Camiaux
3. Trabalho desenvolvido na FEQ/Unicamp

### 3.2 – Análises e Procedimentos

Este item compreende a descrição das análises e procedimentos experimentais que foram usados em uma ou mais etapas da tese.

#### 3.2.1 - Planejamento Experimental (Barros Neto, B.; Scarmínio, I.S. e Bruns, R.E. - Planejamento e otimização de Experimentos, ed. Unicamp, 1995)

Este procedimento foi utilizado na fase de trabalho realizada na UNICAMP, item 3.5. Foram realizados dois planejamentos  $2^3$ , sendo um deles com a inclusão do ponto central.

O uso do planejamento experimental no estudo de um problema visa a determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse, contudo de uma maneira organizada, permitindo a análise da significância estatística das influências.

Um certo número de fatores  $F_k$  (onde  $k$  é o número de fatores) atua sobre um sistema em estudo. O sistema, por sua vez, produz as respostas  $R_j$  (onde  $j$  é o número de respostas).

O sistema é considerado como uma função que atua sobre as variáveis de entrada (os fatores) e produz como saída as variáveis observadas (as respostas). O objetivo da realização os experimentos é descobrir essa função, ou pelo menos obter uma aproximação satisfatória para ela. O planejamento experimental visa minimizar o número de experimentos para se obter esta função.

Além disto, o planejamento fornece uma visualização da tendência das variáveis de entrada, nos níveis escolhidos, de acordo com a resposta desejada.

### 3.2.1.1. - Planejamento Fatorial $2^3$ e Ponto Central

Um planejamento fatorial completo de  $2^3$  requer a realização de 8 ensaios ( $2 \times 2 \times 2 = 8$ ). Neste caso, são três as variáveis independentes escolhidas. O número 2 representa o número de níveis nos quais estas variáveis serão utilizadas (inferior, -1 e superior, +1). A execução dos experimentos obedece à ordem determinada pela Tabela 3.1, onde são expressas as variáveis independentes e seus níveis.

O ponto central é uma ferramenta estatística para o cálculo do desvio, ou erro, sem que seja necessária a repetição de todos os 8 ensaios. Os ensaios do ponto central são realizados usando as variáveis independentes em seus valores médios (é atribuído o nível zero ao ponto central).

Tabela 3.1: Variáveis independentes e seus níveis

| <i>Ensaio</i> | <i>Variável 1</i> | <i>Variável 2</i> | <i>Variável 3</i> |
|---------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1             | -1                | -1                | -1                |
| 2             | +1                | -1                | -1                |
| 3             | -1                | +1                | -1                |
| 4             | +1                | +1                | -1                |
| 5             | -1                | -1                | +1                |
| 6             | +1                | -1                | +1                |
| 7             | -1                | +1                | +1                |
| 8             | +1                | +1                | +1                |
| PC1           | 0                 | 0                 | 0                 |
| PC2           | 0                 | 0                 | 0                 |
| PC3           | 0                 | 0                 | 0                 |

### 3.2.1.2. – Variáveis “Resposta” e Análise dos Resultados do Planejamento

Variáveis Resposta são as variáveis dependentes analisadas como resposta da interferência das variáveis independentes. São através destes valores que se estuda o problema em questão.

Um passo importante para a análise dos resultados do planejamento é o uso e a interpretação dos dados fornecidos pelo software Statistica. Este software recebe os dados

de entrada e as variáveis “resposta” e fornece o resultado em tabelas e dados estatísticos que podem mostrar tendências de comportamentos, estimativas de erros experimentais e também pode fornecer modelos estatísticos que descrevam o fenômeno estudado.

### 3.2.2 - Determinação do Conteúdo de Umidade

Análise utilizada em todas as fases do trabalho experimental.

O método de determinação do conteúdo de umidade numa amostra através de sua secagem em estufa é amplamente usado em muitas áreas de pesquisa, especialmente as relacionadas ao processo de secagem em si.

Este método consiste em secar uma amostra de massa conhecida num forno a 105°C até peso constante (é comum deixar a amostra de 12 a 24 horas no forno). A umidade é calculada pela diferença entre a massa inicial e a massa final. Esta massa perdida ou evaporada é considerada como sendo a quantidade de água presente na amostra e, este valor é dividido pela massa inicial da amostra, fornecendo o conteúdo de água em base úmida ( $X_{bu}$ ).

$$X_{bu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{total}}}$$

ou pela massa de sólidos restante depois da secagem na estufa, fornecendo o conteúdo de umidade em base seca ( $X_{bs}$ ):

$$X_{bs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos secos}}}$$

No caso específico de estudo de secagem via fritura é preciso levar em conta que, após a fritura, o material apresenta um certo conteúdo de óleo. A massa total é definida como:



$$m_{total} = m_{\text{água}} + m_{\text{sólidos secos}} + m_{\text{óleo}}$$

Logo, os conteúdos de umidade e de óleo usados neste trabalho são definidos pelas relações da Tabela 3.2:

Tabela 3.2: Relações para o cálculo de umidade e óleo

|                                                                              |                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| $X_{abu} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{total}}$                                | $X_{obu} = \frac{m_{\text{óleo}}}{m_{total}}$                                |
| $X_{abs} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos secos}}}$                 | $X_{obs} = \frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\text{sólidos secos}}}$                 |
| $X_{abs}^* = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{sólidos secos} + \text{óleo}}}$ | $X_{obs}^* = \frac{m_{\text{óleo}}}{m_{\text{sólidos secos} + \text{óleo}}}$ |

### 3.2.3 - Determinação de Teor de Gordura (método a temperatura ambiente)

Método usado na fase de trabalho realizada na Ecole des Mines d'Albi-Carmaux.

O método de extração por solvente foi usado para determinar o conteúdo de óleo do material frito. Amostras de lodo frito foram secas em estufa a 105°C. Depois de 24 horas, o material foi moído com a ajuda de almofariz e aproximadamente 2,7g foi introduzido num frasco de 25ml. O frasco foi completado com o solvente Heptano ( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)\text{CH}_3$ , b.p.=98,4°C), e a mistura foi agitada manualmente. Após 1 hora de descanso, o Heptano foi drenado e o frasco foi preenchido com novo solvente. Este método foi repetido mais duas vezes para assegurar que o máximo de óleo foi extraído.

A massa de sólidos restante da filtração do material foi levada ao forno de 105°C por cerca de 12 horas e então depois pesada. A diferença entre a massa de sólidos final e inicial foi calculada como sendo a massa de óleo presente na amostra.

Esta não é uma metodologia oficial, contudo é usada para a quantificação de óleo superficial em produtos fritos (Moreira et al, 1997).

### 3.2.4 - Determinação do Teor de Gordura (método Soxhlet)

(Método Aa 4-38 – Official Methods and Recommended Practices of the American Oil Chemists' Society (AOCS), Fifth Edition, 1998)

Método usado na fase de trabalho realizada na UNICAMP.

É um método analítico baseado na separação por solventes. O procedimento é descrito seguir.

O material, previamente seco, deve ser triturado num almofariz de modo a diminuir seu tamanho médio. Uma massa de 2-2,3g de amostra triturada é pesada num filtro de papel. Este é dobrado de modo a formar um invólucro que impeça o escape dos sólidos. O invólucro contendo o material é destilado com éter de petróleo por 8 horas num arranjo tipo Soxhlet (Método Aa 4-38 AOCS).

Durante a destilação, o solvente lava e extrai o material preso no invólucro de papel de filtro, depositando o óleo no frasco de fundo. Ao fim do tempo de extração, o frasco é levado a uma estufa a 110°C por duas horas, para evaporação completa do éter, e depois, pesado para determinação da massa de óleo extraída.

Cálculo da porcentagem de óleo:

$$\% \text{ óleo} = \frac{\text{massa de óleo (g)}}{\text{massa da amostra (g)}} \times 100$$

### 3.2.5 - Determinação do Poder Calorífico (Método ASTM D3286-73)

Determinação de valor energético do lodo foi realizada nas três fases de trabalho. O equipamento usado chama-se bomba calorimétrica, usado na determinação do poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos.

Uma determinada quantidade do material é fechada dentro de um recipiente de metal com atmosfera de oxigênio sob alta pressão. A bomba é então mergulhada num recipiente com parede dupla contendo água em seu interior e na camisa externa que o envolve. A ignição que provoca a queima da amostra é feita por conexão elétrica externa.

A temperatura da água do banho que envolve o recipiente onde ocorre a combustão é medida em função do tempo antes e depois do processo de ignição. Conhecendo-se a massa de água do sistema, massa e calor específico do recipiente e as curvas de aquecimento e resfriamento da água, a energia liberada durante o processo de combustão pode ser determinada.

O poder calorífico é dado em termos da quantidade de energia liberada por grama do produto.

### 3.2.6. Composição Elementar

A análise visa determinar a porcentagem de carbono, nitrogênio, enxofre e oxigênio presente numa amostra. O procedimento básico é descrito a seguir.

A determinação da porcentagem de N, C, H e S segue as seguintes etapas:

- Introdução da amostra e de oxigênio na câmara de combustão;
- Combustão flash;
- Temperatura de combustão alcança 1800°C;
- Oxidação complementar por catalisador;
- Captura dos halogênios;
- Redução dos óxidos de nitrogênio a N<sub>2</sub> e captura de excesso de oxigênio;

- Gases presentes na corrente de He:  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $SO_2$ ;
- Separação cromatográfica dos elementos;
- Detecção via sonda;
- Coleta dos sinais e tratamento dos dados;

#### Determinação da porcentagem de oxigênio (O)

- Pirólise a  $1070^\circ C$ ;
- Conversão dos compostos formando  $CO$ ;
- Captura de eventuais traços de água e  $CO_2$ ;
- Separação dos gases produzidos durante a pirólise:  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$  e  $CO$ ;
- Detecção via catharometric;
- Coleta dos sinais e tratamento dos dados;

Na fase realizada na Universidade de Queensland, o equipamento usado foi LECO CNS 2000 *Combustion Analyser* e, na Ecole des Mines, utilizou-se o NA 2100 Protein – CE Instruments. Este último equipamento também calcula os valores teóricos de poder calorífico inferior e superior da amostra, baseado nas porcentagens de N, C, H, S e O.

### **3.3 - Trabalho desenvolvido no Departamento de Engenharia Química da Universidade de Queensland**

#### **3.3.1 - Materiais usados**

##### **3.3.1.1 – Material Preliminar**

O trabalho experimental iniciou-se com a fritura de madeira como material preliminar. Um varão de madeira foi adquirido no mercado local e, posteriormente, foi cortado para obter cilindros de dois comprimentos diferentes.

A massa de sólidos inicial dos cilindros de madeira foi determinada secando-os em estufa a  $105^\circ C$  até peso constante. Cilindros úmidos foram obtidos deixando-os em banho de

água a temperatura ambiente. Suas dimensões e a massa dos cilindros são mostradas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Dimensões dos cilindros madeira

| <i>Comprimento (cm)</i> | <i>Diâmetro (cm)</i> | <i><math>X_i</math> média (base seca, b.s.)</i> | <i>Massa média de sólidos secos (g)</i> |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 2,0                     | 0,9                  | 0,52                                            | 0,909                                   |
| 2,0                     | 0,9                  | 0,99                                            | 0,909                                   |
| 4,0                     | 0,9                  | 0,81                                            | 1,818                                   |

### 3.3.1.2 – Lodo de Esgoto

O lodo usado nos ensaios de fritura foi obtido junto à Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Toowoomba, Queensland, Austrália.

O resíduo desta Estação de Tratamento é produzido via digestão aeróbia e desidratado através de filtros-prensa com a ajuda de polieletrólitos (coagulação). O material foi coletado e mantido sob refrigeração até a utilização.

O material recebido tem uma concentração de sólidos de 12,3% ( $X_{abs} = 7,13$ ).

### 3.3.1.3 – Meio de fritura

O meio de fritura escolhido para iniciar o trabalho foi o óleo de girassol. O óleo de girassol é um óleo vegetal líquido à temperatura ambiente. Seus principais componentes são triglicérides que possuem ácidos graxos tipo C18:2, conhecido como 9,12-Octadecadienóico, ou ácido linolêico (67,5%). Sua composição é mostrada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Composição do óleo de girassol poliinsaturado (OGP)

|     | C14:0 | C16:0 | C17:0 | C18:0 | C20:0 | C22:0 | C16: 1 | C18: 1 | C20: 1 | C18: 2 | C18: 3 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| OGP | 0,1   | 7,0   | 0,1   | 4,6   | 0,4   | 0,7   | 0,1    | 18,1   | 0,1    | 67,5   | 0,8    |

O óleo de girassol poliinsaturado foi adquirido no mercado local. Este óleo é bastante usado em frituras domésticas e facilmente encontrado em comercialização. Foi usado pela facilidade de ser encontrado.

### 3.3.2 – Aparato experimental

Este sistema experimental assemelhou-se aos sistemas usados nos trabalhos de fritura de produtos alimentícios. Consistiu no uso de um fritador comercial, ao qual se acoplou uma série de termopares que monitoravam a variação da temperatura do óleo (Figura 3.1).

O fritador (*Sunbeam*), feito de aço inox, tem capacidade para 3,5L de óleo. O óleo é colocado no compartimento interno onde fica a resistência. A temperatura do óleo é controlada pela resistência, e o controlador tinha os limites de 100 a 190°C.

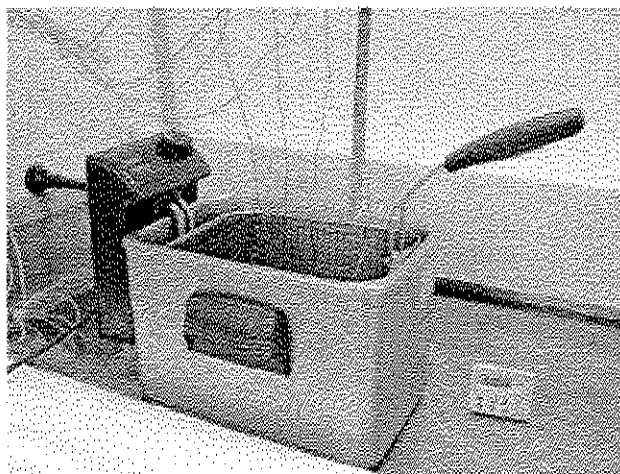


Figura 3.1: Imagem do equipamento usado nos experimentos de fritura

### 3.3.3 - Etapas Experimentais e Metodologia

### 3.3.3.1 – Ensaaios Preliminares

Estes ensaios foram realizados a uma temperatura do banho de óleo de 180°C.

Os cilindros de madeira foram colocados em banhos de água à temperatura ambiente de um dia para o outro afim de que absorvessem umidade. Esta absorção não foi controlada, e o valor da umidade dos cilindros foi aleatória.

Os ensaios de fritura ocorreram da seguinte forma. O experimento consistiu na fritura de um cilindro, que foi deixado dentro do banho de óleo por um determinado tempo, variando de 30 a 300 segundos. Por exemplo, para obter-se uma curva de variação da umidade com o tempo, foram necessários vários experimentos, um cilindro frito por 30 segundos, outro frito por 60 s, e assim em diante, até atingir 300 segundos. Após o tempo determinado, o cilindro foi retirado para análises de conteúdo de água, a fim de verificar a variação da umidade durante o tempo de fritura.

Um motivo pelo qual a madeira foi escolhida como material de ensaio preliminar, é que não apresenta encolhimento significativo durante o processo de secagem e também não há perda de massa de sólidos. Estas características possibilitaram o cálculo da fração de óleo que foi incorporada durante a fritura através de uma análise de balanço de massa. Ou seja, tem-se a massa inicial do cilindro e a sua umidade inicial. Cada cilindro, após o tempo imposto de fritura, é retirado do banho, pesado e levado à estufa a 110°C para a determinação de sua umidade final ou pós-fritura.

Através destes cálculos pode-se obter curvas de variação da umidade e do óleo com o tempo, e também a relação perda de umidade e incorporação de óleo.

### 3.3.3.2 – Ensaaios com o lodo

A fim de facilitar o manuseio e uniformizar os ensaios, o lodo, que se encontrava em forma pastosa, foi moldado numa forma cilíndrica com a ajuda de uma seringa. Foi

usada uma seringa plástica de 60ml de volume. A seringa possui um diâmetro interno de 2,0 cm e os cilindros de lodo foram preparados com comprimento de 4,0 cm.

Cada cilindro, pesando aproximadamente 30g, foi mergulhado no óleo usando a cesta metálica. Usando a mesma metodologia que foi usada para a madeira, cada cilindro foi frito individualmente por um determinado intervalo de tempo, que variou de 30 a 900 segundos. O tempo de fritura foi expandido, pois a umidade inicial do lodo é bem maior que a da madeira e, nos testes, foi verificado que a secagem precisava de mais tempo.

Mantendo constantes as dimensões dos cilindros, a secagem do lodo foi avaliada usando três temperaturas de óleo diferentes 140, 160 e 180°C. Foi realizado o mesmo procedimento para cada temperatura de óleo. Logo, as curvas de variação das respostas com o tempo foram o resultado de, em média, 17 ensaios e foram feitos em duplicata.

Após cada experimento, o material frito foi separado para análise de conteúdo de umidade. Algumas amostras foram separadas para determinação de composição elementar e de poder calorífico.

O procedimento de cálculo de incorporação de óleo por balanço de massa não pode ser aplicado para o lodo, pois ocorre justamente o contrário do que ocorre com a madeira. Existe um significativo encolhimento do material durante a fritura e também eventual perda de massa de sólidos do cilindro para o banho de óleo.

A variação de umidade foi determinada gravimetricamente para as três temperaturas de processo, sendo calculadas em base total, ou seja, massa de água restante no material após o determinado tempo de fritura em relação à massa total antes da fritura.



### **3.4 - Trabalho desenvolvido no Centre Energetique-Environment da Ecole des Mines d'Albi-Carmaux**

Este trabalho foi desenvolvido de Maio a Setembro de 2002 no Laboratório de Lodo do Centre Energetique-Environment.

#### **3.4.1 – Materiais usados**

##### **3.4.1.1 – Materiais Preliminares**

Um dos materiais escolhidos para os testes preliminares foi a levedura, ou fermento de padaria. Levedura é um microorganismo do tipo Fungi. É chamado de levedura de padaria porque é usada para fazer o pão crescer.

Apesar da levedura ser um microorganismo, não é patogênico. Esperou-se que ela pudesse representar o comportamento do lodo de esgoto, considerando que este é composto em grande parte de uma mistura complexa de microorganismos. A levedura adequa-se ao estudo laboratorial por ser limpa, segura e de fácil aquisição. A levedura foi usada nos ensaios preliminares e enquanto a metodologia não foi estabelecida.

A levedura vem do produtor como uma barra com baixa umidade. Para atingir uma umidade de 80% (umidade inicial do lodo) foi necessário adicionar água. A esta concentração, a pasta é facilmente moldável e foi moldada na forma de uma placa para ser introduzida no óleo.

Outros dois materiais foram usados, semicilindros de madeira e batata em flocos. A batata também foi umidificada para se obter uma pasta de 20% em sólidos. A madeira foi mantida dentro d'água para absorver umidade também. Os materiais e suas características podem ser visualizados na Figura 3.2 e Tabela 3.5.

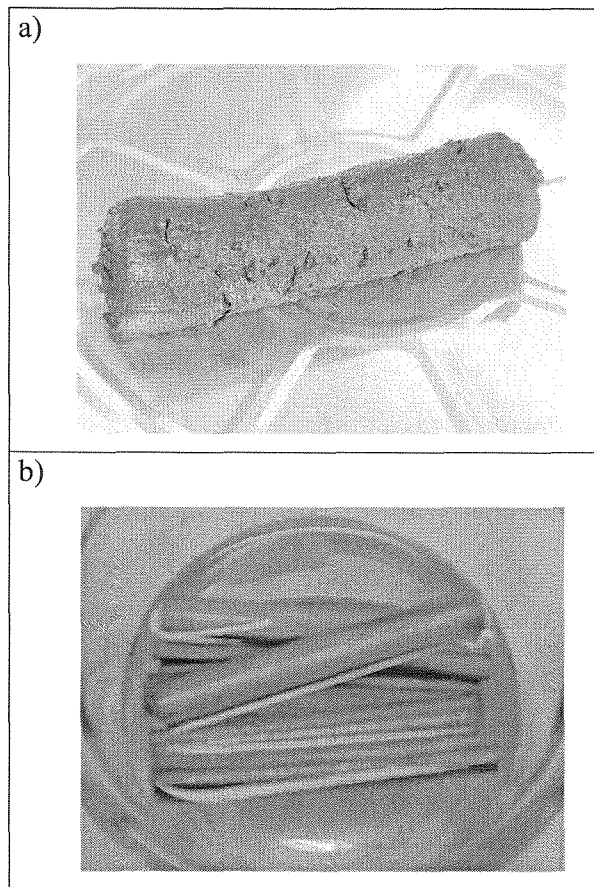


Figura 3.2: a) cilindro de lodo; b) semi-cilindro de madeira

Tabela 3.5: Geometria e características dos materiais preliminares

| <i>Material</i> | <i>Geometria</i> | <i>Diâmetro (cm)</i> | <i>Comprimento / Espessura (cm)</i> | <i>X<sub>abu</sub> inicial</i> |
|-----------------|------------------|----------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Levedura        | Placa            | 6,1                  | 1,0                                 | 0,70                           |
| Madeira         | Semi-cilindro    | 0,95                 | 7,25                                | 0,43                           |
| Purê de batata  | Placa            | 6,1                  | 1,0                                 | 0,80                           |

#### 3.4.1.2 – Lodo de Esgoto

O lodo usado neste trabalho veio da Estação de Tratamento de Esgoto da cidade de Mauberges, França e foi coletado em junho de 2002. Este passou por um tratamento de digestão aeróbia antes de ser coletado e foi mantido sob refrigeração até a utilização. Seu

conteúdo inicial de umidade (em base úmida) e outras características são mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6: Características do lodo proveniente da ETE de Mauberges, França

| $X_a(bu)^*$ | $X_a(bs)^*$ | %N** | %C**  | %H** | %S**  | PCI (MJ/kg)** | PCS (MJ/kg)** |
|-------------|-------------|------|-------|------|-------|---------------|---------------|
| 0,809       | 4,23        | 3,68 | 24,93 | 4,33 | Trace | 14,7131       | 13,7093       |

\* secagem em estufa (item 3.2.2)

\*\* composição elementar (item 3.2.5)

O lodo é uma pasta e foi preparado para os experimentos de fritura de duas maneiras. Alguns experimentos foram realizados pesando uma certa massa da pasta e introduzindo-a no banho de óleo. Neste caso, denominou-se “bolo”.

Contudo, para uma melhor homogeneização é mais conveniente que o material possua uma forma geométrica definida. De forma a dar ao lodo uma geometria, ele foi passado por uma seringa de 60ml, cortada no topo. O resultado foi um cilindro de lodo com um comprimento médio de 9,5cm e diâmetro de 2,75cm (Figura 3.2a).

Manteve-se a mesma massa de lodo tanto no caso do bolo quanto no caso do cilindro, podendo-se assim, comparar o efeito da forma do material no processo de secagem através da fritura.

### 3.4.1.3 – Meio de fritura

O meio de fritura usado foi um óleo vegetal extraído do amendoim, óleo de arachide. A Tabela 3.7 mostra algumas de suas características.

Um volume de 4 litros foi usado em todos os experimentos. Quando novo, o óleo apresenta uma cor amarela claro, mas após várias frituras apresenta uma cor mais forte. Entre os experimentos, o óleo foi repostado quando necessário para manter o nível, ou mesmo trocado quando a sua cor atingia um amarelo muito escuro.

Tabela 3.7: Características do óleo de fritura (óleo de amendoim)

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| Composição Elementar (%)                            |           |
| • N                                                 | 0,03      |
| • C                                                 | 76,13     |
| • H                                                 | 11,51     |
| • S                                                 | traços    |
| Temperatura de Solidificação (°C) (Vitrac, 2000)    | <10       |
| $\rho$ (160°C) (kg.m <sup>-3</sup> ) (Vitrac, 2000) | 863       |
| $\mu$ (160°C) (Pa.s) (Vitrac, 2000)                 | 1.9 – 2.4 |

### 3.4.2 – Aparato experimental

O equipamento usado é um fritador comercial, adaptado às medidas no laboratório. O aparato consiste do fritador colocado sobre uma balança analítica. O fritador tem um controlador interno de temperatura e uma temperatura nominal máxima de 180°C, com uma variação de  $\pm 2,5^\circ\text{C}$  em torno do *set point*. Foi usado um termopar tipo K para ler a temperatura do óleo.

A balança (Sartorius) mede uma massa máxima de 34kg, e uma precisão de 1,0g. A massa total do fritador é 3240g. A Figura 3.3 mostra um esquema do fritador.

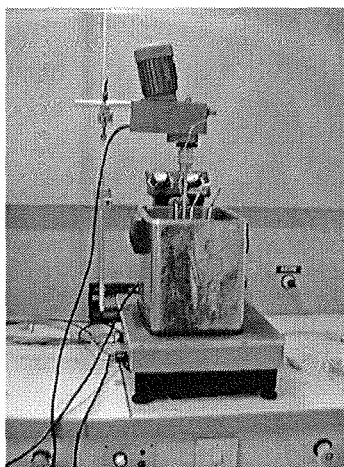


Figura 3.3: Foto da montagem experimental

A montagem experimental consiste de um tanque onde o óleo é colocado e aquecido através de uma resistência. Uma cesta metálica ajuda a mergulhar e retirar a amostra do banho, mas ela pode somente ser usada nos casos quando o agitador não é acoplado. O agitador foi usado nos ensaios preliminares, mas foi depois retirado do sistema para o uso da cesta.

O arranjo descrito anteriormente foi usado no testes preliminares com a levedura, com o purê de batata, com a madeira e com o lodo.

### **3.4.3 - Etapas experimentais e metodologia**

#### **3.4.3.1 – Ensaios preliminares**

Nos testes preliminares, os experimentos foram realizados com todos os materiais – incluindo o lodo - segundo o procedimento descrito a seguir.

- Temperatura do óleo de 160 e 180°C;
- Agitação: presente ou não.

O fritador foi cheio com aproximadamente 3,5 L de óleo e a resistência (termostato) foi ligada para aquecer o óleo. Um termopar tipo K foi introduzido no banho de óleo, através do qual a temperatura foi monitorada.

A agitação estava presente deste o início do aquecimento do óleo. Os valores de massa lidos pela balança também foram gravados on-line, porém a uma taxa de 1 ponto por segundo.

#### **3.4.3.2 – Ensaios com o lodo**

Quando da fritura dos cilindros de lodo, um novo arranjo foi preparado. A fritura foi realizada sem agitação e com a utilização da cesta metálica, mais uma cesta feita de fibra de vidro com espaço entre os fios menores que os da cesta metálica.

Além destas modificações, foram instaladas duas camadas de isolantes entre o fritador e a balança analítica, uma placa de madeira e um bloco de isopor (Figura 3.4). A camada isolante foi adicionada pois percebeu-se que havia interferência do calor produzido pelo sistema na leitura da balança, dificultando sua estabilização.



Figura 3.4: Foto do aparato experimental

A fritura dos cilindros de lodo de esgoto corresponde aos ensaios experimentais propriamente ditos. Os cilindros foram fritos à 160 e 180°C, mantendo o termostato ligado o tempo todo.

Cada cilindro pesava aproximadamente 64g. Após a estabilização da temperatura, o cilindro foi mergulhado no banho. As variações de massa e de temperatura foram registradas ao mesmo tempo pelo sistema de aquisição de dados.

A fritura a 180°C foi feita em quadruplicata e a 160°C em triplicata, a fim de verificar a reprodutibilidade das medidas.

#### **3.4.3.3 – Experimentos isolados de fritura de lodo**

Dez experimentos isolados de fritura de lodo foram realizados. Os produtos de cada ensaio foi separado para determinação de conteúdo de umidade e de óleo, composição elementar e poder calorífico, como descritos nos procedimentos dos itens 3.2.4, 3.2.3, 3.2.6 e 3.2.5 (respectivamente), além dos produtos terem sido fotografados.

Em cada experimento, um cilindro pesando aproximadamente 63g foi frito até um determinado tempo e então retirado do banho. Depois de escorrido por pelo menos 5 minutos, o cilindro foi cortado longitudinalmente e transversalmente. Fotografias foram tiradas ao final de cada fritura e o material frito foi separado para as análises.

Os ensaios seguiram as condições anteriores (180°C, e sem agitação) com exceção do tempo de fritura. Cada cilindro foi frito separadamente por diferentes períodos de tempo, ou seja, 20, 50, 75, 169, 263, 356, 450, 570, 690 e 810 segundos.

Baseando-se no diâmetro inicial ( $R$ ) e nas imagens vistas nas fotos, a variação do diâmetro com o tempo de fritura pode ser estimada. A área de interface de transferência de calor é a área superficial do cilindro de raio  $r$ , que varia com o tempo de fritura (Figura 3.5). Assume-se que o decréscimo de  $r$  é muito maior que a diminuição de  $R$ . Esta área é dada por:  $A = 2\pi rh + 2\pi r^2$

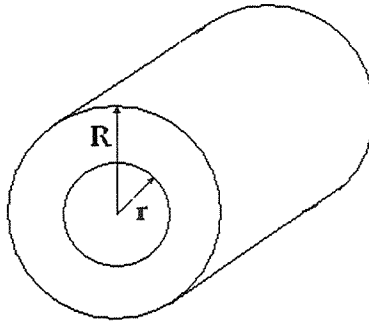


Figura 3.5: Desenho esquemático de um cilindro de lodo de raio  $R$ , onde  $r$  variando com o tempo de fritura.

### 3.5 - Trabalho desenvolvido no Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP

Esta fase foi realizada de Abril a Julho de 2003 nos laboratórios do Departamento de Termofluidodinâmica da FEQ/UNICAMP.

#### 3.5.1 – Materiais usados

##### 3.5.1.1 – Lodo de esgoto

O lodo usado nos experimentos realizados foi uma doação da Estação de Tratamento de Esgotos “Samambaia”, pertencente a Sanasa S.A.. O esgoto que chega a esta estação é essencialmente doméstico e o processo de geração do lodo está explicado no item 2.2.2.1 do Capítulo 2. Este lodo foi produzido via digestão aeróbia, mas passou por um processo de digestão anaeróbia antes de ser centrifugado (adição de polímero catiônico para facilitar a coagulação).

O lodo tem uma umidade inicial média de 80%, ou  $X_{abs} = 4,0$ .

##### 3.5.1.2 – Meio de fritura

Foram usados dois tipos de meio de fritura nesta etapa: gordura de palma e óleo de soja usado. A composição química do óleo de palma e do óleo de soja (novo) é mostrada na Tabela 3.8. A gordura de palma foi oferecida pela Agropalma, e o óleo de soja foi obtido junto a um restaurante, sendo óleo de descarte.

Tabela 3.8: Composição química média de óleo de palma e de óleo de soja (Stauffer, 1996)

|       | C12:0 | C14:0 | C16:0       | C17:0 | C18:0 | C20:0 | C22:0 | C16: 1 | C18: 1      | C20: 1 | C18: 2      | C18: 3 |
|-------|-------|-------|-------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------------|--------|-------------|--------|
| PALMA | 0,3   | 1,1   | <b>42,9</b> | 0,1   | 4,6   | 0,3   | 0,1   | 0,2    | <b>39,3</b> | -      | 10,7        | 0,4    |
| SOJA  | -     | 0,1   | 10,6        | 0,1   | 4,0   | 0,3   | 0,3   | 0,1    | 23,2        | -      | <b>53,7</b> | 7,6    |



### 3.5.2. – Aparato experimental

O fritador usado nesta fase do trabalho foi adquirido junto à Venâncio Metalúrgica. É um fritador elétrico, modelo SFE2, com uma cuba com capacidade de 5 litros de óleo, voltagem de 220V, e potência de 3300W.

O modelo de fritador acompanha um cesto metálico que pode ser visualizado na Figura 3.6 Para a realização dos experimentos de lodo foram adicionados ao fritador três termopares para monitoração e controle da temperatura do óleo.

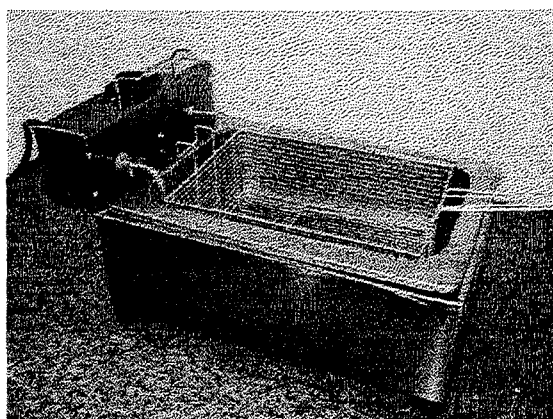


Figura 3.6 Fritador usado nos experimentos realizados na Unicamp

### 3.5.3. - Etapas Experimentais

Os primeiros experimentos foram realizados de acordo com um planejamento fatorial  $2^3$  com ponto central (ver item 3.2.2.1), dando um total de 11 ensaios. Foram usadas como variáveis independentes: a temperatura do óleo, o tempo de secagem e a quantidade de massa mergulhada no banho de óleo. Os níveis podem ser vistos na Tabela 3.9.

A gordura de palma foi o meio de fritura em todos os experimentos deste planejamento. Uma massa de aproximadamente 3000g de gordura de palma foi colocada no fritador descrito no item anterior. A temperatura era ajustada de acordo com o planejado para tal ensaio. Três termopares tipo K foram usados ao longo do comprimento do banho de óleo para acompanhamento e controle da temperatura.

Tabela 3.9: As variáveis e níveis escolhidos para o primeiro planejamento

| Variável                      | Nível Inferior<br>(-1) | Nível Superior<br>(+1) | PC<br>(Ponto Central) |
|-------------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| V1 = tempo de fritura (s)     | 300                    | 900                    | 600                   |
| V2 = massa de lodo (g)        | 45                     | 90                     | 67,5                  |
| V3 = temperatura do óleo (°C) | 130                    | 170                    | 150                   |

O lodo obtido junto a ETE foi mantido sob refrigeração. A fim de facilitar o manuseio e uniformizar os ensaios, o lodo, que se encontra em forma pastosa, foi moldado numa forma cilíndrica com a ajuda de uma seringa. A seringa possui um diâmetro interno de 2,65 cm e os cilindros de lodo foram preparados com comprimento de 8,0 cm. A massa média dos cilindros foi de 45,4g e com um volume de 44,3 cm<sup>3</sup>, a densidade *bulk* ou aparente calculada foi de 1,025g/cm<sup>3</sup>.

Cada experimento consistiu na introdução de uma certa massa de lodo no banho de óleo pré-aquecido, e sua fritura por um determinado período de tempo. Os valores relativos a estas três variáveis (massa, temperatura e tempo) foram apresentados nas Tabelas 3.9.

Ao fim do tempo de fritura, o lodo foi retirado do banho com a cesta metálica e permaneceu em repouso por um minuto para que o excesso de óleo escorresse. Logo em seguida o cilindro foi também posto sobre papel absorvente por alguns minutos e mantido dentro de um dessecador.

Em seguida, o material foi pesado e separado para posteriores análises de conteúdo de umidade (item 3.2.2) e de conteúdo de gordura (item 3.2.4).

As variáveis “Resposta” foram: a fração de água e a fração de óleo.

Após a execução destes experimentos, passou-se a realização de um novo planejamento experimental 2<sup>3</sup>, neste caso sem a utilização do ponto central, estudando novas variáveis, como pode ser visto na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: As variáveis e níveis escolhidos para o segundo planejamento

| Variável                      | Nível Inferior (-1) | Nível Superior (+1) |
|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| V1 = temperatura do óleo (°C) | 170                 | 200                 |
| V2 = diâmetro do cilindro*    | 2,0                 | 2,6                 |
| V3 = tipo de óleo             | Usado (soja)        | Novo (palma)        |

\*cilindro que molda o lodo numa geometria definida

Neste novo planejamento houve algumas modificações na metodologia. O lodo foi moldado em cilindros de diâmetro de 2,65cm e de 4cm de comprimento, pesando em média 22g.

Cada um dos 8 ensaios do planejamento, na verdade, consistiu na realização de, pelo menos, 12 frituras. Cada um dos cilindros foi mantido no banho de óleo por uma certa quantidade de tempo. O tempo de fritura variou de 30 segundos até 1240s, dependendo do ensaio.

Assim, a resposta deste planejamento foi a cinética de secagem de lodo sob as condições experimentais definidas na Tabela 3.10.

Após a fritura, o lodo também foi retirado do banho com a cesta metálica e escorrido. Em seguida, o cilindro foi posto sobre papel absorvente por alguns minutos e mantido dentro de um dessecador. Após ser pesado o cilindro foi separado para análises.

## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### 4.1 – Resultados obtidos na Universidade de Queensland

Estes são os resultados obtidos na fase que foi realizada nos laboratório do Departamento de Engenharia Química da Universidade de Queensland. Estes se referem à primeira fase da parte experimental desta tese de doutorado. Os resultados estão divididos em ensaios preliminares e ensaios realizados com o lodo de esgoto proveniente da ETE Toowoomba, Queensland, AU.

##### 4.1.1 – Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares consistiram na fritura de cilindros de madeira. A madeira foi escolhida por apresentar duas características importantes para este estudo, o não encolhimento durante o processo de fritura e a manutenção da massa de sólidos secos constante.

Os ensaios foram realizados usando um mesmo tipo de madeira, com dimensões diferentes. A metodologia utilizada está descrita no item 3.3.1.1. Além dos exemplos discutidos no texto, todos os resultados desta fase estão apresentados no Anexo A.

A Figura 4.1 mostra as curvas de secagem (umidade,  $X$  versus tempo,  $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira de mesma dimensão, mas com conteúdos iniciais de umidade diferentes. As curvas são apresentadas em base seca.

Percebe-se, através da análise das curvas, que a umidade inicial tem um efeito pouco significativo na velocidade de secagem. Espera-se que o material com maior

umidade inicial perca água mais rapidamente, pois a própria diferença entre a concentração de água no material e no meio é uma das forças motrizes do processo de secagem. Segundo Hart, 1966 apud Souza, 1994, isto é verdadeiro para secagem a baixas temperaturas ( $< 100^{\circ}\text{C}$ ) enquanto para secagem realizada a temperatura acima da condição normal de ebulição da água, vapor pressurizado é formado na frente de evaporação interna à partícula. Esse fenômeno resulta em fluxo de vapor de água devido ao gradiente de pressão total dos gases entre a frente de secagem e a superfície do sólido.

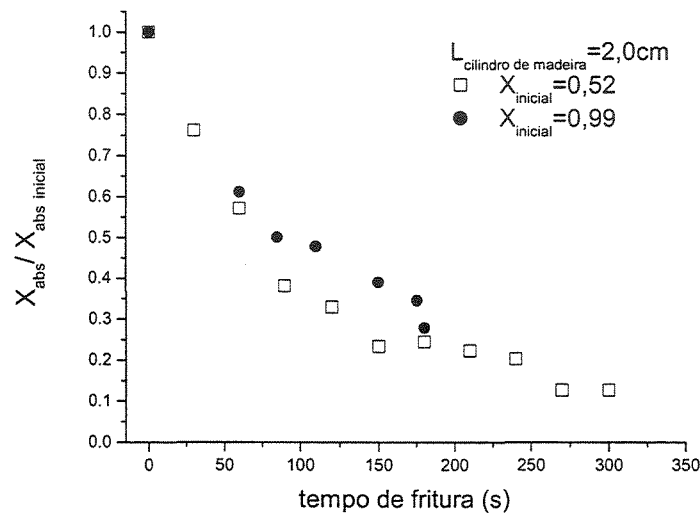


Figura 4.1: Curvas de secagem ( $X_{\text{abs}}$  vs  $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com conteúdos de umidade inicial diferente.

As curvas de secagem obtidas durante a fritura de cilindros de comprimentos diferentes podem ser vistas nas Figuras 4.2.

O efeito do comprimento do cilindro é pouco evidente no decorrer da fritura, neste caso. Teoricamente espera-se que um material de comprimento menor tenha uma secagem mais rápida pois sua área de transferência de calor e massa é maior (área é diretamente proporcional ao comprimento do cilindro). Uma das possíveis explicações, pode ser um fenômeno observado durante os próprios ensaios de fritura. Percebeu-se que a maior parte das bolhas formadas durante a fritura saía das laterais do cilindro, ou seja, das duas bases circulares. Pode – se imaginar que a estrutura sólida da madeira priorize um fluxo de

líquidos na direção axial, para a própria alimentação da planta e assim, a madeira tem canais que dificultam o movimento radial da água que foi incorporada.

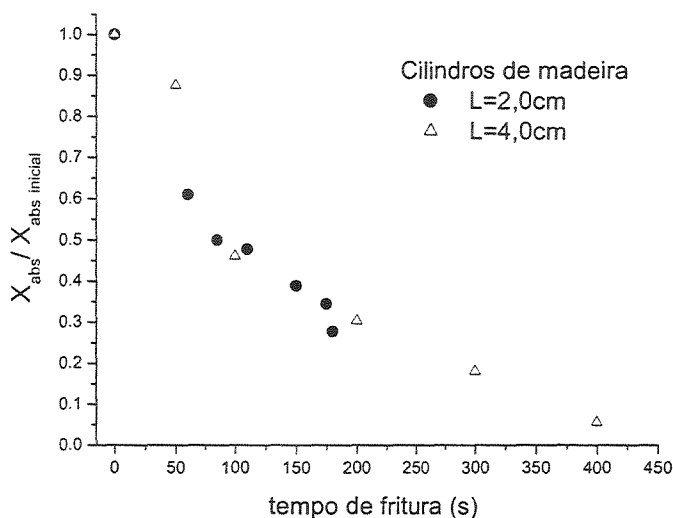


Figura 4.2: Curvas de secagem ( $X_{abs}$  vs  $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com comprimentos diferentes.

A quantidade de óleo incorporada foi determinada via balanço de massa (item 3.3.3). As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam a variação da quantidade de óleo e de água em função do tempo para os dois tamanhos de cilindro.

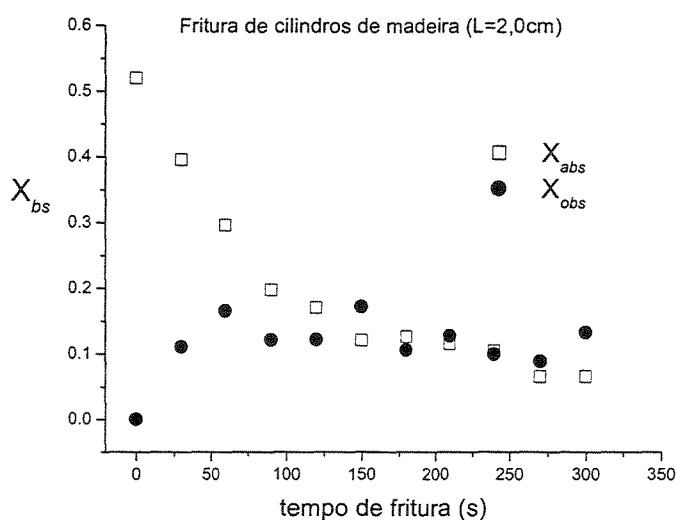


Figura 4.3: Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 2,0cm de comprimento.

Pode-se ver que a umidade decresce em função do tempo, característica típica de um processo de secagem.

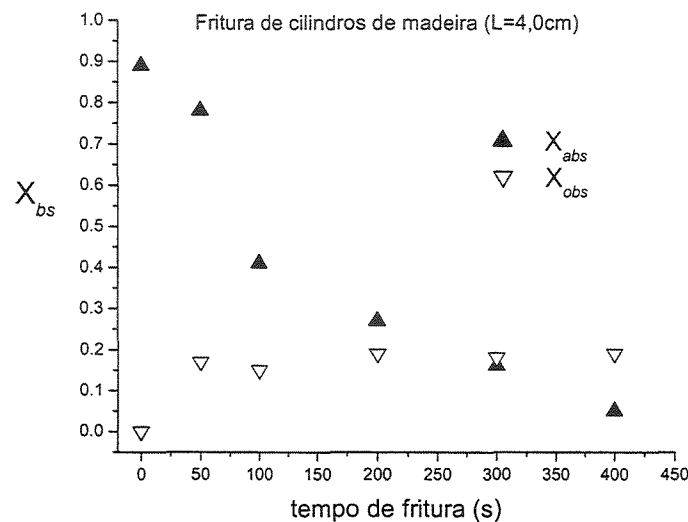


Figura 4.4: Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 4,0cm de comprimento.

Há um aumento inicial da quantidade de óleo, contudo, esta quantidade parece não variar muito com o tempo nem com a concentração de água após atingir uma certa concentração. A quantidade de equilíbrio parece estar entre 0,1 e 0,2 g de óleo por grama de sólidos secos (Fig. 4.3 e 4.4).

A Figura 4.5 apresenta os dados de conteúdo de óleo e de água, representado a relação destas variáveis para os dois tamanhos de cilindros. Os resultados indicam uma possível relação entre o conteúdo de água e o conteúdo de óleo para os dois tamanhos de cilindros.

Percebe-se uma relação direta entre a quantidade de água presente no material e a quantidade de óleo incorporada durante o processo de fritura. Este comportamento é indicativo de que um material como a madeira (mesmo não sendo um alimento) segue o mesmo fenômeno pelo qual passam materiais como batata e outros alimentos.

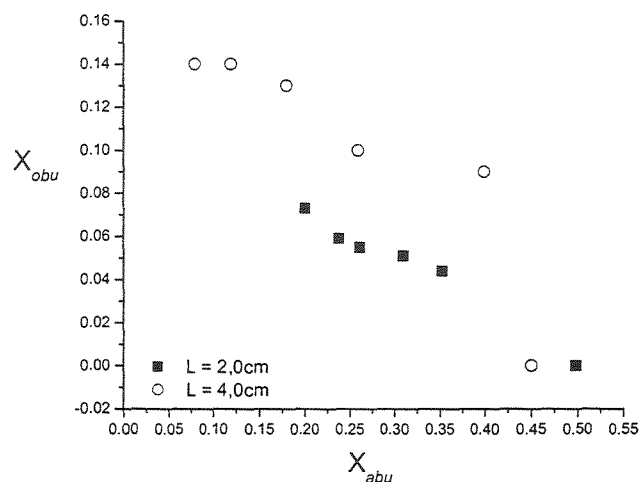


Figura 4.5: Variação do conteúdo de óleo ( $X_{abu}$ ) em função da umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de madeira

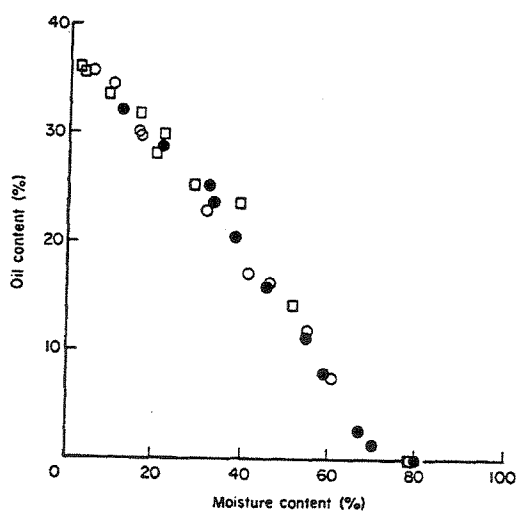


Figure 4. Oil content against moisture at 145 (●), 165 (○) and 185°C (□).

Figura 4.6: Variação do conteúdo de óleo ( $X_{abu}$ ) em função da umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de batata (Gamble et al, 1987).

Os resultados da Figura 4.5 corroboram os dados apresentados por Gamble et al (1987) para a fritura de batata (Figura 4.6) que mostram que o conteúdo de óleo é



inversamente proporcional ao conteúdo de umidade presente no material, independentemente até mesmo da temperatura de processo.

#### **4.1.2 – Ensaios com lodo de esgoto de Toowoomba, Queensland, Australia.**

##### **4.1.2.1 – Curvas de secagem**

A fritura dos cilindros de lodo provenientes da ETE de Toowoomba foi realizada de acordo com o procedimento descrito no item 3.3.3. Foram coletados dados de variação da quantidade de água presente no material frito em função do tempo em que este permaneceu no banho de óleo. Estes dados possibilitaram a construção das curvas de secagem mostradas a seguir.

Foram construídas curvas de secagem para três temperaturas de processo diferentes: 140, 160 e 180°C. Todas as curvas são mostradas separadamente no Anexo A.

A Figura 4.7a mostra a comparação entre as curvas de secagem de lodo a temperaturas diferentes em base úmida. A Figura 4.7b mostra estes dados em função da massa de sólidos secos mais a massa de óleo (definição no item 3.2.2).

Nesta fase, os ensaios analíticos de determinação da concentração de óleo no lodo frito não estavam disponíveis, contudo estas análises foram feitas em outras etapas do trabalho e serão mostrados posteriormente.

As taxas de variação de umidade com o tempo variam com o aumento da temperatura (uma das forças motrizes do processo de secagem). Em ambos os casos, percebe-se que a temperatura é um fator importante na transferência de massa, fazendo com que a velocidade de perda de massa seja maior quando a temperatura do meio (óleo) aumenta. Este aumento na taxa é evidente entre as temperaturas de 140 e 160°C, contudo a esta diferença já não é tão grande entre 160 e 180°C.

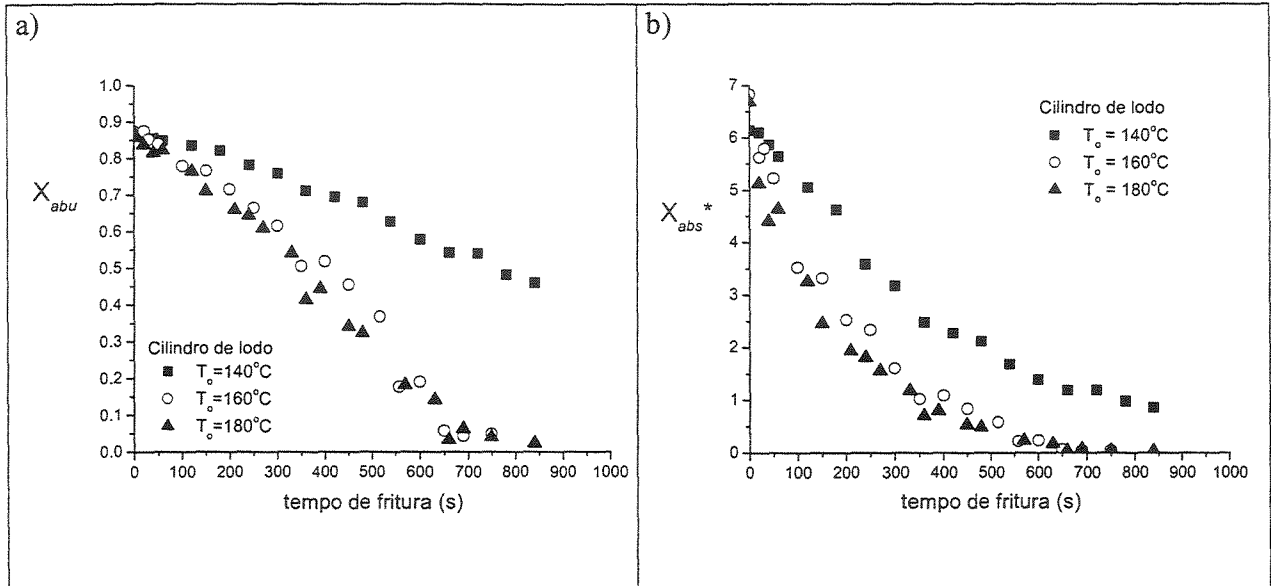


Figura 4.7: Variação do conteúdo de umidade durante a fritura de cilindros de lodo.

a)  $X_{abu}$  vs t e b)  $X_{abs}^*$  vs t.

Analisando-se a forma das curvas, nota-se que até os primeiros 100 segundos de processo, as curvas são lineares e daí em diante, elas tendem a diminuir a velocidade de queda. Este fenômeno é mais claro na Figura 4.7b, em especial para as curvas a temperaturas de 160 e 180°C. A partir de um certo tempo de processo, a curva passa de linear para um decaimento exponencial. Para o caso de 140°C, como a curva já é bem mais lenta, este tempo de mudança é mais longo, por volta dos 200 segundos de fritura.

Este ponto, onde ocorre a mudança de inclinação da curva, é também chamado de ponto crítico, ou ponto de umidade crítica. Antes de atingir-se o ponto crítico num processo de secagem, tem-se o fenômeno de perda de água livre, caracterizado pela taxa de secagem constante ( $X$  vs  $t$  linear).

A parte seguinte do processo, quando a curva  $X$  vs  $t$  não é mais linear, refere-se a um fenômeno de taxa de secagem decrescente. Neste caso, o material já teria perdido toda a sua água livre e estaria perdendo o conteúdo de umidade fisicamente ligado aos sólidos.

#### 4.1.2.2 – Composição elementar e poder calorífico do lodo frito a 180°C

Amostras de lodo frito à temperatura do óleo de 180°C foram separadas para análises químicas e físico-químicas. Foram dois os tipos de análises e se destinaram a caracterizar o produto frito e comparar este ao lodo seco por processo convencional (secagem com ar).

A análise de composição elementar forneceu o conteúdo de carbono e de hidrogênio do lodo seco e do lodo frito (Figura 4.8). Nota-se um aumento da concentração de carbono logo no primeiro minuto de contato do material com o óleo e ainda um posterior aumento com a duração da fritura (Figura 4.8a). O acréscimo de carbono no lodo pode ser explicado pela incorporação de óleo ao mesmo devido à perda de água que ocorre durante a fritura. A Figura 4.8b mostra que o contrário ocorre com a porcentagem de hidrogênio presente, que diminui com o tempo de fritura.

Os resultados da determinação do poder calorífico das amostras de lodo frito e seco estão apresentados nas Figuras 4.9 e 4.10.

Os valores de PCS (Poder Calorífico Superior) são importantes na análise da qualidade de um material como combustível. A Figura 4.9a mostra que após um tempo de processo o PCS do lodo sofre um aumento de 33% em relação ao valor do lodo que passou por uma secagem convencional a ar.

Estes resultados estão intimamente ligados à quantidade de água presente no material queimado, como mostra a Figura 4.9b. À medida que a umidade diminui o poder calorífico aumenta, pois a evaporação da água presente no material consome parte do calor produzido pela queima do material.

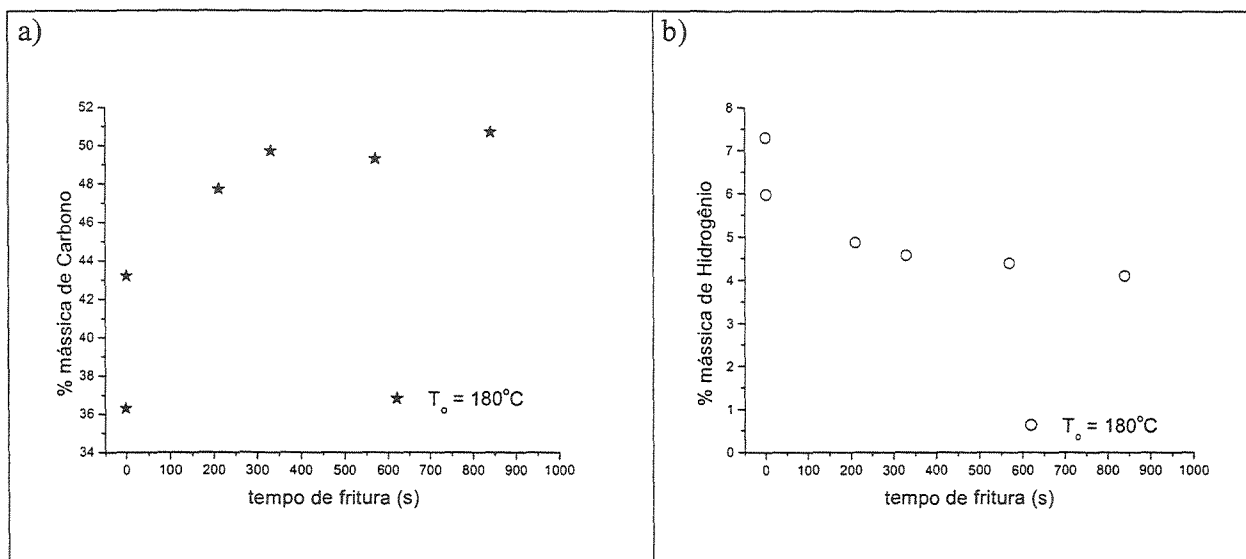


Figura 4.8: Variação da porcentagem mássica de a) carbono e b) hidrogênio de amostras de lodo fritos em óleo a  $180^\circ\text{C}$ . O ponto “zero” é referente ao lodo seco a ar.

Outro resultado interessante é a quantidades de cinzas restante após a queima do material. Nota-se também que os materiais que passaram pelo processo de fritura apresentam uma porcentagem de cinzas bastante inferior ao material seco convencionalmente.

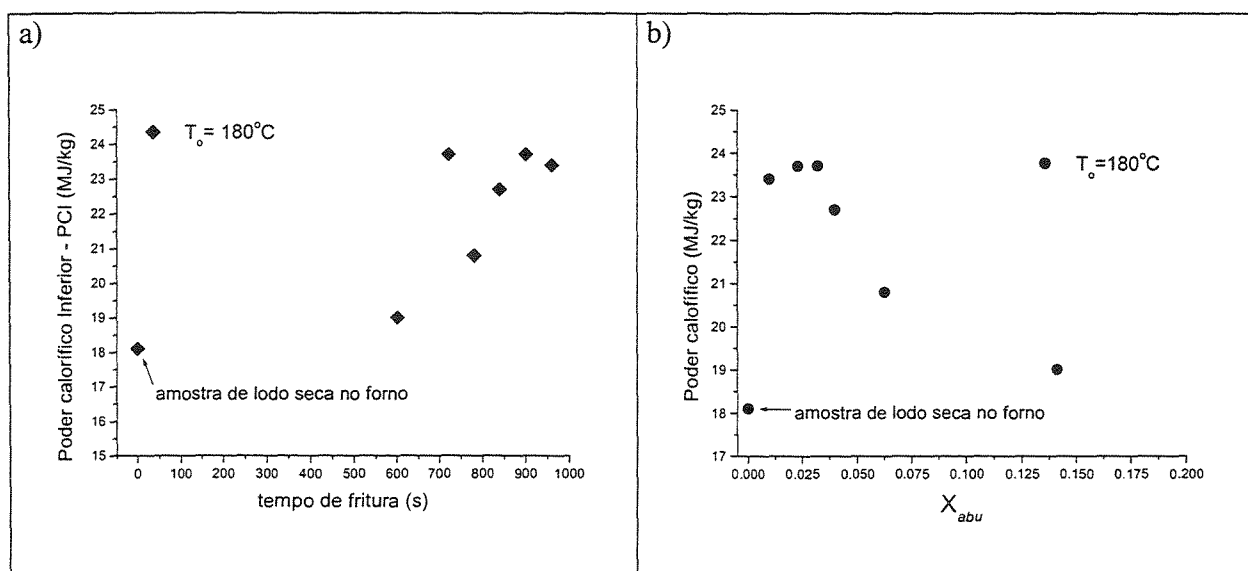


Figura 4.9: Poder calorífico de amostras de lodo fritos a  $180^\circ\text{C}$ : variação em relação ao a) tempo de fritura e b) umidade da amostra.

O valor da concentração é cerca de 4 vezes menor para os materiais fritos. Uma quantidade menor de cinzas implica numa característica bastante positiva do processo de combustão.

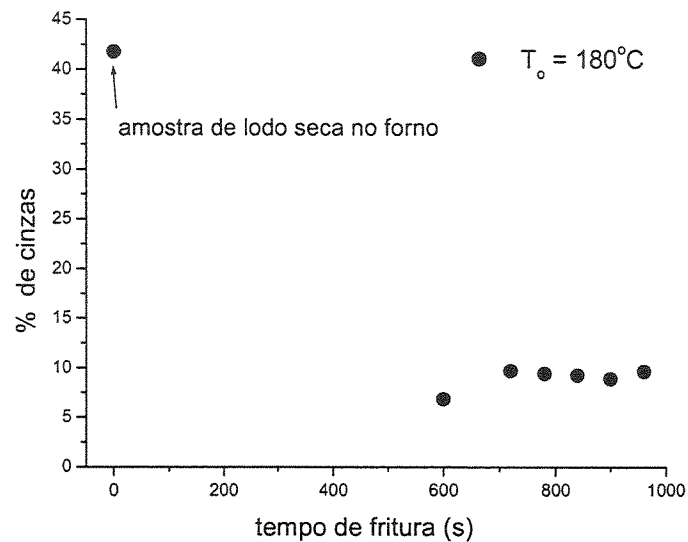


Figura 4.10: Porcentagem de cinzas após a combustão de amostras de lodo fritos a  $180^{\circ}\text{C}$ : variação em relação ao tempo de fritura.

## 4.2 – Resultados obtidos na Ecole des Mines d’Albi-Carmaux

Cronologicamente, a fase realizada na Ecole des Mines d’Albi-Carmaux ocorreu no meio do período de tempo do estágio fora do Brasil, ou seja, de Maio a Setembro de 2002.

Os resultados aqui apresentados estão divididos em ensaios preliminares e ensaios com lodo de esgoto da ETE da cidade de Mauberges, França.

Uma característica importante desta fase é a grande quantidade de pontos obtida para cada curva apresentada, que é devida ao sistema de aquisição de dados *online*. Esta é uma metodologia de trabalho diferente das outras duas fases deste projeto, e que contribuiu bastante para o estudo da secagem, permitindo a obtenção de um maior número de dados. Esta metodologia está descrita no item 3.4.3. Todos os resultados podem ser visto no Anexo B.

### 4.2.1 – Ensaios preliminares

Os ensaios preliminares foram realizados utilizando três tipos de materiais diferentes: levedura, madeira e purê de batata. As características destes materiais, os procedimentos usados em sua preparação e na realização dos experimentos de fritura estão descritos no item 3.4.3.1.

A secagem da levedura através da fritura pode ser visualizada na Figura 4.11. Observa-se nesta figura as curvas de secagem –  $X_{abs}$  vs  $t$  - para temperaturas do óleo diferentes. Existe a influência da temperatura do meio (óleo) na retirada da água do sistema, porém na faixa estudada, esta influência não é tão destacada.

É possível notar que o período de taxa de secagem constante vai até aproximadamente 200 segundos de processo. Grande parte da quantidade de umidade presente no material é perdida neste período, sendo o resto da umidade evaporada numa taxa bastante mais lenta até o fim do processo de fritura.

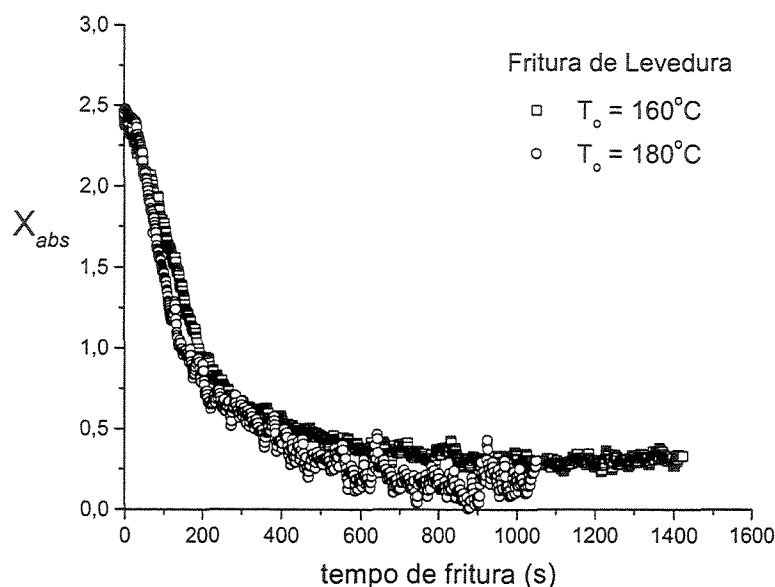


Figura 4.11: Fritura de levedura a diferentes temperaturas de óleo.

A Figura 4.12a mostra a secagem de duas amostras de madeira com a mesma umidade inicial e também fritas sob as mesmas condições que a levedura. As duas curvas de secagem são bastante próximas, mostrando que os ensaios são repetitivos. Da mesma maneira como a levedura, grande parte da umidade presente é umidade livre, o que significa que esta será perdida numa taxa constante no início do processo.

Percebe-se que existe uma pequena instabilidade na medida na medida de massa, representada por picos de podem ser visto na Figura 4.12a. Esta instabilidade foi minimizada com a instalação de camadas isolantes entre a balança e o fritador.

A curva de secagem de purê de batata é mostrada na Figura 4.12b. Esta curva é o resultado da média de cinco experimentos realizados sob as mesmas condições que a levedura e a madeira. Uma característica marcante desta curva é a alta taxa de secagem no início do processo.

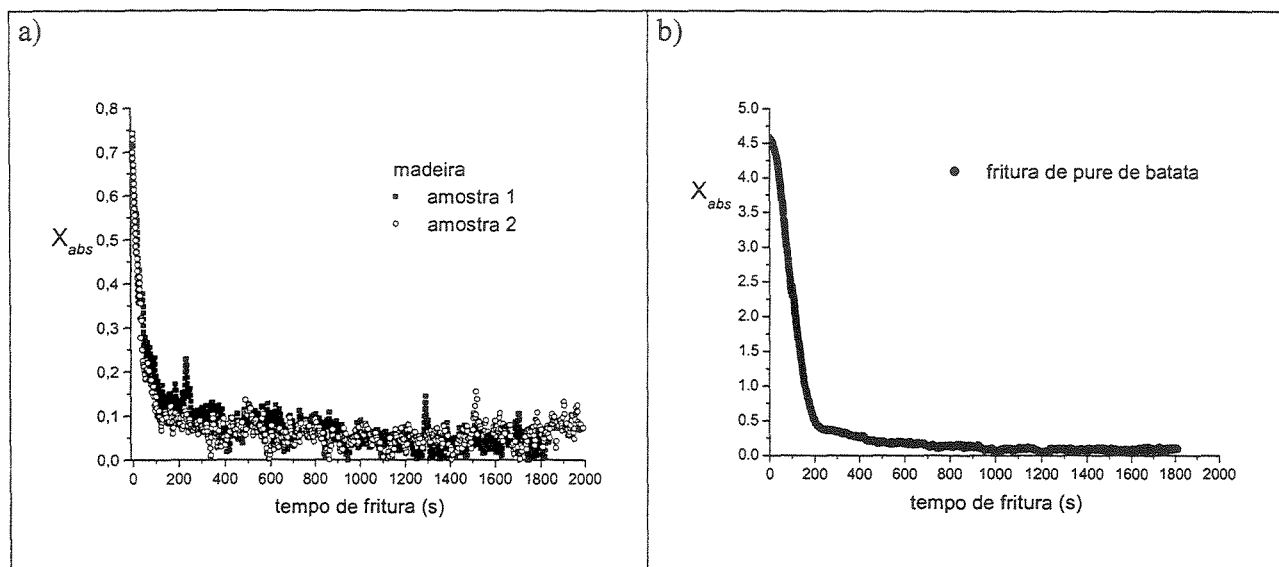


Figura 4.12: Fritura de semi-cilindros de madeira (a) e de purê de batata (b)

A Figura 4.13a mostra uma curva típica de secagem (perda de umidade em função do tempo).

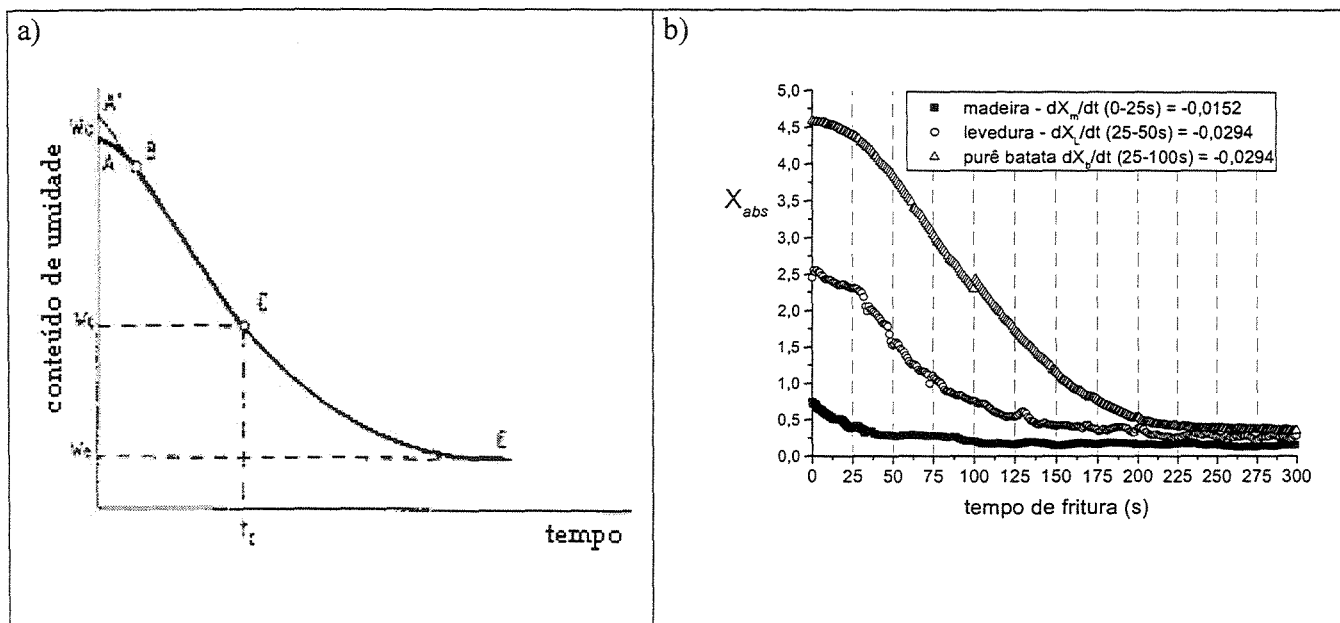


Figura 4.13: Curva de secagem típica (Smollen, 1990) (a) e curvas de secagem de madeira, levedura e purê de batata (b)



A região da curva compreendida entre o ponto B e o ponto C corresponde ao período de secagem constante, onde se perderia a umidade livre contida no material sendo seco. A comparação visual das Figuras 4.13a e 4.13b confirma a presença dos diferentes períodos de secagem presentes durante a fritura dos materiais.

Além da influência da quantidade de umidade inicial do material na taxa de secagem, existe também a influência do tipo umidade presente, e como esta umidade está relacionada com a estrutura sólida de material. De acordo com a metodologia de preparação para os ensaios (item 3.4.3), os três tipos de materiais foram preparados através da incorporação de água, para que atingissem a umidade inicial desejada. Logo era esperado que grande parte da umidade presente fosse umidade livre.

Tanto a levedura quanto o purê de batata apresentam uma curta fase inicial (25s) de aquecimento do material, correspondente à curva AB ou A'B na Figura 4.13a. Durante a fritura da madeira por sua vez não é possível reconhecer esta fase.

Se forem considerados os primeiros segundos de processo nos três casos (4.13b) e for estimada a taxa de secagem ( $dX/dt$ ), têm-se os valores mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Condições iniciais dos ensaios preliminares e taxas de secagem obtidas

| <i>Material</i>     | <i>T<sub>óleo</sub> (°C)</i> | <i>X<sub>i</sub> (b.s.)</i> | <i>X<sub>i</sub> (b.u.)</i> | <i>Período</i> | <i>dX/dt</i> |
|---------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|--------------|
| Levedura de padaria | 180                          | 2,45                        | 0,71                        | 25-50s         | -0,0294**    |
| Purê de batata      | 180                          | 4,58                        | 0,82                        | 25-100s        | -0,0294*     |
| Madeira             | 180                          | 0,74                        | 0,43                        | 0-25s          | -0,0152**    |

\*taxa calculada durante 75s, \*\*taxa calculada durante 25s

Mesmo as umidades iniciais da levedura e do purê sendo diferentes, apresentam o mesmo valor de taxa de secagem no período constante. Provavelmente porque possuem estruturas sólidas parecidas, sendo que a incorporação / remoção da umidade ocorre de forma similar.

A madeira possui uma estrutura sólida bastante diferente dos outros materiais e da mesma maneira que tem uma absorção de água lenta (obtenção de uma baixa umidade inicial) tem uma secagem mais lenta que os outros materiais.

#### 4.2.2 – Ensaio com lodo de esgoto de Mauberges, França

##### 4.2.2.1 – Estudo da temperatura do óleo e da forma geométrica do lodo

Realizou-se o estudo da fritura do lodo, experimentando-se condições de trabalho distintas (temperatura do óleo) e também formas geométricas diferentes do material.

As Figuras 4.14 e 4.15 mostram os resultados da fritura de lodo a uma temperatura de óleo de 160°C. Percebe-se que existe uma diferença significativa no comportamento da curva de secagem em função da forma do material. Tanto no caso do cilindro quanto no caso do “bolo” de lodo (forma aproximadamente esférica) foi utilizada a mesma massa. Portanto, infere-se que a forma geométrica do material tem uma influência grande na taxa de secagem.

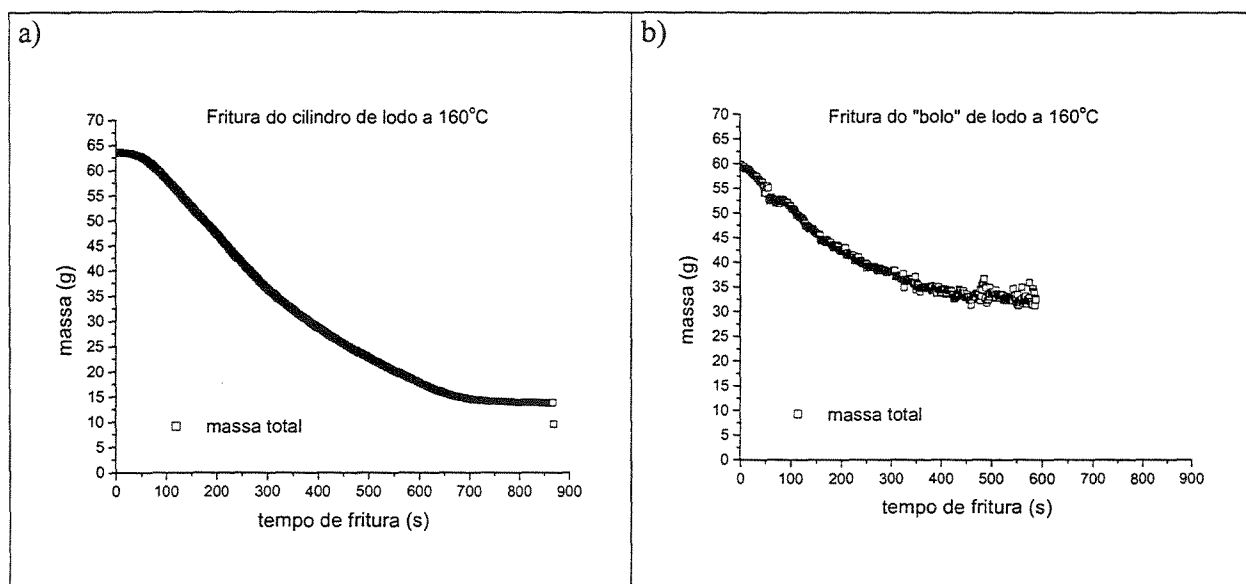


Figura 4.14: Variação da massa total do cilindro (a) e do “bolo” (b) durante a fritura de lodo a 160°C.

Esta diferença pode ser vista na Figura 4.15, que apresenta as curvas de variação de umidade com o tempo para o cilindro e para o “bolo” de lodo.

A secagem do cilindro inicia-se mais lenta, contudo com o tempo (após os primeiros 200s), passa a ser mais rápida que a taxa de secagem do material na forma de “bolo”. A diferença de comportamento fica clara quando se compara o grau de secagem, por exemplo, após 600 segundos de fritura o cilindro de lodo atinge uma umidade de 0,45g de água por grama de sólidos secos, enquanto o bolo de lodo apresenta um  $X_{abs} = 1,6$ .

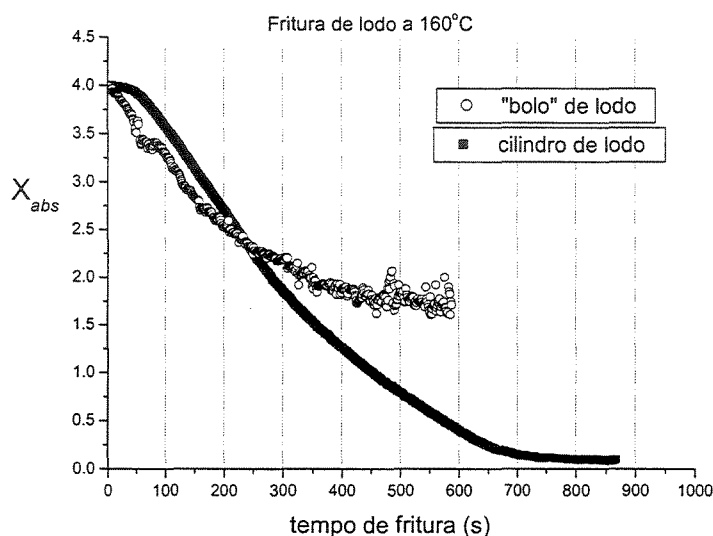


Figura 4.15: Variação da massa total do cilindro (a) e do “bolo” (b) durante a fritura de lodo a 160°C.

As Figuras 4.16 e 4.17 mostram os resultados obtidos para o processo realizado a uma temperatura maior (180°C).

A relação entre as formas geométricas tem a mesma tendência que para a temperatura de 160°C, ou seja, o cilindro de lodo apresenta uma secagem mais rápida que o material sem forma definida.

A Figura 4.17 mostra comparação entre as curvas. Nota-se que, a 180°C, existe uma proximidade muito maior entre as curvas, ou seja, em ambas situações a taxa de secagem é muito similar, o que ocorre nos 300s primeiros segundos de fritura. Após este tempo, a taxa

de secagem do material disforme diminui sensivelmente em relação à taxa de secagem do cilindro.

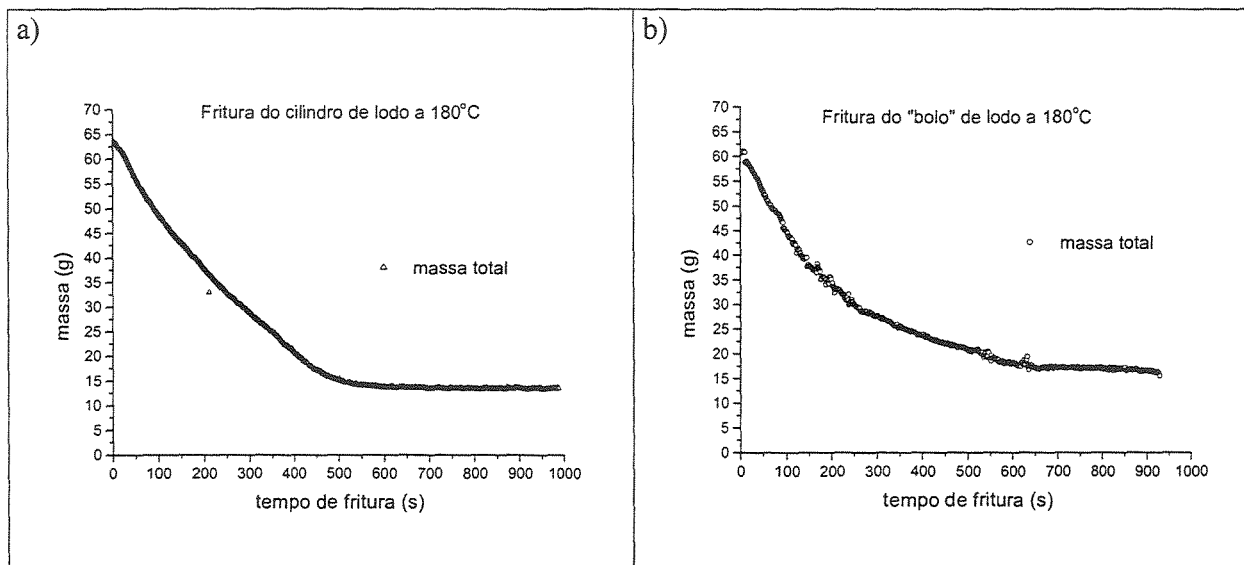


Figura 4.16: Variação da massa total do cilindro (a) e do “bolo” (b) durante a fritura de lodo a 180°C.

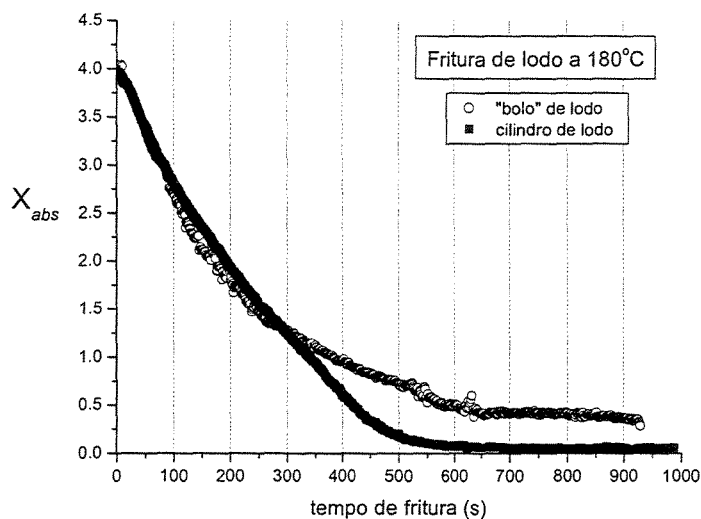


Figura 4.17: Comparação da variação da umidade do lodo, cilindro e “bolo”. Temperatura do óleo = 180°C.

Tomando mais uma vez um certo tempo de processo, como por exemplo 600 segundos, o conteúdo de umidade do cilindro está quase nulo, enquanto o do bolo de lodo está na faixa de 0,5 g água por grama de sólidos secos (Figura 4.17).

O efeito da temperatura na fritura dos cilindros pode ser visto na Figura 4.18.

Cilindros com mesma massa e mesmas dimensões foram fritos, e através da variação da umidade com o tempo pode-se ver que a temperatura aumenta a taxa de secagem. No caso da curva a 160°C, a secagem em si começa a mais de 50 segundos após a introdução do cilindro de lodo no banho de óleo. Pode-se ver como a secagem a 180°C é mais rápida pois atinge um valor de umidade próximo de zero mais de 100 segundos antes da curva feita a 160°C.

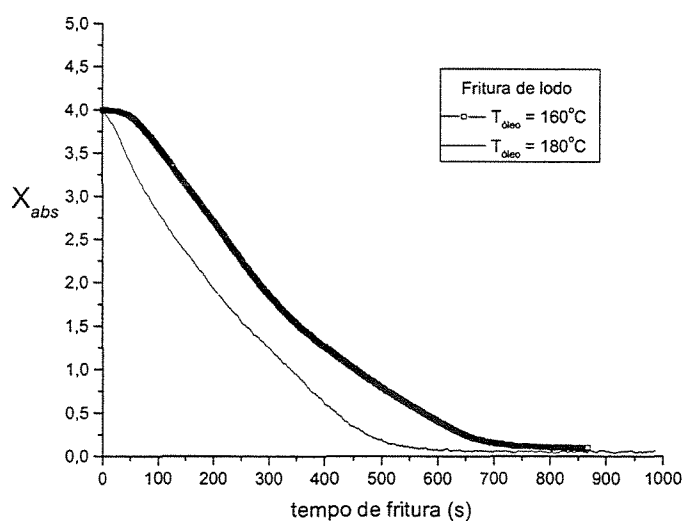


Figura 4.18: Variação da umidade do cilindro de lodo durante frituras a temperaturas diferentes.

#### 4.2.2.2 – Fritura de cilindros de lodo a 180°C: análise dos produtos

Para análise de algumas características do produto frito, foram necessários novos experimentos de fritura. Foi determinada a condição de 180°C para a temperatura do banho

de óleo, e vários cilindros de mesma massa e dimensões foram fritos, cada um deles por um determinado tempo (item 3.4.3.3).

Foram realizados 10 experimentos, com os seguintes tempos de permanência dentro do banho de óleo: 20, 50, 75, 169, 263, 356, 450, 570, 690, 810 segundos.

O produto de cada fritura foi separado para determinações de propriedades características do produto, como por exemplo, umidade (item 3.2.2), conteúdo de óleo (item 3.2.3), composição elementar (item 3.2.6) e poder calorífico (item 3.2.5).

Na Figura 4.19 pode-se ver que existem diferenças entre curvas obtidas por métodos diferentes. Convém lembrar que durante a fritura em que se usou a aquisição de dados online, somente um cilindro foi frito e a sua variação de massa foi medida ao longo do tempo. Já no outro método, cada ponto da curva se refere a um cilindro diferente, portanto foram necessários 10 experimentos de fritura para a obtenção desta curva. Métodos diferentes implicam em diferentes níveis de erros.

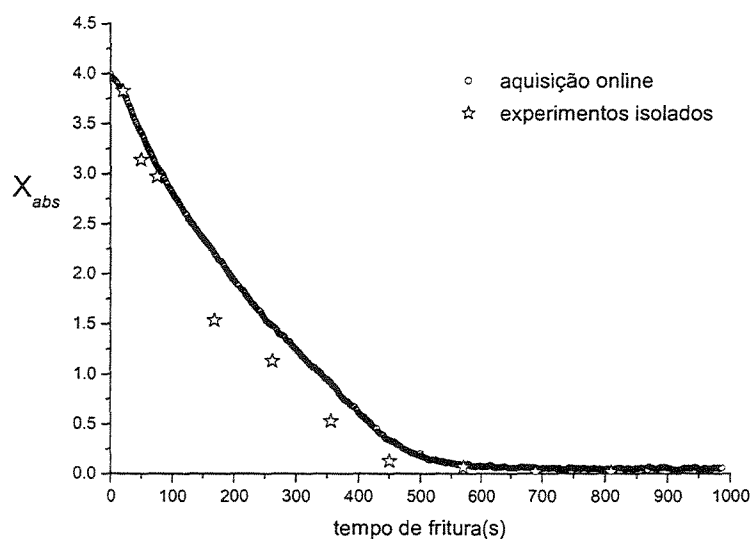


Figura 4.19: Curvas de secagem: experimentos isolados em comparação com o experimento de aquisição online. Temperatura do óleo 180°C.

A extração por solvente à temperatura ambiente foi utilizada a fim de determinar o conteúdo de óleo das amostras (item 3.2.3). Estes resultados estão apresentados na Figura 4.20 e 4.21.

Na Figura 4.21 pode-se visualizar a relação entre a concentração de água e o conteúdo de óleo presente no material. Este mesmo comportamento também foi observado em ensaios preliminares com a madeira realizado na Universidade de Queensland (Fig. 4.5) e foi observado por Gamble et al (1987) (Fig. 4.6), de acordo com a teoria apresentada por este que diz que a quantidade de óleo aderido ao material é proporcional à quantidade de água remanescente dentro do material.

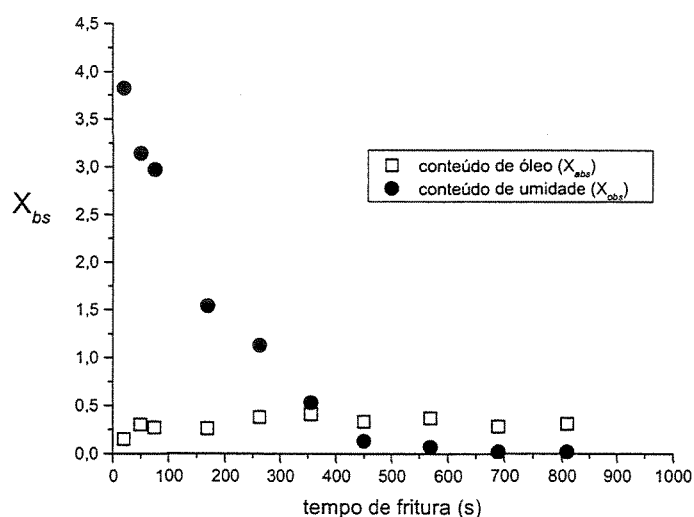


Figura 4.20: Variação da umidade e do óleo em função do tempo durante a fritura de lodo a 180°C.

Os resultados da análise de composição elementar dos produtos fritos são mostrados na Figura 4.22. A porcentagem de carbono (C) no produto varia significativamente com o tempo de fritura, sugerindo que é devida à incorporação de óleo ao material ao decorrer do tempo de fritura.

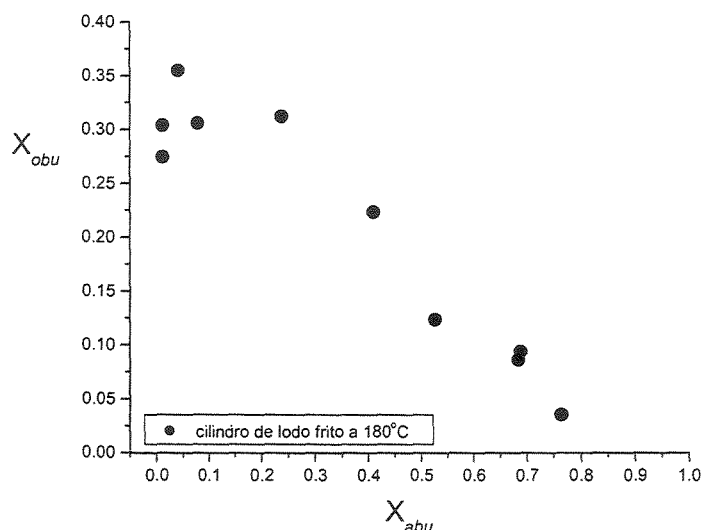


Figura 4.21: Relação entre o conteúdo de óleo incorporado ao lodo e seu conteúdo de umidade

O elemento hidrogênio (H) apresenta uma leve elevação e o nitrogênio (N) mantém-se praticamente constante. A variação de conteúdo de hidrogênio também foi determinada para os produtos fritos da UQ (Figura 4.8b). Não houve concordância com os dois resultados obtidos. Os primeiros a serem determinados foram os resultados de UQ, onde houve um decréscimo de conteúdo de hidrogênio.

Os resultados encontrados nesta fase apresentam um acréscimo de conteúdo de hidrogênio, como pode ser visto na Figura 4.22. Existem muitas variáveis que podem influenciar nestes resultados como a composição do material usado, o óleo e as diferentes interações e reações químicas que podem ocorrer durante a fritura. Portanto, no presente momento não é possível inferir alguma resposta para esta diferença de comportamento.

Na Figura 4.23 são apresentadas as curvas de variação de poder calorífico do lodo com o tempo de fritura determinadas de duas maneiras: através da bomba calorífica (item 3.2.5) e através de cálculos teóricos usando as porcentagens de CNH, calculados e fornecidos pelo próprio equipamento de análise.



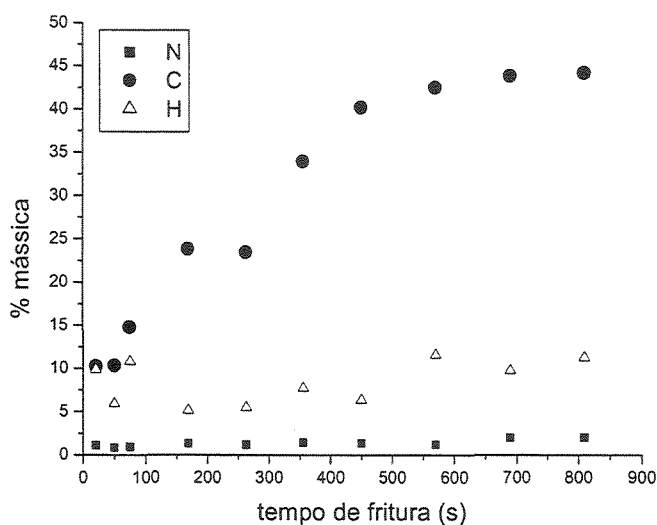


Figura 4.22: Variação da porcentagem mássica dos elementos C, H e N durante a fritura de lodo

A curva de poder calorífico inferior obtida pela análise dos produtos na bomba calorífica tende a ter valores menores que os das duas outras curvas, que foram calculadas teoricamente através das porcentagens obtidas na análise elementar. A diferença deve-se provavelmente a uma superestimação do cálculo teórico feito pelo equipamento.

Também, quanto aos resultados da bomba calorífica, não foi possível o processamento dos materiais com tempo de fritura menor que 160 segundos, pois sua alta umidade impedia a autocombustão do material. Os valores de calor de combustão do lodo estão apresentados na Tabela 4.2.

A Tabela 4.3 apresenta calores de combustão encontrados na literatura para alguns materiais usados como combustíveis. Em comparação com a Tabela 4.2, o calor de combustão do lodo frito está na mesma ordem de grandeza do valor para a madeira e para resíduos agrícolas, caracterizando-o como um potencial bio-combustível.

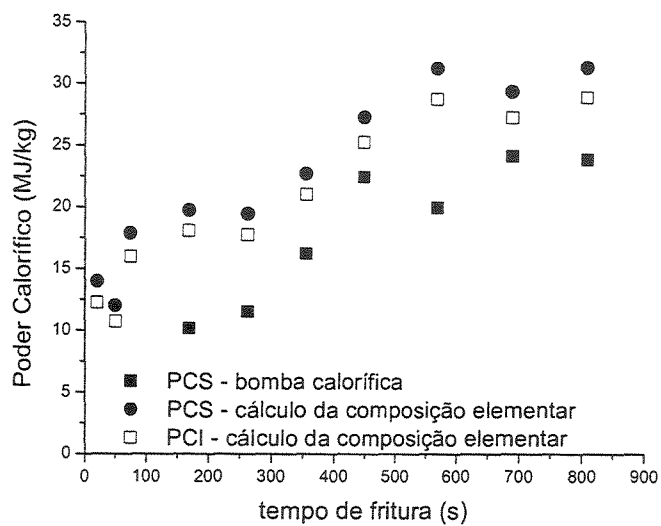


Figura 4.23: Variação do poder calorífico do lodo durante a fritura de lodo

Tabela 4.2: Valores de calor de combustão do lodo de esgoto frito.

| <i>Tempo de fritura (s)</i> | <i>PCI (MJ/kg)</i> |
|-----------------------------|--------------------|
| Lodo seco a ar              | 10,709             |
| 20                          | n.a.               |
| 50                          | n.a.               |
| 75                          | n.a.               |
| 169                         | 10,174             |
| 263                         | 11,526             |
| 356                         | 16,235             |
| 450                         | 22,431             |
| 570                         | 19,959             |
| 690                         | 24,129             |
| 810                         | 23,847             |

n.a. = não autotérmica

Tabela 4.3: Calor de combustão de algumas biomassas, resíduos e óleos.

| <i>Produto</i>           | <i>Calor de combustão (MJ/kg)</i> | <i>Autor</i>       |
|--------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Bagaço de cana de açúcar | 19,228                            | Silva et al (1998) |
| Madeira                  | 22,781                            | Silva et al (1998) |
| Resíduos de cafeicultura | 24,912                            | Silva et al (1998) |
| Óleo de Canola           | 39,51                             | Lang et al (2001)  |
| Óleo de girassol         | 39,46                             | Lang et al (2001)  |

A variação da percentagem de carbono e do poder calorífico estão apresentadas nas Figuras 4.24 e 4.25.

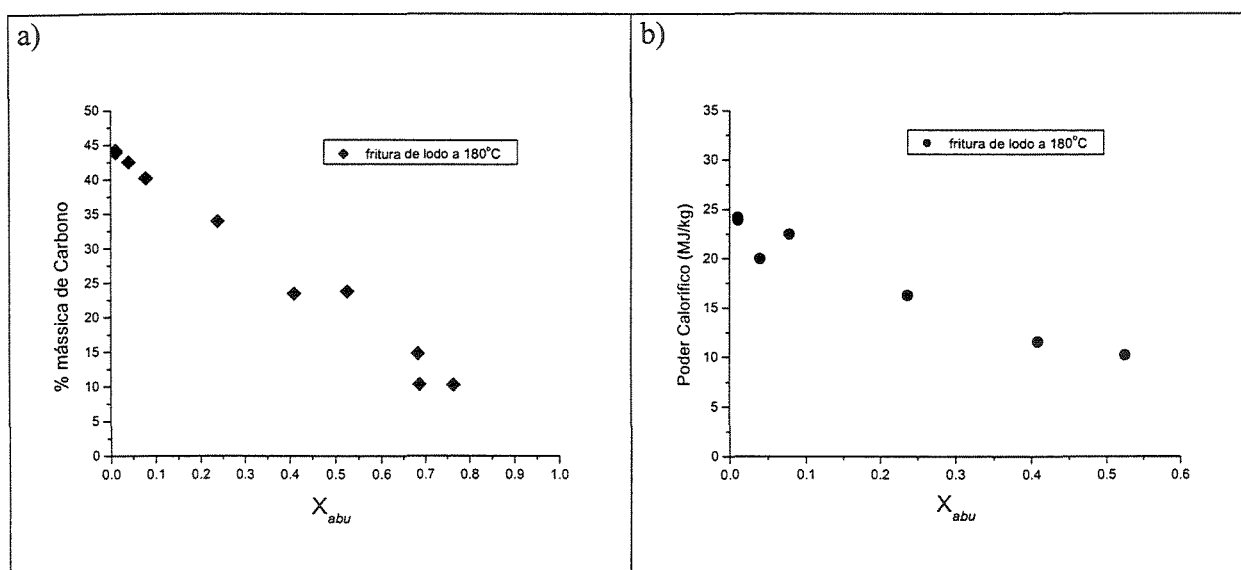


Figura 4.24: Percentagem de carbono das amostras de lodo frito (a) e variação do poder calorífico (b) das amostras de lodo em função do seu conteúdo de umidade.

Nota-se que a perda de umidade durante a fritura implica no aumento da percentagem mássica de carbono na amostra. Isto leva ao aumento do poder calorífico da mesma, indicando uma relação direta entre estes dois últimos parâmetros. A Figura 4.25 mostra como o conteúdo de carbono provoca um aumento no poder calorífico. O óleo tem um alto poder calorífico – aproximadamente 40 MJ/kg (Tabela 4.3) – portanto, quando este se adere ao material sólido, aumenta o calor de combustão do mesmo.

É uma relação diretamente proporcional, contudo, de acordo com a Figura 4.25, não se pode concluir se a relação é linear ou não. Um estudo mais profundo destas variáveis pode levar a obtenção de uma correlação que estime o valor energético do lodo frito a partir de seu conteúdo carbonoso.

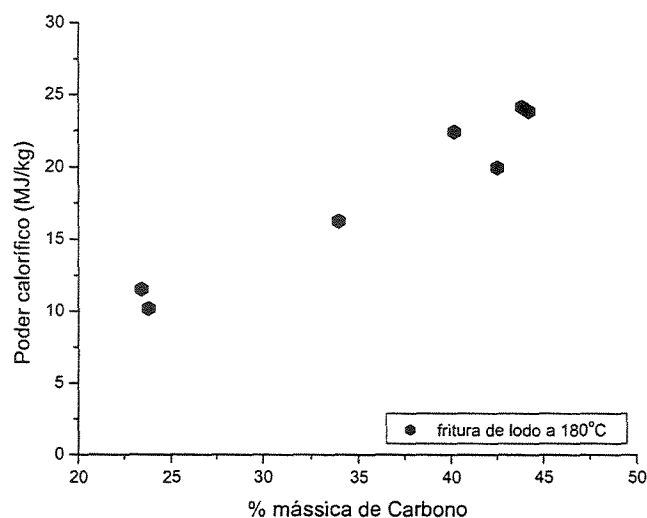


Figura 4.25: Variação do poder calorífico das amostras de lodo em função do seu conteúdo de carbono.

#### 4.2.2.3 – Imagens do produto frito: formação da crosta e estimativa da área de transferência de calor e massa

Ao fim de cada ensaio do item anterior, foram tiradas fotos dos produtos fritos. Estas imagens digitalizadas permitem a verificação da formação da crosta a medida que acontece a fritura do material.

Através destas imagens, foi possível realizar o cálculo estimado da espessura desta crosta e da sua variação com o tempo.

As Figuras 4.26 a 4.31 mostram as imagens digitalizadas dos produtos fritos. Através das imagens pode-se confirmar a existência de uma interface que separa a parte

seca da parte úmida do material. No decorrer da fritura, esta interface se movimenta em direção ao centro do cilindro. Este tipo de abordagem para o estudo e modelagem do processo de fritura foi apresentado por Farkas et al (1994), que compararam o fenômeno de secagem com o fenômeno de congelamento, pela existência de uma interface móvel.

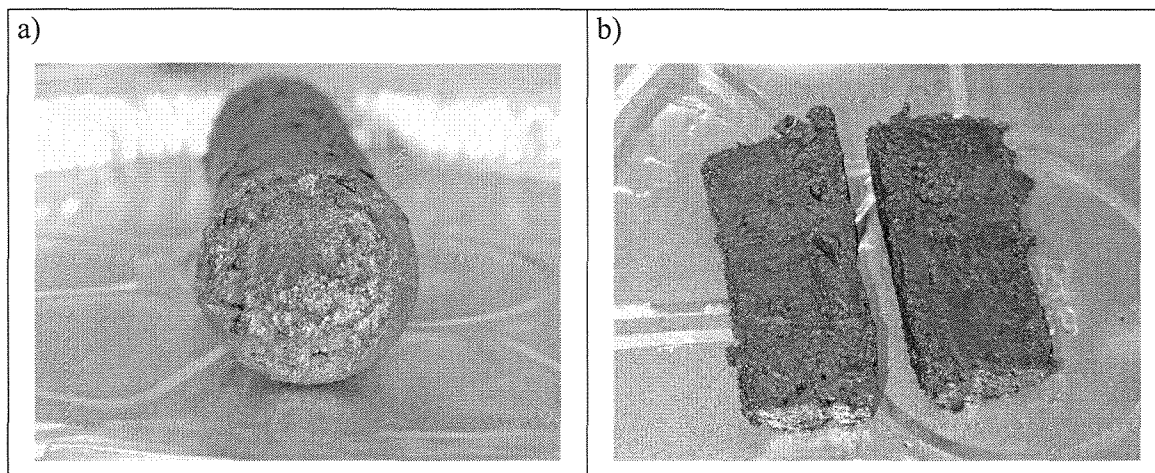


Figura 4.26: Fotografias dos cilindros de lodo antes da fritura (a) e após 20 s de fritura (b)

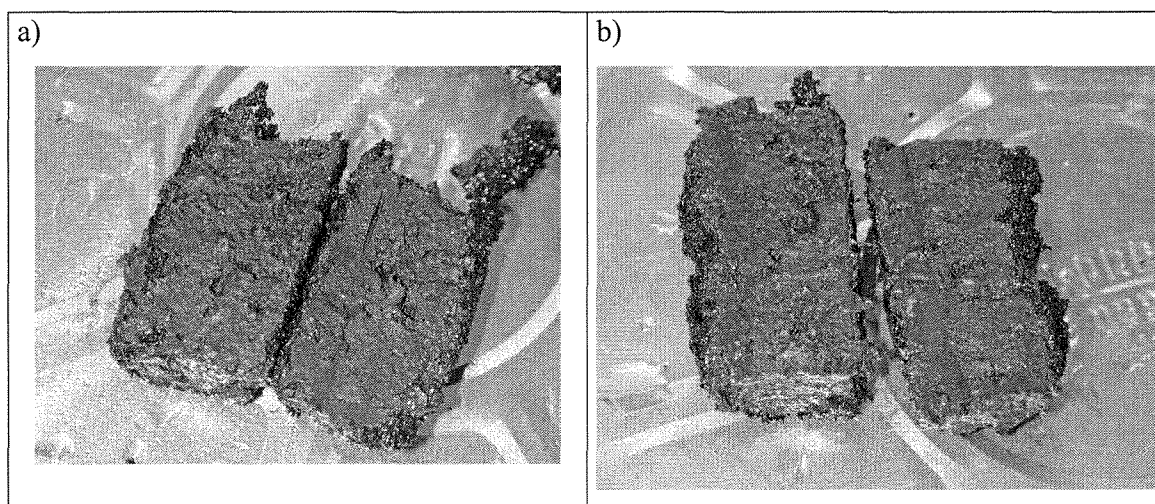


Figura 4.27: Cilindro de lodo após 50 (a) e 75 (b) segundos de fritura.

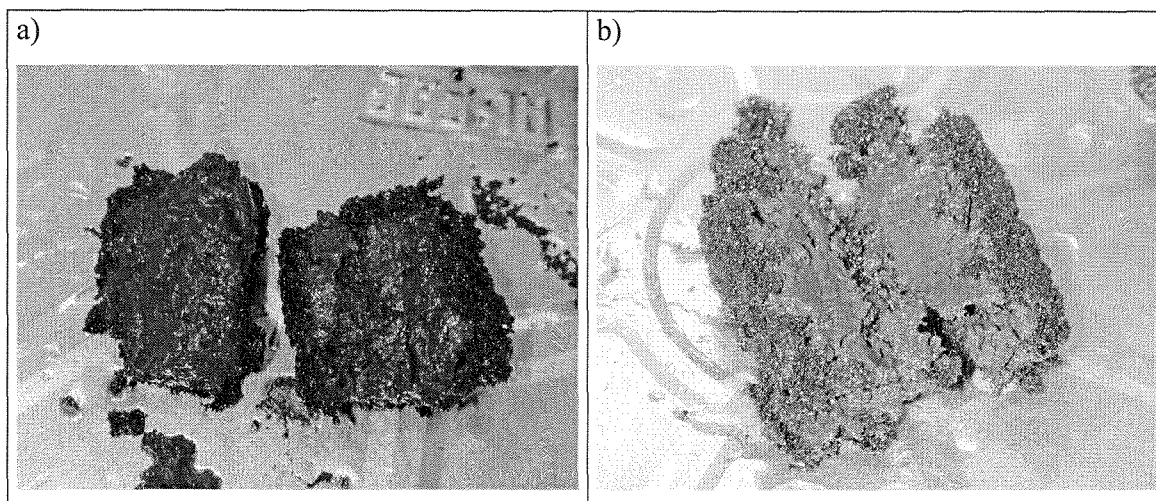


Figura 4.28: Cilindro de lodo após 169 (a) e 263 (b) segundos de fritura.

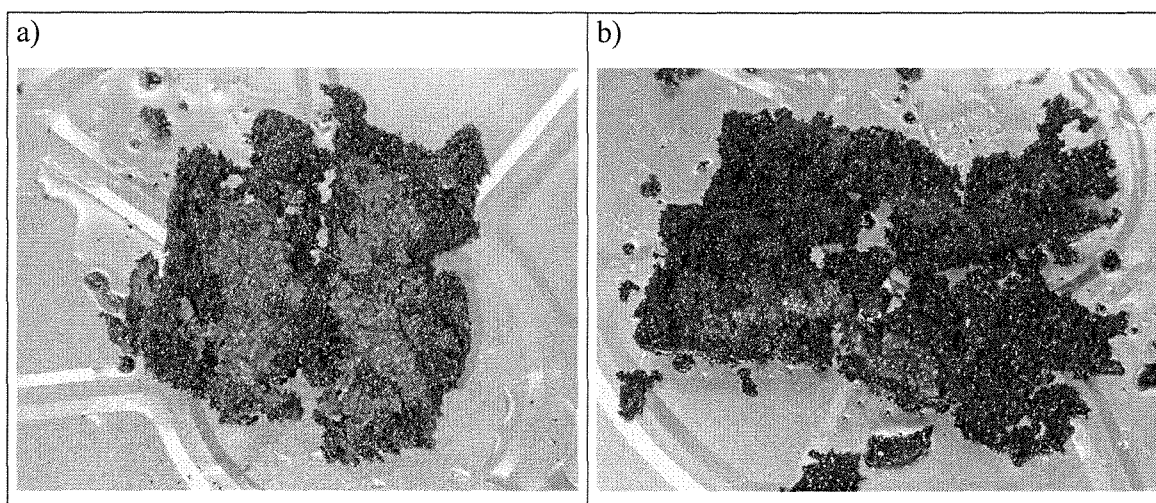


Figura 4.29: Cilindro de lodo após 356 (a) e 450 (b) segundos de fritura.

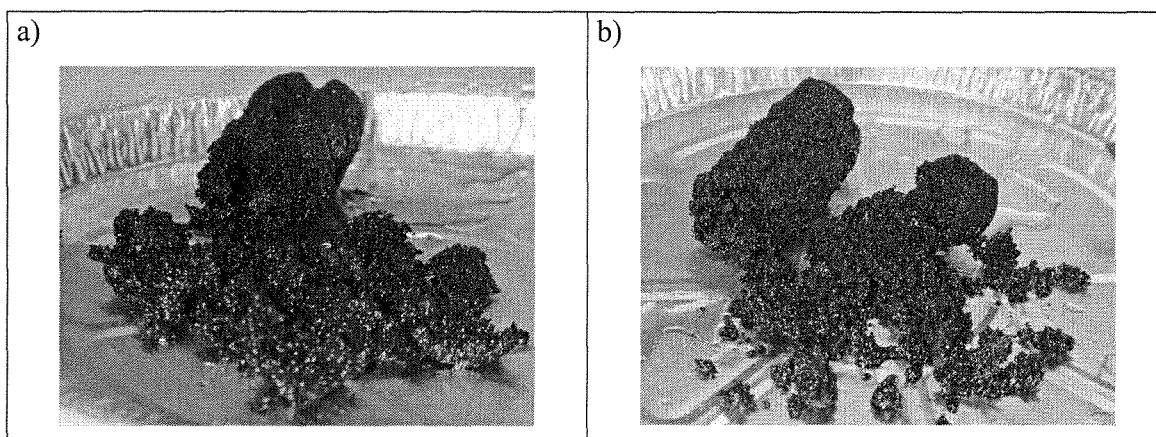


Figura 4.30: Cilindro de lodo após 570 (a) e 690 (b) segundos de fritura.

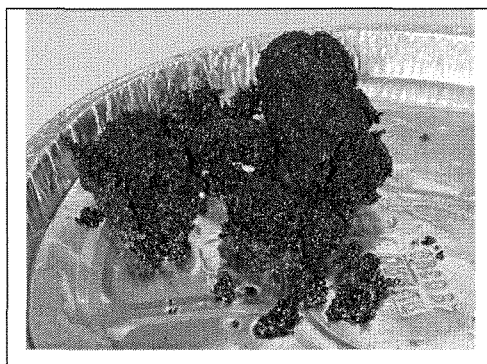


Figura 4.31: Cilindro de lodo frito por 810 segundos.

Estimou-se o movimento da frente de secagem através da medição do aumento da espessura da crosta. A comparação das imagens dos produtos fritos com o cilindro original (Fig.4.26a), permitiu o cálculo da espessura da crosta (item 3.4.3.3) Os resultados destes cálculos podem ser vistos na Tabela 4.4 e nas Figuras 4.32 e 4.33.

Tabela 4.4 : Raio do cilindro e interface de transferência de calor e massa

| <i>Tempo de fritura (s)</i> | <i>Raio do cilindro (cm)</i> | <i>Interface de transferência de calor e massa (cm<sup>2</sup>)</i> |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 0                           | 1,375                        | 83,75                                                               |
| 20                          | 1,306                        | 79,55                                                               |
| 50                          | 1,163                        | 70,87                                                               |
| 75                          | 1,1                          | 67,00                                                               |
| 169                         | 0,9                          | 55,43                                                               |
| 263                         | 0,8                          | 49,49                                                               |
| 356                         | 0,6                          | 36,24                                                               |
| 450                         | 0,25                         | 15,22                                                               |
| 570                         | 0,001                        | 0,0609                                                              |

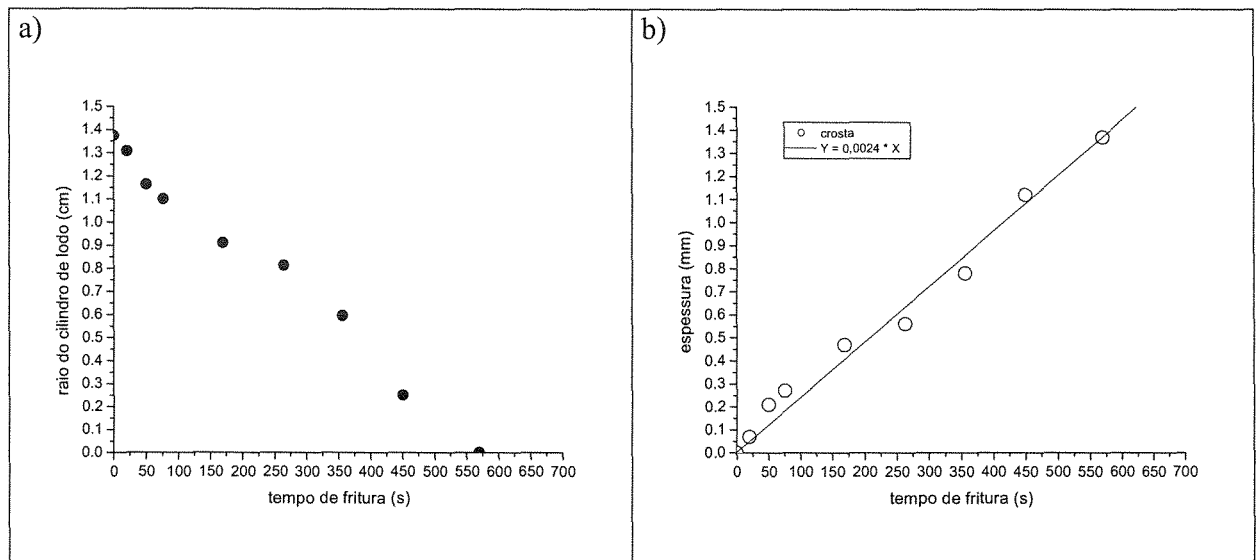


Figura 4.32: Diminuição do raio do cilindro (a) e aumento da espessura da crosta (b) formada durante a fritura

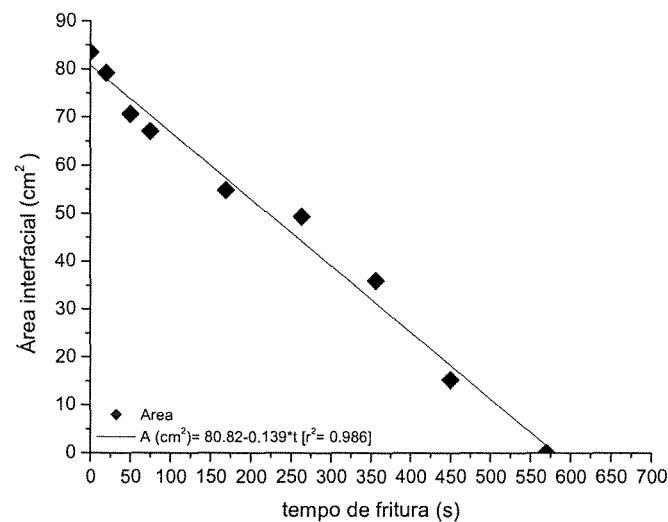


Figura 4.33: Diminuição em função do tempo da área interfacial de transferência de calor e massa

Estes dados apresentam uma característica importante do material. A camada seca tem propriedades físico-químicas bastante diferentes da parte úmida, mais notoriamente a mudança na estrutura física do sólido, que passa a ser muito mais poroso. Apesar de poroso, o material é bastante duro. Ocorre também um sensível encolhimento do material, resultando em redução de volume.



### 4.3 – Resultados obtidos na UNICAMP

Os dados apresentados neste item são referentes à última fase experimental desta tese de doutorado. Foram obtidos de Março a Agosto de 2003, no Laboratório de Processos Termofluidodinâmicos (LPTF) da Faculdade de Engenharia Química, sendo que algumas análises foram feitas na Faculdade de Engenharia de Alimentos e também na Faculdade de Engenharia Mecânica.

Não foi utilizado material preliminar, sendo que todos os experimentos realizados foram feitos com o lodo de esgoto da ETE Samambaia, Campinas, SP, Brasil.

Os resultados foram obtidos através da execução de dois planejamentos experimentais. Um primeiro que foi realizado para a análise do produto final, a fim de verificar a influência das variáveis escolhidas sobre a umidade final e o conteúdo de óleo do produto frito. Um segundo planejamento foi realizado a fim de construir curvas de secagem e de concentração de óleo no material durante o tempo de fritura.

#### 4.3.1- Planejamento experimental I (P I)

Este planejamento consistiu de 11 experimentos, sendo 8 deles a combinação  $2^3$  de três variáveis (tempo de fritura, massa inicial do lodo e temperatura do óleo) em dois níveis; os outros três experimentos foram referentes à triplicata dos pontos médios das variáveis escolhidas. O procedimento está melhor descrito nos itens 3.2.2.1 e 3.5.3.

Cada ensaio representou a fritura de um cilindro sob as condições impostas pelo planejamento. Estas condições e as respostas obtidas podem ser vistas na Tabela 4.5.

Nota-se que a temperatura apresentou uma grande variabilidade (Tabela 4.5). Isto porque o equipamento não permitia um ajuste muito preciso. A temperatura foi monitorada através de termopares calibrados previamente.

Tabela 4.5: Condições experimentais do Planejamento I e respostas (\*\*)

| <i>Ensaio</i> | <i>t<sub>f</sub></i> (s) | <i>M</i> inicial de lodo (g) | <i>T</i> óleo (°C) | <i>X</i> <sub>abu</sub> ** | <i>X</i> <sub>obu</sub> ** | <i>X</i> <sub>abs</sub> ** | <i>X</i> <sub>obs</sub> ** |
|---------------|--------------------------|------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1             | 300                      | 45,2                         | 127                | 0,69                       | 0,08                       | 3,06                       | 0,37                       |
| 2             | 900                      | 41,1                         | 125                | 0,18                       | 0,23                       | 0,31                       | 0,40                       |
| 3             | 300                      | 92,1                         | 131                | 0,64                       | 0,10                       | 2,44                       | 0,37                       |
| 4             | 900                      | 92,4                         | 126                | 0,38                       | 0,16                       | 0,83                       | 0,35                       |
| 5             | 300                      | 48,2                         | 164                | 0,34                       | 0,19                       | 0,72                       | 0,39                       |
| 6             | 900                      | 43,5                         | 171                | 0,00                       | 0,28                       | 0,00                       | 0,39                       |
| 7             | 300                      | 91,8                         | 167                | 0,33                       | 0,19                       | 0,69                       | 0,40                       |
| 8             | 900                      | 92,4                         | 169                | 0,00                       | 0,24                       | 0,00                       | 0,32                       |
| PC1           | 600                      | 69,9                         | 145                | 0,16                       | 0,24                       | 0,26                       | 0,39                       |
| PC2           | 600                      | 66,2                         | 146                | 0,15                       | 0,27                       | 0,26                       | 0,46                       |
| PC3           | 600                      | 66,5                         | 143                | 0,20                       | 0,22                       | 0,35                       | 0,39                       |

As Figuras 4.34 e 4.35 apresentam diagramas de Pareto. Nestes gráficos pode-se verificar o efeito das variáveis do planejamento nos níveis escolhidos. Estes efeitos são dependentes da variável resposta escolhida para a análise.

Percebe-se que, para a variável resposta  $X_{abs}$ , as variáveis independentes que possuem um efeito significativo são o tempo de fritura (A) e a temperatura do banho do óleo (C) (Figura 4.34). Isto pode ser visto no gráfico através das variáveis que tem valores absolutos maiores que a linha vermelha pontilhada, que indica um nível de significância maior que 95%.

Da mesma maneira na Figura 4.35, vê-se que nenhum dos fatores A, B ou C, ou mesmo nenhuma combinação entre eles tem influência na incorporação de óleo, considerando-se os níveis escolhidos.

O efeito negativo do tempo e da temperatura na umidade foi um resultado esperado, pois quanto maior o tempo de fritura e a temperatura do banho de óleo, menor será o valor de umidade do material. O fato de que estes fatores não pareceram influenciar a

incorporação de óleo não é determinante. É preciso explorar outras faixas de trabalho, como por exemplo, outros tempos de fritura e temperaturas mais controlados.

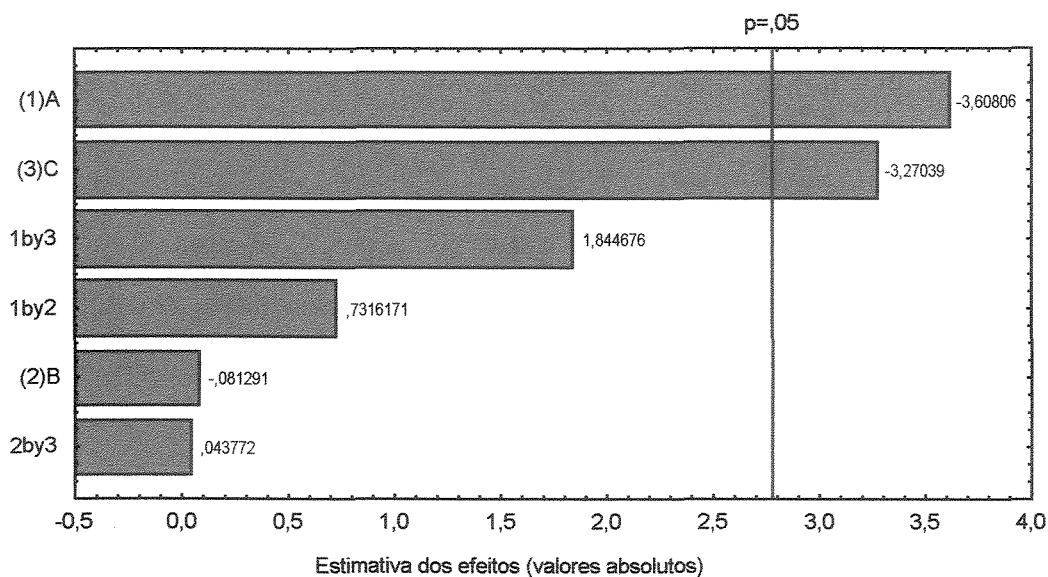


Figura 4.34: Estimativa de efeitos das variáveis e suas combinações sobre a resposta umidade,  $X_{obs}$  (A = tempo de fritura, B = massa de lodo e C = temperatura do óleo)

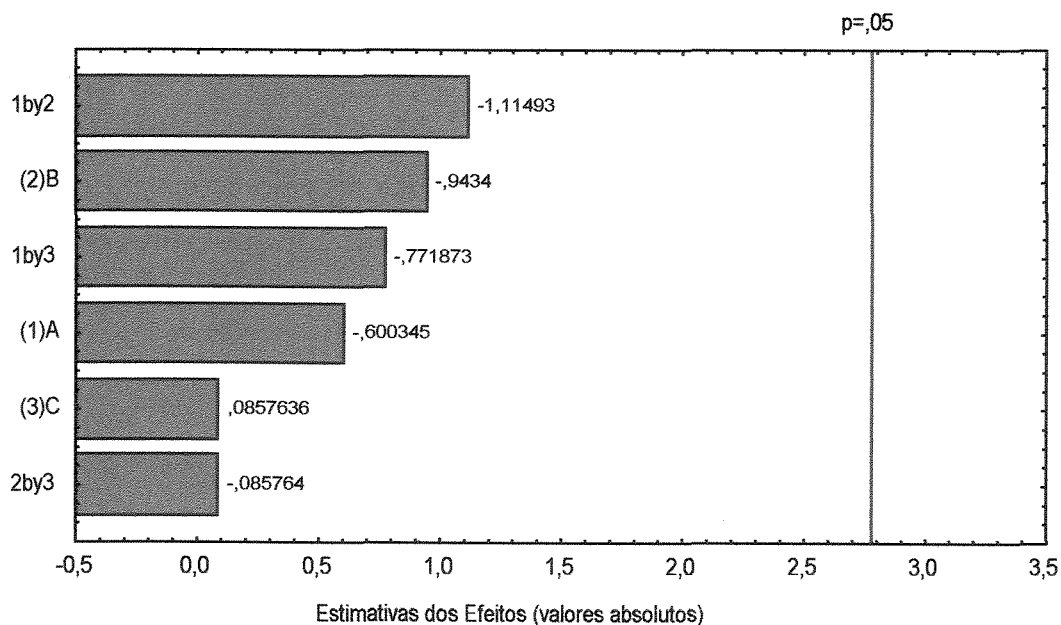


Figura 4.35: Estimativa de efeitos das variáveis e suas combinações sobre a resposta fração de óleo,  $X_{obs}$  (A = tempo de fritura, B = massa de lodo e C = temperatura do óleo)

O fator B, ou massa de lodo, não apresentou efeito significativo nem sobre a fração de óleo nem sobre a umidade do material. Esperava-se que a massa de material introduzida influenciasse o processo de fritura. Há dois motivos prováveis e talvez concomitantes. O primeiro diz respeito à quantidade de material. Uma massa grande teria um maior efeito, contudo o nível superior de massa (aproximadamente 95g) não provocou um distúrbio no banho de óleo (diminuindo sua temperatura por exemplo) que pudesse afetar a secagem.

Outro motivo é que para o nível inferior, foi usado um cilindro de lodo e para o nível superior, dois cilindros de mesmas dimensões que o primeiro para obtenção do dobro da massa. Conclui-se, então que o fator importante seria o tamanho e forma de cada cilindro e não a soma de suas massas.

Os resultados mostrados na Tabela 4.5 podem ser visualizados através de superfícies de resposta. As Figuras C1 a C8 do Anexo C mostram as superfícies obtidas analisando a combinação de duas variáveis por vez (t, m e T - tempo, massa e temperatura, respectivamente) em gráficos tridimensionais onde a ordenada Z é a resposta do sistema.

Nas Figuras 4.36 e 4.37 pode-se ver a superfície de resposta para a umidade em base úmida. Na escala cromática dos gráficos, o vermelho representa o maior valor da resposta e o verde o menor, sendo que os eixos estão na escala -1 (nível inferior) e +1 (nível superior). Assim, o gráfico tridimensional mostra região onde se encontram os valores desejados. Na Figura 4.36, vê-se que a região que apresenta menores valores de  $X_{abu}$  tem valores maiores de tempo de fritura, contudo no eixo de massa a diferença é muito pequena.

A influência da temperatura do óleo pode ser visualizada na Figura 4.37. A região onde se encontram os menores valores de umidade (região verde do gráfico) é referente aos maiores valores de temperatura e de tempo de permanência no óleo.

Considera-se importante a relação entre o conteúdo de umidade e o conteúdo de óleo, que foi verificado nas outras fases do trabalho (Figuras 4.5 e 4.21).

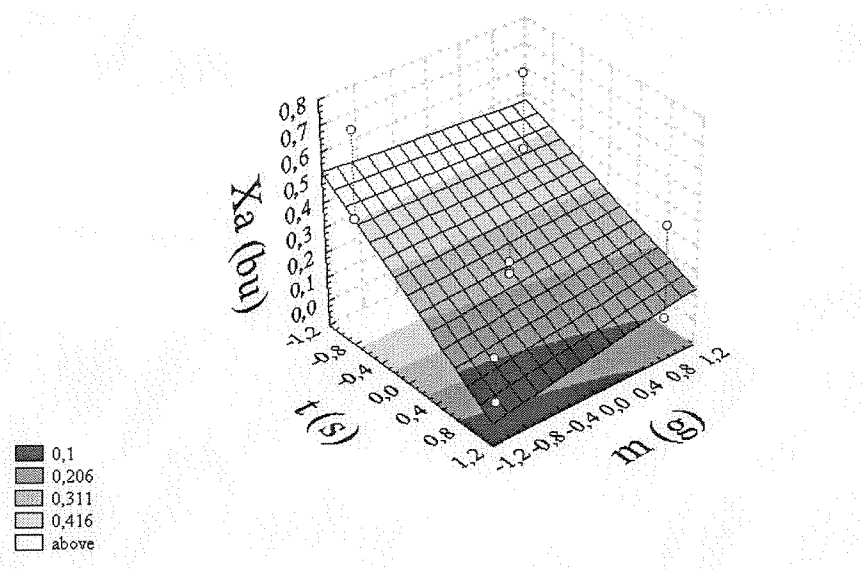


Figura 4.36: Superfície de resposta para o conteúdo de umidade,  $X_a$  (bu). Efeito do tempo de fritura ( $t$ ) e da massa de lodo ( $m$ )

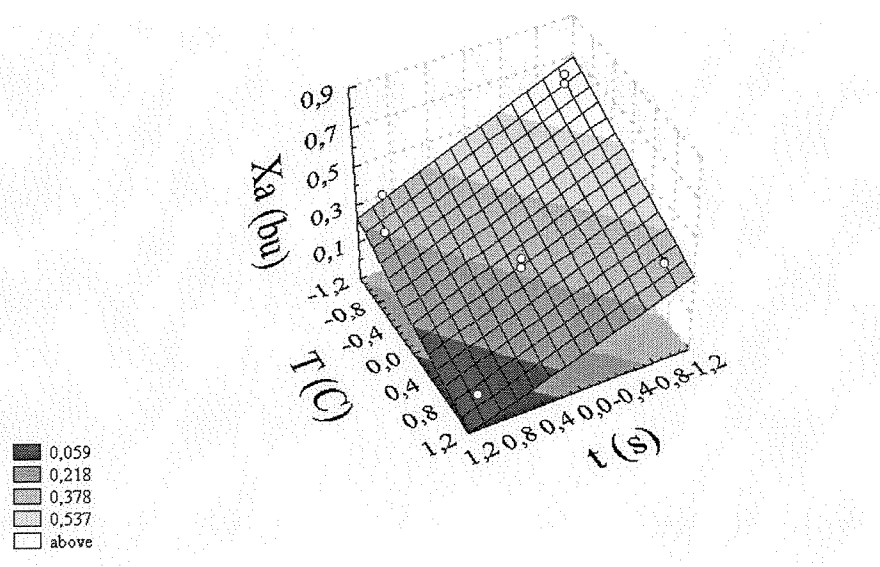


Figura 4.37: Superfície de resposta para o conteúdo de umidade,  $X_a$  (bu). Efeito da temperatura do óleo ( $T$ ) e do tempo de fritura ( $t$ )

No caso dos experimentos realizados no planejamento I, a relação entre  $X_{abu}$  e  $X_{obu}$  mantém-se linear e inversamente proporcional, como pode ser visto na Figura 4.38.

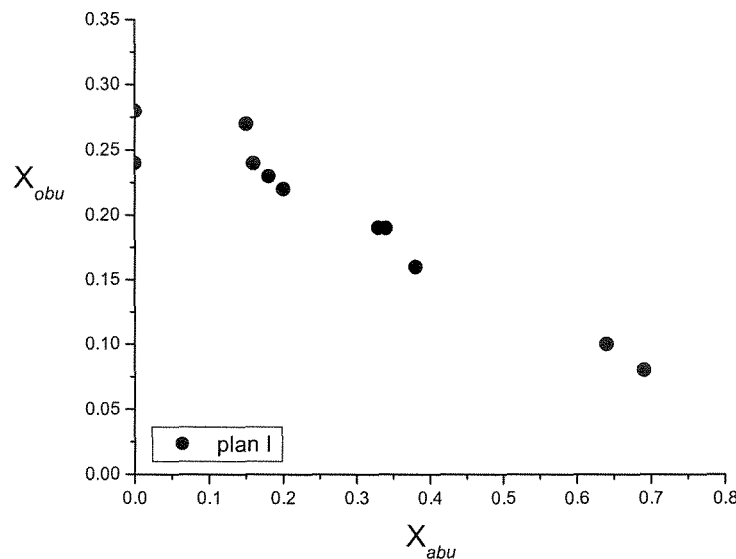


Figura 4.38: Relação entre a quantidade de umidade e a quantidade de óleo no material frito.

Este resultado está de acordo com os resultados obtidos para a fritura de madeira (Fig. 4.5, item 5.1.1) e também para o lodo de Mauberges (Fig. 4.21, item 4.2.2.2).

A repetição do padrão deste comportamento, independente do tipo de material, corrobora a teoria de Gamble et al (1987). Segundo Gamble et al (1987), o óleo incorpora-se ao produto durante o processo de fritura à medida que a água é evaporada. Quando o vapor d'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.

#### 4.3.2- Planejamento experimental II (P II)

Este planejamento consistiu na realização de 8 ensaios ( $2^3$ ), sendo que foram escolhidas variáveis diferentes daquelas usadas no planejamento anterior, como tamanho do material e tipo de óleo usado. Manteve-se a temperatura do óleo como variável

material e tipo de óleo usado. Manteve-se a temperatura do óleo como variável independente por ser uma importante condição de processo. Estas variáveis bem como os níveis analisados podem ser vistas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Condições experimentais do Planejamento II

| <i>Ensaio</i> | <i>T<sub>óleo</sub> (°C)</i> | <i>Diâmetro do cilindro (cm)</i> | <i>Tipo de óleo</i> |
|---------------|------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1             | 193,3                        | 2,0                              | Usado               |
| 2             | 214,6                        | 2,0                              | Usado               |
| 3             | 167,8                        | 2,6                              | Usado               |
| 4             | 210,8                        | 2,6                              | Usado               |
| 5             | 193,2                        | 2,0                              | Novo                |
| 6             | 213,2                        | 2,0                              | Novo                |
| 7             | 193,3                        | 2,6                              | Novo                |
| 8             | 213,9                        | 2,6                              | Novo                |

Foram realizados 105 experimentos na execução do planejamento (descrição da metodologia no item 3.5.3). Cada ensaio foi gerado com a realização de pelo menos 12 experimentos, a fim de obter as curvas de secagem do lodo de esgoto sob condições diferentes. As curvas de secagem obtidas em todos os ensaios podem ser vistas no Anexo C.

Este procedimento trabalhoso não permitiu a realização de duplicatas, especialmente devido à falta de tempo. Experimentos com o ponto central (valores médios das variáveis escolhidas) também não puderam ser realizados devido às dificuldades de obtenção dos próprios valores médios, tanto do diâmetro do material quanto do tipo de óleo.

Os primeiros resultados deste planejamento podem ser vistos nas Figuras C9 a C12 (Anexo C). Estas são curvas de variação de umidade (em base úmida,  $X_{abu}$ ) em função do tempo de fritura. As Figuras C13 a C16 também apresentam as curvas de umidade versus o tempo de fritura, só que em base seca\* ( $X_{abs}^*$ ), ou seja, a base de cálculo desta umidade não é somente a massa seca dos sólidos mas a massa de sólidos secos mais a massa de óleo

incorporada. A Figura 4.39 apresenta um exemplo dos tipos de curvas mencionados para o ensaio 8 (condições na Tabela 4.6).

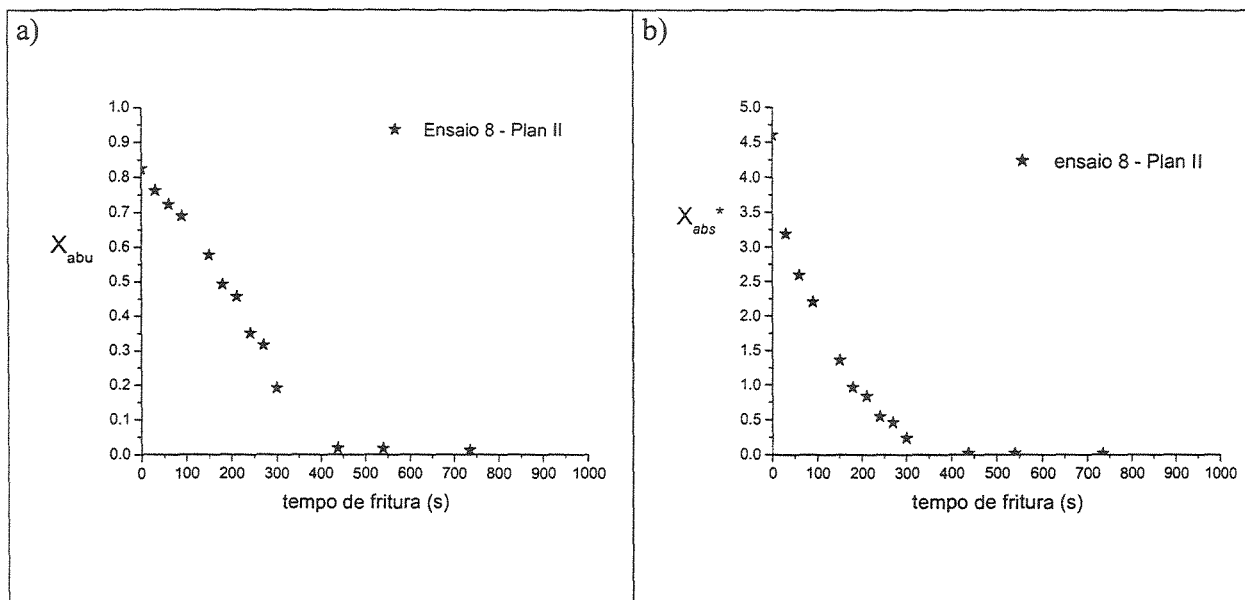


Figura 4.39: Curva de secagem obtida no ensaio 8, a)  $X_{abu}$  vs  $t$ , b)  $X_{abs}^*$  vs  $t$

As curvas de secagem obtidas nas diferentes condições apresentaram um perfil semelhante, onde se identifica uma secagem rápida inicialmente, e após um certo tempo de processo, a taxa de secagem passa a diminuir, não sendo mais linear. Os resultados obtidos nesta fase corroboram os resultados obtidos nas outras deste trabalho (itens 4.1 e 4.2), que obtiveram resultados semelhantes para lodos de origem diferentes.

A obtenção da quantidade de óleo incorporada ao material durante a fritura foi feita através da metodologia de extração com solvente em aparelho Soxhlet (item 3.2.4)). Além de ser um parâmetro importante, a quantidade de óleo presente permite o cálculo das curvas de secagem em base seca, ou seja, calculada em função da massa de sólidos secos. A Figura 4.40 mostra curvas obtidas de incorporação de óleo ao lodo de esgoto ao longo da fritura para os quatro ensaios.



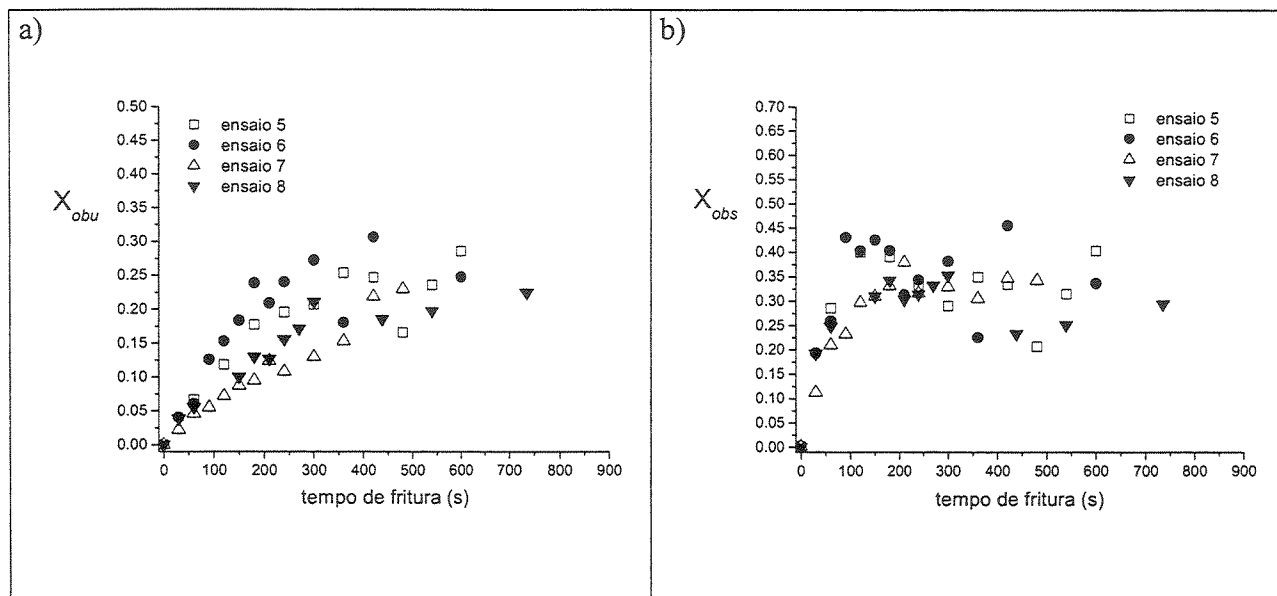


Figura 4.40: Variação do conteúdo de óleo em função do tempo de fritura para os ensaios com óleo novo. a)  $X_{obu}$  e b)  $X_{obs}$

As Figuras C17 e C18 (Anexo C) mostram os resultados de curvas de secagem em base seca ( $X_{abs}$ ) para quatro dos oito ensaios. Estes resultados foram obtidos para os ensaios em que se usou o óleo novo (ensaio 5, 6, 7 e 8) pois a metodologia de quantificação de óleo não foi bem sucedida nos ensaios com o óleo usado. A técnica usada é um método oficial de determinação de conteúdo de gorduras em materiais. Como o óleo usado é, além de óleo, uma mistura muito grande de compostos de degradação, o experimento passa a ser não representativo (teores de óleo menores que 10%).

Para efeito de comparação, foram preparadas as curvas apresentadas nas Figuras 4.41 e 4.42. São curvas de perda de umidade em função do tempo para os quatro ensaios nas duas bases diferentes,  $X_{abs}$  e  $X_{abs}^*$ .

Nota-se que as curvas são bastante próximas. Isto provavelmente se deve ao fato da quantidade de óleo incorporado ser relativamente pequena e não ultrapassa 40% (Figura 4.40).

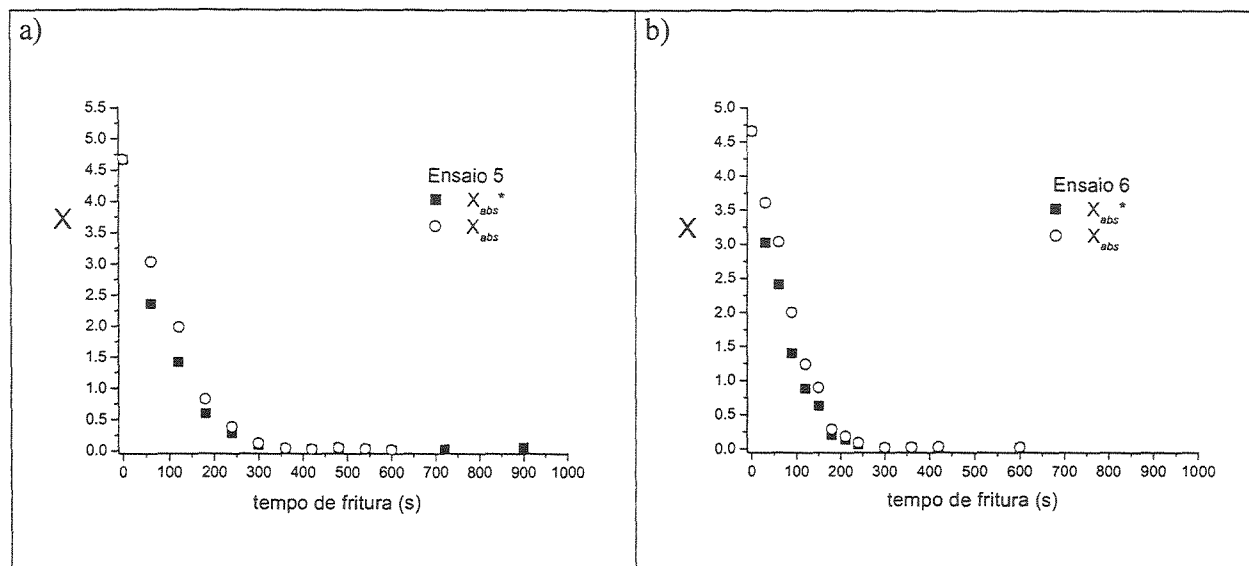


Figura 4.41: Comparação entre  $X_{abs}$  e  $X_{abs}^*$  para os ensaios onde o conteúdo de óleo pode ser determinado. a) ensaio 5 e b) ensaio 6.

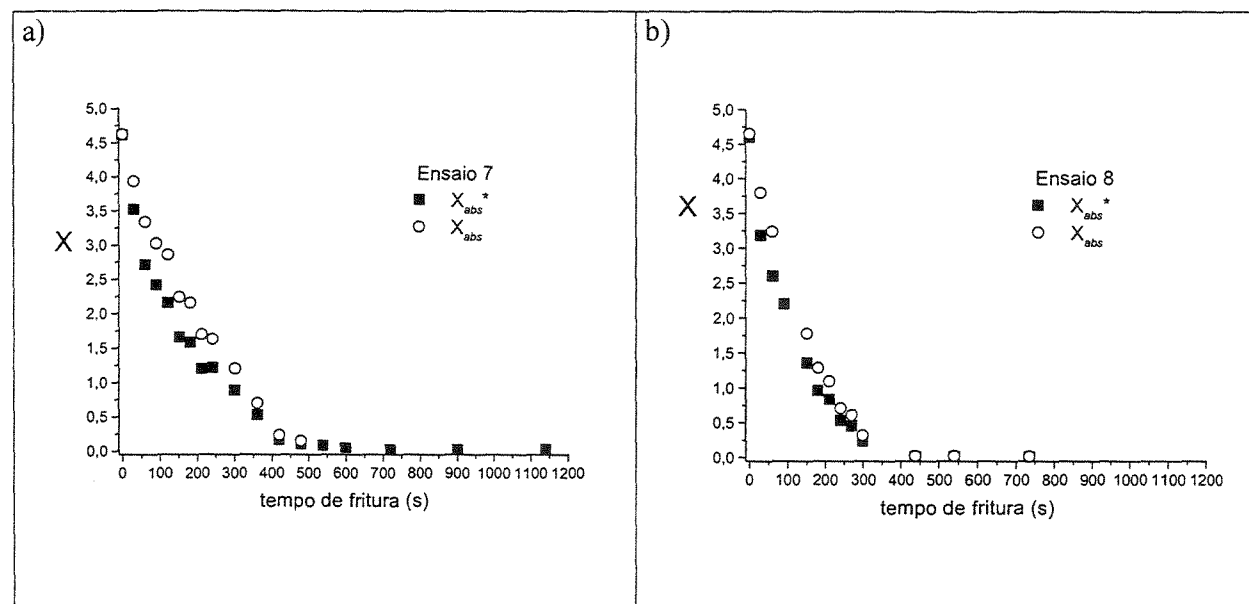


Figura 4.42: Comparação entre  $X_{abs}$  e  $X_{abs}^*$  para os ensaios onde o conteúdo de óleo pode ser determinado. a) ensaio 7 e b) ensaio 8

#### 4.3.2.1- Efeito do tipo de óleo usado para a fritura

Os meios de fritura usados foram gordura de palma (fornecido direto pelo fabricante) e óleo de soja (descarte de um restaurante). O resultado observado nas curvas de secagem implica que o tipo de óleo utilizado como meio de fritura não influencia na taxa de secagem. Na Figura 4.43 tem-se um exemplo de que não há diferença entre as curvas obtidas com óleos diferentes. O mesmo acontece para as outras condições de temperatura de processo e tamanho do material (Fig. C19 a C22).

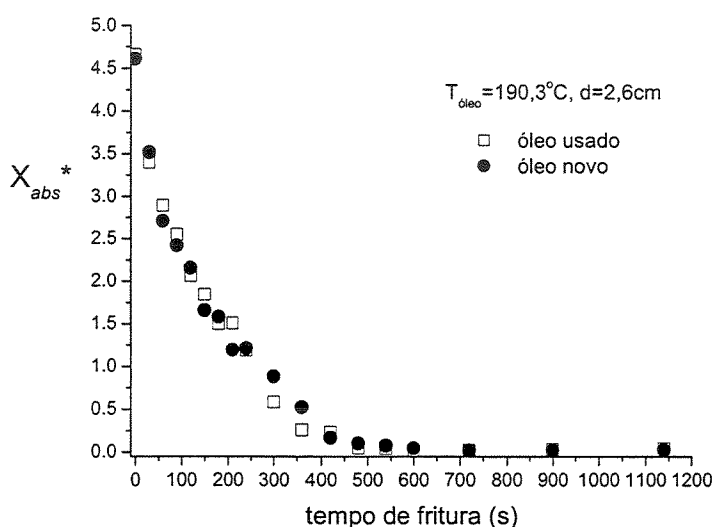


Figura 4.43: Efeito do tipo de óleo na curva de secagem par a fritura de lodo.

#### 4.3.2.2- Efeito da temperatura do óleo (meio de fritura)

A temperatura do meio secante é um parâmetro importante num processo de secagem. Neste caso, trata-se da temperatura do banho de óleo. Durante a execução dos experimentos, a manutenção da temperatura foi relativamente difícil devido ao controle de temperatura ineficiente do próprio fritador.

Foram escolhidos os níveis de temperatura 170 e 200°C, porém os resultados médios obtidos nos ensaios variaram entre 168 e 214,6°C (Tabela 4.6).

A Figura 4.44 apresenta curvas de secagem obtidas durante a fritura de lodo a temperaturas diferentes. O efeito, ou diferença entre as curvas, não foi muito grande, neste intervalo de temperaturas.

Percebe-se que para um cilindro de lodo de tamanho maior, o efeito é mais pronunciado. Contudo, mesmo quando a diferença de temperatura é maior (Figura 4.45) as curvas continuam sendo bastante próximas, a umidade final foi a mesma e a principal mudança verificada foi no tempo para atingir a umidade crítica, que é normal.

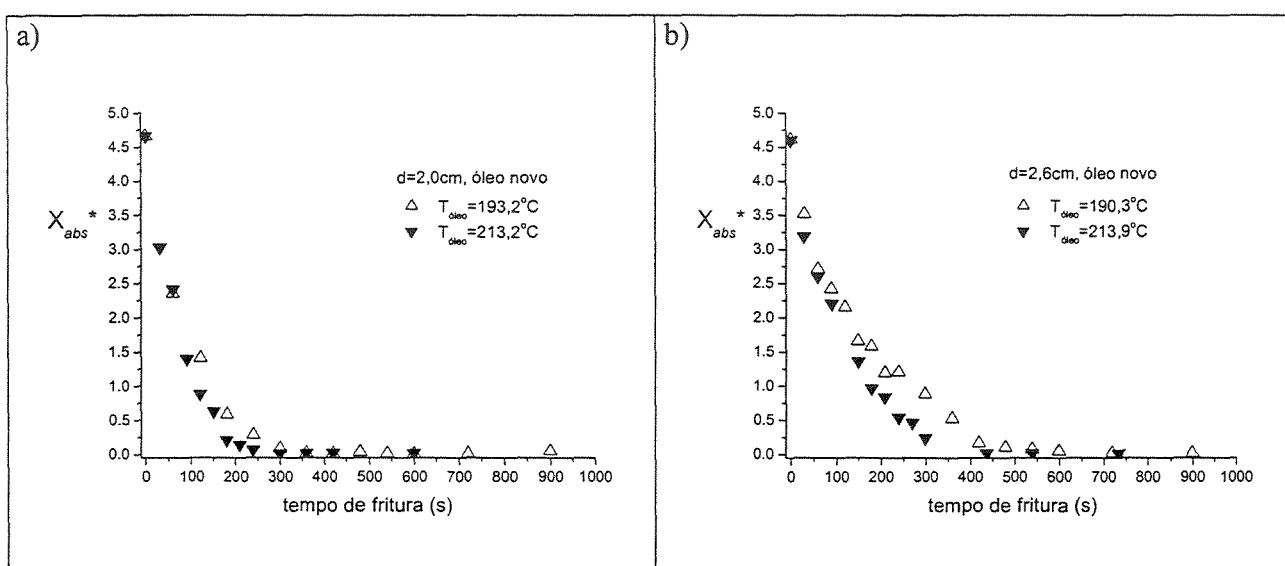


Figura 4.44: Efeito da temperatura do óleo na curva de secagem. a)  $d=2.0\text{cm}$ ,  $\Delta T=20.0^{\circ}\text{C}$  e  
b)  $d=2.6\text{cm}$ ,  $\Delta T=23.6^{\circ}\text{C}$

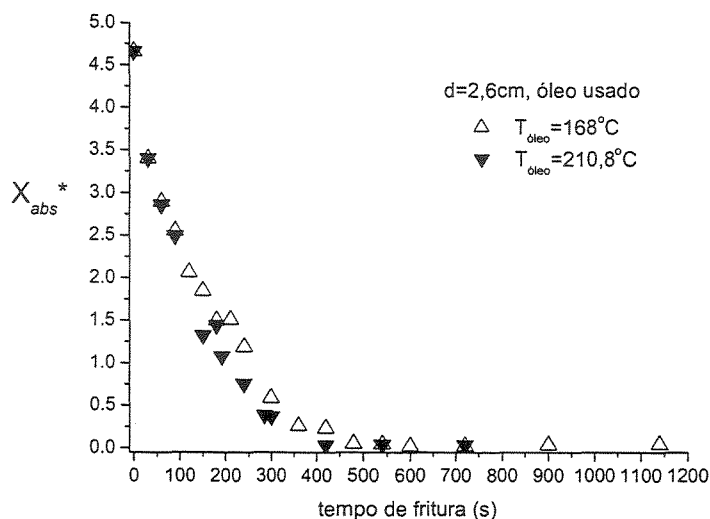


Figura 4.45: Efeito da temperatura na fritura do lodo.  $\Delta T = 42,8^{\circ}\text{C}$

#### 4.3.2.3- Efeito do diâmetro do cilindro de lodo

Um tamanho maior do cilindro significa uma área de transferência de massa maior, o que levaria a uma taxa de secagem maior pois esta é diretamente proporcional à área. Na Figura 4.46 pode-se ver que o tamanho do material apresentou influência na sua taxa de secagem.

Os resultados obtidos até agora indicam que grande parte da umidade presente no lodo é água que está de alguma forma ligada ao material sólido. A água livre é perdida nos primeiros segundos de processo, quando a taxa de secagem é rápida e linear. Após um certo tempo de processo, que depende muito das condições de operação e das características do material, esta taxa começa a decrescer, pois atinge-se a fase em que é a umidade mais interna que evapora

Na Figura 4.46b pode-se ver que até 60 segundos de secagem (aproximadamente) as duas curvas são muito próximas, indicando um período onde a transferência de calor e massa é regida pela convecção, ou seja, pelas condições de operação. Após este período, o tamanho do material exerce uma sensível diferença na taxa de secagem, indicando que o

mecanismo de perda de umidade durante a maior parte do processo seja a difusão do vapor através da estrutura do sólido.

O cilindro de diâmetro maior seca mais lentamente. Tomando-se em consideração que a diferença de massa dos cilindros não tem influência significativa (resultado do planejamento I), acredita-se que o raio do cilindro seja o fator mais influente, pois num cilindro grande, o caminho que a umidade tem de percorrer é maior.

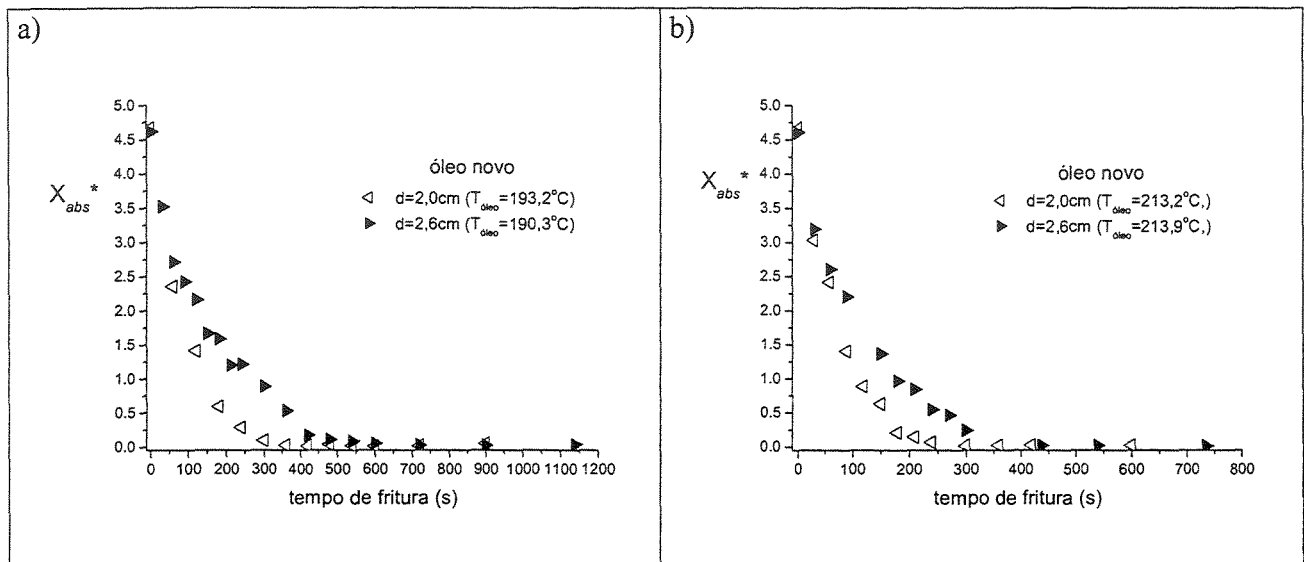


Figura 4.46: Efeito do diâmetro do cilindro na curva de secagem para fritura de lodo.

a)  $T$  = nível inferior e b)  $T$  = nível superior

#### 4.3.2.4- Relação entre conteúdo de óleo e conteúdo de umidade no material frito.

O óleo incorpora-se ao material que está sendo frito à medida que este perde a água. Na indústria alimentícia, estes são parâmetros muito importantes devido a fatores como sabor, textura, e nutrição.

Neste trabalho, estes parâmetros também foram considerados importantes. A obtenção de uma relação entre a variação de água e de óleo durante o processo pode ser de grande utilidade, ajudando no controle do processo, pois a determinação da quantidade de umidade é mais fácil de se obter do que da quantidade de óleo.

As Figuras 4.47 a 4.49 mostram a relação da água com o óleo durante a fritura do lodo para as condições de processo do planejamento II.

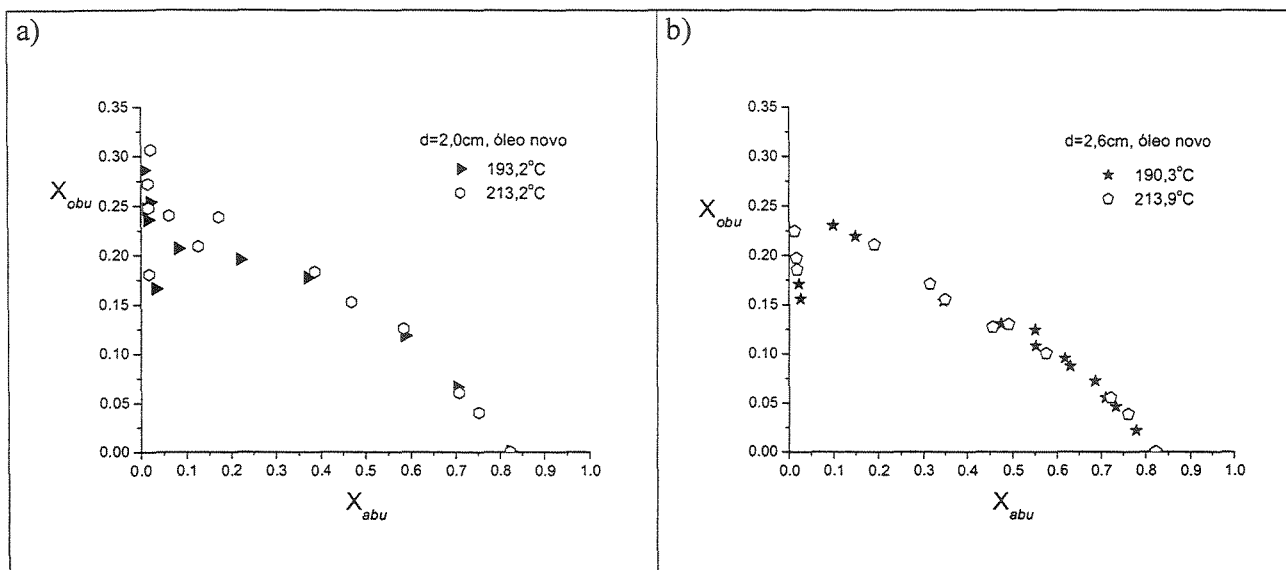


Figura 4.47: Relação da perda de água com o aumento de concentração de óleo no lodo frito. Efeito da temperatura. a)  $d=2,0\text{cm}$  e b)  $2,6\text{cm}$ .

As curvas são apresentadas de forma a comparar-se a diferença de temperatura e de diâmetro. Em todos os casos pode-se ver que, para valores de umidade menores que 10%, os parâmetros  $X_{abu}$  e  $X_{obu}$  não seguem mais uma função.

Nos dois casos analisados, a temperatura não demonstrou influência nos resultados (Fig. 4.47). Os dados obtidos nesta fase do trabalho, tanto quanto os da fase realizada em Albi, concorda em parte com o resultado encontrado por Gamble et al (1987) (Figura 4.6). Apesar da relação entre a umidade e a fração de óleo no material frito permanecerem diretamente proporcionais, os resultados obtidos neste trabalho tendem a ter uma relação não linear, diferentemente da correlação linear apresentada por Gamble.

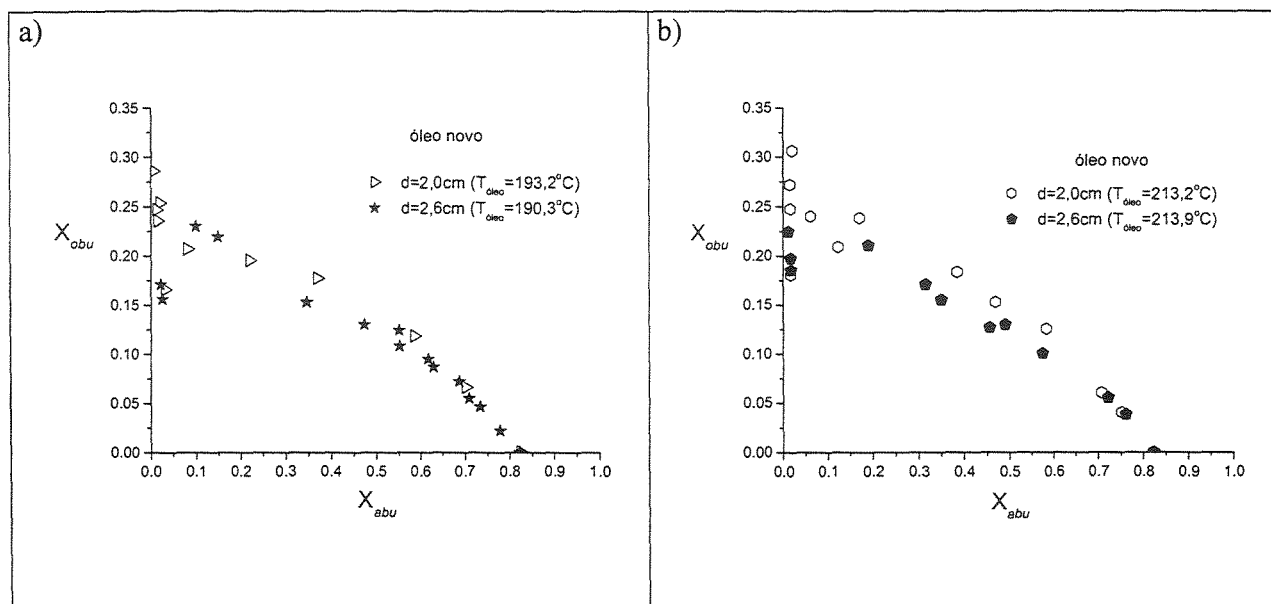


Figura 4.48: Relação da perda de água com o aumento de concentração de óleo no lodo frito.

Efeito do diâmetro do cilindro de lodo. a)  $T$ =nível inferior e b)  $T$ =nível superior

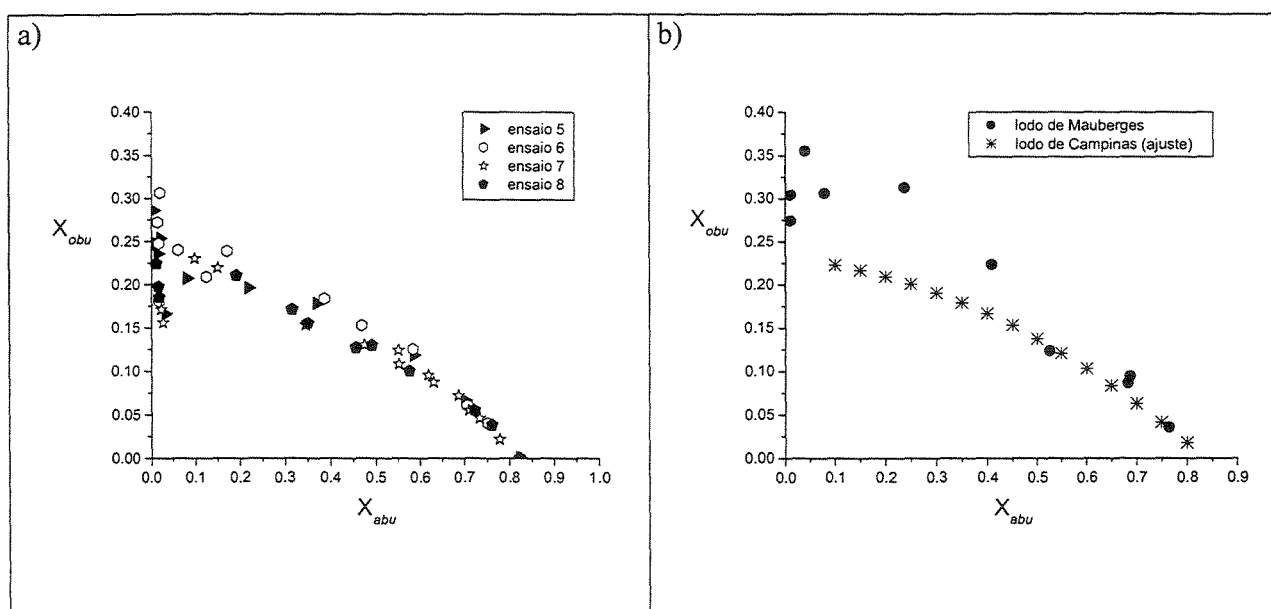


Figura 4.49: Relação da perda de água com o aumento de concentração de óleo no lodo frito.

a) plan II e b) ajuste do plan II e resultado de Albi

O diâmetro diferente provoca um ligeiro desvio em relação às curvas mostradas na Figura 4.48. Como as quatro curvas são bastante próximas (Figura 4.49a), estas foram ajustadas separadamente através de um software gráfico (Origin 6.0) e somadas para a



obtenção de uma curva média. A Figura 4.49b compara este resultado com os valores obtidos para o lodo de Mauberges (item 4.2).

Existe entre estas curvas uma diferença bastante grande, que é o lodo diferente. Nos experimentos que aconteceram em Albi, foi usado o lodo da ETE de Mauberges e nos experimentos que foram realizados na Unicamp, foi usado o lodo da ETE de Campinas.

Sabe-se que o lodo, além de ter uma constituição bastante complexa, pode variar muito de uma estação de tratamento para outra, de acordo com o tratamento ao qual é submetido. Portanto, este resultado mostra que as curvas têm inclinações diferentes por serem produtos da fritura de materiais de composições diversas, cujas diferentes estruturas sólidas fornece taxas de remoção de água diferentes. Ainda assim, mantém-se a relação inversamente proporcional entre a remoção de água e a incorporação de óleo .

#### 4.3.2.5- Determinação do calor de combustão do lodo frito e de sua porcentagem de cinzas

Foram realizados alguns experimentos para análise do produto final em uma bomba calorífica com o intuito de obter o valor energético do lodo de esgoto da ETE de Campinas frito. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Variação do calor de combustão do lodo frito e da porcentagem de cinzas em função do tempo de fritura

| <i>Tempo (s)</i> | <i>Calor de combustão (MJ/kg)</i> | <i>% cinzas</i> |
|------------------|-----------------------------------|-----------------|
| 0*               | 15,51                             | 28,03           |
| 360              | 20,79                             | 19,30           |
| 420              | 24,52                             | 18,11           |
| 540              | 21,99                             | 20,64           |
| 720              | 20,62                             | 20,21           |
| 855              | 24,17                             | 20,07           |
| 900              | 23,82                             | 15,93           |

\*lodo seco em forno, sem contato com o óleo

O tempo “zero” no início da tabela refere-se ao material que não foi frito, mas seco em estufa (ar quente) e do qual foi removida toda a umidade.

Há um significativo aumento de 55% no valor energético do lodo quando comparado o valor do lodo seco a ar com o valor energético do lodo frito por 14 minutos. Este aumento pode ser visto na Figura 4.50a.

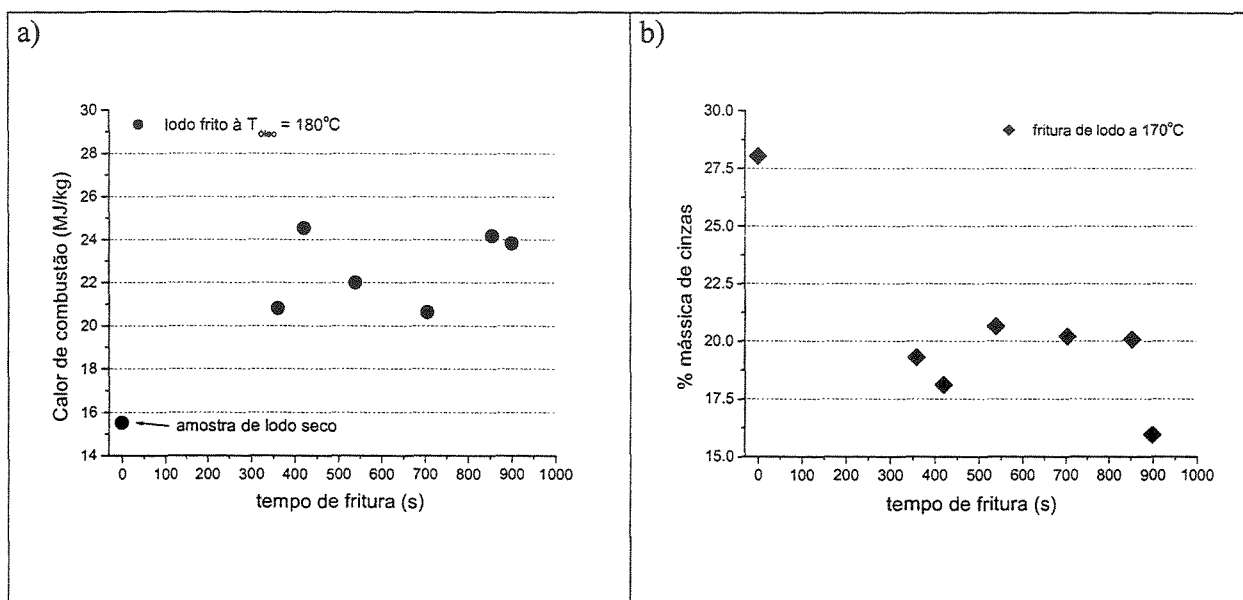


Figura 4.50: Calor de combustão (PCS) (a) e porcentagem de cinzas (b) do lodo frito em função do tempo de fritura.

Outro parâmetro que faz diferença na qualidade de um combustível é a quantidade de cinzas que sobram após sua queima. Os resultados obtidos mostram que a porcentagem de cinzas diminui com a fritura do material (Figura 4.50b). Isto se deve, provavelmente, à aderência do óleo ao material, o que melhora a performance da reação de combustão.

Na Figura 4.51 pode-se ver os resultados de calor de combustão encontrados ao longo deste trabalho para os lodos das diferentes cidades. Vê-se em todos os casos que existe um aumento do poder calorífico do material ao secá-lo através da fritura, e independentemente de seu valor calórico inicial, os materiais tendem a atingir um valor em torno de 23 a 24 MJ/kg.

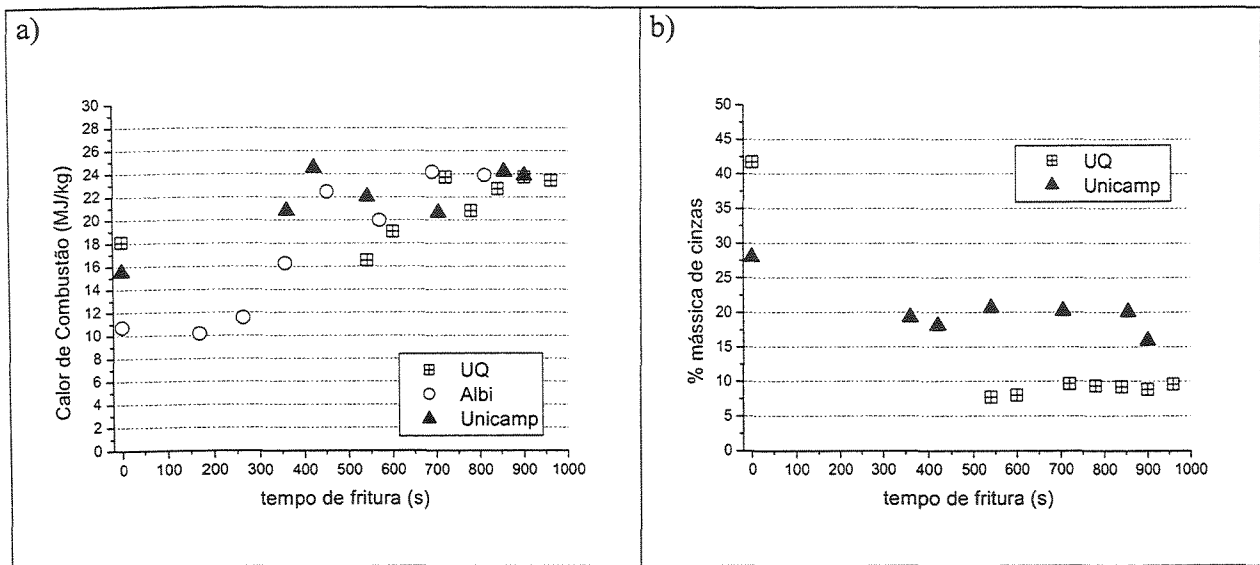


Figura 4.51: Calor de combustão (PCS) (a) e porcentagem de cinzas (b) do lodo frito em função do tempo de fritura. Comparação entre os resultados obtidos nas três fases do trabalho.

A Tabela 4.8 mostra valores de calor de combustão de algumas biomassas, lodos, combustíveis e óleo encontrados na literatura. É importante observar que os valores de calor de combustão para o lodo frito são maiores que os apresentados para lodos de diferentes origens, e além disto são similares aos valores encontrados para combustíveis como madeira.

Estes resultados demonstram que o lodo frito apresenta um potencial considerável para utilização como um biocombustível por possuir alto valor energético e produzir uma menor quantidade de cinzas durante sua combustão.

Tabela 4.8: Valores energéticos encontrados em literatura de biomassas e óleos.

| Autor                    | Material                 | Calor de Combustão<br>(MJ/kg) |
|--------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| Zanoni e Mueller (1982)  | Lodo Primário Digerido   | 14,96                         |
|                          | Lodo biológico           | 13,50                         |
|                          | Lodo Digerido            | 11,35                         |
| Ogada e Werther (1996)   | Lodo úmido s/ tratamento | 1,098                         |
| Vesilind e Ramsey (1996) | Lodo                     | 3,9-12,5                      |
| Brouillete et al. (1998) | Lodo de fábrica de papel | 4,0-20,0                      |
| Silva et al. (1998)      | Bagaço de cana de açúcar | 18,0-19,5                     |
|                          | Madeira                  | 23,0                          |
|                          | Borra de café            | 24,9                          |
| Lang et al. (2001)       | Óleo de canola           | 39,51                         |
|                          | Óleo de girassol         | 39,46                         |
| Dermibas (2001)          | Madeira verde            | 8,0                           |
|                          | Resíduos de colheitas    | 20,0                          |
|                          | Metano                   | 55,0                          |
|                          | Carvão                   | 27,0                          |

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 – Conclusões

Este trabalho teve o objetivo de estudar a aplicação da fritura de imersão como técnica de secagem de lodo de esgoto. É um trabalho singular e pioneiro, pois até o momento não se encontraram publicações a respeito.

Foram realizados ensaios de fritura de alguns materiais, como madeira, levedura de padaria e purê de batata numa fase preliminar. Estes materiais foram secos através do processo de fritura e através das curvas de secagem obtidas pode-se visualizar o comportamento dos diferentes materiais durante a fritura e, também, os tipos de umidade presente nos mesmos.

Foi verificada a incorporação de óleo à estrutura sólida do material e a quantidade de óleo é proporcional à quantidade de água evaporada. Este comportamento foi percebido tanto na fritura de madeira quanto na fritura das amostras de lodo de origem diferente.

A fritura do lodo de esgoto foi realizada nas três fases do trabalho (três universidades), utilizando lodos provenientes de estações de tratamento de esgoto diferentes. Ainda assim, foi possível encontrar comportamentos similares em relação ao processo de secagem.

Através das curvas de secagem pode-se verificar a existência de diferentes tipos de umidade presentes no lodo, como umidade livre, intersticial.

Foram estudados diferentes geometrias e tamanhos em que o lodo poderia ser frito e verificou-se que a massa do material não influi na sua taxa de secagem quanto a geometria do mesmo, dentro das faixas de massa e tamanho estudados. Verificou-se que a forma cilíndrica tem

uma taxa de secagem maior que um material sem forma geométrica específica, considerando-se uma mesma quantidade de massa inicial de lodo.

No caso do lodo de esgoto frito na Unicamp, foi possível o acompanhamento da evolução da quantidade de óleo incorporada ao óleo durante o experimento de fritura. O lodo tem uma quantidade inicial bastante pequena (0,18% em massa) e esta passa a ser cerca de 30-40% da massa de sólidos secos após um certo tempo de processo (menos de 200 segundos), sendo que, após atingir este valor, a concentração tende a manter-se a mesma após atingir um valor de equilíbrio.

Como aconteceu no processo de fritura da madeira e como já é conhecido na literatura para o caso da fritura de batatas, verificou-se uma relação entre a variação da umidade do lodo e a variação da quantidade de óleo incorporada ao material durante o processo. A quantidade de óleo é inversamente proporcional à umidade do material, pois teoricamente o óleo encontra espaço para penetrar na estrutura sólida do produto através das fissuras e danos causados pela saída do vapor d'água da superfície do material.

Utilizou-se dois tipos de óleo diferentes na fase realizada na Unicamp e verificou-se que o meio de fritura não produziu efeito significativo na taxa de secagem do lodo, sendo a mesma mais dependente do tamanho do cilindro de lodo processado e da temperatura do óleo.

Outra propriedade importante determinada foi o valor energético do material, através de seu poder calorífico superior (PCS). Foi possível realizar a determinação do PCS para os diferentes tipos de lodos utilizados e avaliar o aumento desta propriedade no decorrer do processo de fritura, especialmente devido à perda de umidade e à incorporação de óleo.

O aumento do poder calorífico com o tempo de processo foi de 133% para o caso do lodo estudado na UQ, 150% para o lodo da Unicamp e 240% para o lodo da Ecole des Mines; aumento calculado em relação ao respectivo lodo seco em estufa, sem contato com óleo.

Após 800 segundos de processo, encontrou-se um valor de calor de combustão por volta de 24MJ/kg de material. Este valor energético é comparável ao valor energético de outros

materiais também usados como combustível, como madeira (23MJ/kg) ou bagaço de cana de açúcar (18-19,5 MJ/kg).

Estes resultados demonstram que o lodo frito apresenta um potencial considerável para sua utilização como um biocombustível por possuir alto valor energético e produzir uma menor quantidade de cinzas durante sua combustão.

Conclui-se que, de acordo com os parâmetros estudados, a secagem de lodo de esgoto através da tecnologia de fritura é possível e fornece um produto que tem um valor energético maior, e potencial de utilização mais interessante que o lodo úmido e que o lodo seco por processos convencionais de secagem.

## **5.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros**

Sugere-se os seguintes tópicos par a continuação do trabalho:

- Processamento dos dados de temperatura de óleo;
- Análise energética do processo de fritura;
- Comparação do gasto energético durante o processo de secagem de lodo por fritura com o processo de secagem convencional a ar;
- Análise dos produtos gasosos produzidos durante a fritura do lodo;
- Análise dos compostos liberados no meio de fritura (óleo) quando da fritura de lodo de esgoto.

## CAPÍTULO 6

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATEBA, P. , MITTAL, G.S. (1994A) –Modeling the Deep Fat Frying of Beef Meatballs – International Journal of Food Science and Technology, vol.29, pp.429-440.
- ATEBA, P., MITTAL, G.S. (1994B) – Dynamics of Crust Formation and Kinetics of Quality Changes During Frying of Meatballs – Journal of Food Science, vol.59, n.6, pp.1275-1290.
- BALASUBRAMANIAM, V.M.; CHINNAN, M.S., MALLIKARJUNAN, P. , PHILLIPS, R.D. (1997) – The Effect of Edible Film on Oil Uptake and Moisture Retention of Deep-fat Fried Poultry Product – Journal of Food Process Engineering, vol 20, pp.17-29.
- BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.S., BRUNS, R.E. – Planejamento e Otimização de Experimentos, ed. da Unicamp, 1995.
- BAUMANN, B., ESCHER, F. (1994) – Heat and Mass Transfer During Deep Fat Frying of Potato Slices – I. Rate of Drying and Oil Uptake - Lebensm.-Wiss.u.-Technol., vol.28, pp.395-403.
- BLUMENTHAL, M.M. (1991) – A New look at the Chemistry and Physics of Deep-fat Frying – Food Technology, vol.45, n.2, pp.68-71, 94.
- BOWEN, P.T.; JACKSON, M.K. , CORBITT, R.A. (1991) – Sludge Treatment, Usage and Disposal – Research Journal WPCF, vol.63, n.4, pp.406-414.



BROUILLETTE, F.; SAIN, M. , DANEALT, C. (1998) – Effect of Moisture Profile and Noncombustible Matter in Recycled Paper-Mill Sludge on Energy Recovery – Combustion Science and Technology, vol.139, pp. 191-206.

CAMPOS, J.R. – Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo - PROSAB, ABES, RJ, 1999,

COSTA, R.M.; OLIVEIRA, F.A.R., DELANEY, O. (1998) – Dependency of the Heat Transfer Coefficient on Surface Boiling During Frying of Potatoes Slices - Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki - Greece, August 19-22, vol.B, pp. 1194-1199.

COSTA, R.M.; OLIVEIRA, F.A.R., DELANEY, O., GEKAS, V. (1999) – Analysis of the Heat Transfer Coefficient During Potato Frying – Journal of Food Engineering, vol.39, pp.293-299.

COSTA, R. M. , OLIVEIRA, F.A.R. (1999) – Modelling the Kinetics of Water Loss During Potato Frying with a Compartmental Dynamic Model – Journal of Food Engineering, vol.41, pp. 177-185.

COURTOIS, F.; TRYSTRAM, G.; LEMAIRE, R., WACK, A.L. (1998) – Modeling of Deep Fat Frying of Banana Using a Compartmental Approach and Boiling's Theory- Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki - Greece, August 19-22, vol.B, pp. 1194-1199.

CRANK, J. – The Mathematics of Diffusion, ed. Claredon, Oxford, 1975

DAVIS, R.D. (1996) – The Impact of the EU and UK Environmental Pressures on the Future of Sludge Treatment and Disposal - Journal of the Chartered Institution of Water Environment and Management, February, vol. 10, pp.65-74.

DERMIBAS, A. (2001) – Biomass Resource Facilities and Biomass Conversion Processing for Fules and Chemicals – Energy Conversion and Management, n.42, pp.1357-1378.

- DIAZ, A.; TOTTE, F.; GIROUX, M.; REYNES, M., RAOULT-WACK, A-L. (1996) – Deep-fat Frying of Plaintain (*Musa paradisiaca* L.). I. Characterization of Control Parameters - Lebensm.-Wiss.u.-Technol., vol.29, pp.489-497.
- DIAZ, A.; TRYSTAM, G. VITRAC, O.; DUFOUR, D., RAOULT-WACK, A-L. (1999) – Kinetics of Moisture loss and Fat Absorption During Frying for Different Varieties of Plaintain – Journal of the Science of Food and Agriculture, vol.79, pp.291-299.
- DINCER, I (1996) – Modelling for Heat and Mass Transfer Parameters in Deep-frying of Products – Heat and Mass Transfer, vol 32, pp. 106-113.
- DINCER, I., YILDIZ, M. (1996) – Modelling of Thermal and Moisture Diffusions in Cylindrically Shaped Sausages During Frying – Journal of Food Engineering, vol.28, pp.35-43.
- FARID, M. (2002) – The Moving Boundary Problems from Melting and freezing to Drying and Frying of Foods – Chemical Engineering and Processing, vol.41, p.1-10.
- FARID, M.M., CHEN, X.D. (1998) – The Analysis of Heat and Mass Transfer During Frying of Food Using a Moving Boundary Solution Procedure – Heat and Mass Transfer, vol.34, pp.69-77.
- FARKAS, B.E.; SINGH, R.P., RUMSEY, T.R. (1994) – Mathematical Modeling of Immersion Frying: a Novel Use of Drying Theory – Proceedings of Drying 94, pp.195-202.
- FARKAS, B.E.; SINGH, R.P., RUMSEY, T.R. (1996A) – Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying I, Model Development – Journal of Food Engineering, vol.29, pp. 211-226.

- FARKAS, B.E.; SINGH, R.P., RUMSEY, T.R. (1996B) – Modelling Heat and Mass Transfer in Immersion Frying II, Model Solution and Verification – Journal of Food Engineering, vol.29, pp.227-248.
- FARKAS, B.E., HUBBARD, L.J. (2000) - Analysis of Convective Heat Transfer During Immersion Frying – Drying Technology, vol.18, n.6, pp.1269-1285.
- GABARDA, D. (1997) – La Collecte des Huiles de Cuisines Usagees – La Friture: Maîtrise du Procédé et de la Qualité des Produits in Recents Progres en Genie des Procedes, vol.11, n.59, pp.97-104.
- GAMBLE, M. H.; RICE, P., SELMAN, J. D. (1987) – 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, vol.22, pp. 233-241.
- GAMBLE, M. H. AND RICE, P. (1988) – Effect of Initial Tuber Solids Content on Final Oil Content of Potato Chips – Lebensm.-Wiss.u.-Technol., vol.21, pp.62-65.
- GIESE, J. (1996) – Fats, Oils and Fat Replacers – Food Techonology, vol.50, n.4, pp.78-84.
- GUILLAUMIN, R. (1988) – Kinetics of Fat Penetration in Foods –in Frying of Foods: Principles, Changes New Approachs - Varela, G., Bender, A.E. and Morton, I.D.
- GROSS, T.S.C. (1993) – Thermal Drying of Sewage Sludge – Journal of the Institute of Water and Environmental Management (J.IWEM), vol.7, n.3, pp.255-261.
- GRUTER, H.; MATTER, M.; OEHLMAN, K.H., HICKS, M.D. (1990) – Drying of Sewage Sludge - an Important Step in Waste Disposal - Water Science and Technology, vol.22, n.12, pp.57-63.
- GUPTA, P.; SHIVHARE, U.S., BAWA, A. S. (2000) – Studies on Frying Kinetics and Quality of French Fries – Drying Technology, vol.18, n.1&2, pp.311-321.

- HALL, J.E., ZMYSLOWSKA, A. (1997) – Development of Sludge treatment and Disposal Strategies for Large Conurbations: Case Study-Warsaw - Water Science and Technology, vol.36, n.11, pp.291-298.
- HAMMER, M.J. – Sistemas de Abastecimento de Águas e Esgotos, Livros Técnicos e Científicos, 1979.
- HUBBARD, L.J., FARKAS, B.E. (1998) – Determination of the Convective Heat Transfer Coefficient During Immersion Frying - Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki - Greece, August 19-22, vol.A, pp. 781-788.
- HUDSON, J.A., LOWE, P. (1996) – Current Technologies for Sludge Treatment and Disposal – Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management, 10, pp.436-440.
- JORDÃO, E.P., PESSOA, C.A. (1995) – Tratamento de Esgotos Domésticos. 3ª Ed. Rio de Janeiro: ABES, 720p.
- JORGE, N. (1996) – Estudo do Comportamento do Óleo de Girassol e do Efeito do Dimetil Polisiloxano em Termoxidação e Frituras – dissertação de doutorado, FEA/Unicamp, ed. Unicamp.
- KADAN, R.S., BRYANT, R.J., BOYKIN,D.L. (2001) – Effects of Processing Conditions on Qualities of Rices Fries – Journal of Food Science, vol66, n.4, pp.610-613,
- KOZEMPEL, M.F.; TOMASULA, P. M., CRAIG JR., J.C. (1991) – Correlation of Moisture and Oil Concentration in French Fries – Lebensm.-Wiss. u.-Technol., vol.24, pp. 445-448.
- LAMBERG, I.; HALLSTROM, B., OLSSON, H. (1990) – Fat Uptake in a Potato Drying/Frying Process - Lebensm.-Wiss.u.-Technol.,vol.23, pp.295-300.

- LANG, X., DALAI, A.K., BAKHSHI, N.N., REANEY, M.J., HERTZ, P.B. (2001) - Preparation and Characterization of Bio-diesels from Various Bio-oils - Bioresource Technology, vol. 80, pp.53-62.
- LEVINE, L. (1990a) – Understanding Frying Operations – Cereal Foods World, vol.35, n.2, pp.272-274.
- LEVINE, L. (1990b) – Understanding Frying Operations, Part II – Cereal Foods World, vol.35, n.5, pp.514.
- LEVINE, L. (1990c) – Designing Fryers for Oil Quality Control – Cereal Foods World, vol.35, n.9, pp.962-963.
- LOWE, F.R.S.C. (1995) – Developments in the Thermal Drying of Sewage Sludge - Journal of the Chartered Institution of Water Environment and Management, June, vol. 9, pp.306-316.
- MACHADO, M.F.S. (2001) – A situação Brasileira de Biossólidos, dissertação de mestrado, FEC/UNICAMP.
- McGILL, E. A. (1980) – The Chemistry of Frying – Bakers Digest, vol.6, n.62, 38-42.
- MITTAL, G.S., ZHANG, J. (2001) – Artificial Neural Network for the Prediction of Temperature,, Moisture and Fat Contents in Meatballs During Deep-fat Frying – International Journal of Food Science and Technology, vol.36, pp.489-497.
- MITTELMAN (ASHKENAZI), N.; MIZRAHI, SH., BERK, Z. (1984) – Heat and Mass Transfer in Frying, chap.12 in Engineering and Food. McKenna, B.M. (ed), Elsevier Applied Science Publishers.
- MOREIRA, R.G.; PALAU, J. E., SUN, X. (1995) – Deep-fat Frying of Tortilla Chips: An Engineering Approach – Food Technology, vol.49 (April), n.4, pp.146-150.

- MOREIRA, R.G.; SUN, X., CHEN, Y. (1997) – Factors Affecting Oil Uptake in Tortilla Chips in Deep-fat Frying – Journal of Food Engineering, vol.31, pp. 485-498.
- MOREIRA, R.G.; CASTELL-PEREZ, M.E., BARRUFET, M.A. — Deep-Fat Frying, Fundamentals and Applications, Aspen Publishers, 1999
- NGADI, M. O.; WATTS, K.C., CORREIA, L. R. (1997) – Finite Element Method Modelling of Moisture Transfer in Chicken Drum During Deep-fat Frying – Journal of Food Engineering, vol.32, pp.11-20.
- NIESSEN, W. – Combustion and Incineration Processes – Applications in Environmental Engineering, 2<sup>nd</sup> edition, Marcel Dekker Inc., 1995.
- O'BRIEN, R. (1993) – Foodservice Use of Fats and Oils – Inform, vol.4, n.8, pp. 913-921.
- OGADA, T., WERTHER, J. (1996) - Combustion Characteristics of Wet Sludge in a Fluidised Bed. Fuel, vol.75, n.5, p. 617-626.
- OSMAN, M.G., SAHAI, D., JACKSON, D.S. (2000) – Oil Absorption Characteristics of Extrudate During Frying: Effects of Extrusion Temperature and Screw Speed – Cereal Chemistry, vol.77, n.2, pp. 101-104.
- PRIESTLEY, A. J. – Report on Sewage Sludge Treatment and Disposal – Environmental Problems and Research Needs From an Australian Perspective – CSIRO, Division of Chemical and Polymers, 2001.
- RAO, V.N.M., DELANEY, A.M. (1995) – An Engineering Perspective on Deep-fat Frying of Breaded Chicken Pieces – Food Technology, vol.49 (April), n.4, pp.138-141.
- REDDY, G.V., DAS, H. (1993) – Kinetics of Deep-fat Frying of Potato and Optimization of Process Variables – Journal of Food Science and Technology, vol.30, n.2, pp.105-108.

RICE, P., GAMBLE, M.H. (1989) – Modeling Moisture Loss During Potato Slice Frying – International Journal of Food Science and Technology, vol.24 (2), pp 183-187.

SAGUY, S. (1997) – Deep-fat Frying: Basic Principles and Applications – La Friture: Maîtrise du Procédé et de la Qualité des Produits in Recents Progres en Genie des Procedes, vol.11, n.59, pp.57-67.

SAGUY, S., DANA, D. (2002) – Integrated Approach to Deep-fat Frying: Engineering, Nutrition, Health and Consumer Aspects – Journal of Food Engineering, article in press.

SAGUY, S., PINTHUS, E.J. (1995) – Oil Uptake During Deep-fat Frying: Factors and Mechanism – Food Technology, vol.49 (April), n.4, pp.142-145.

SAGUY, S., UFHEIL, G., LIVINGS, S. (1998) – Oil Uptake in Deep Fat Frying: Review – OCL, vol.5, n.1, January/February, pp.30-35.

SAHIN, S.; SASTRY, S.K., BAYINDIRLI, L. (1999) – The Determination of the Convective Heat Transfer Coefficient During Frying - Journal of Food Engineering, vol.39, pp.307-311.

SATO, H.; ETO, S., SUZUKI, H. (1982) – Dewatering Sludges: Relationship Between Amount of Bound Water and Dewatering Characteristics of Alum Sludges – Filtration and Separation, November/December, pp.492-497.

SHERWOOD, T.K. (1929) – The Drying of Solids II – Industrial and Engineering Chemistry, vol.21, n.10, pp.976-980.

SINGH, P. (1995) – Heat and Mass Transfer in Foods During Deep Fat Frying – Food Technology, April, pp.134-137.

SILVA, M.A., NEBRA, S.A., MACHADO SILVA, M.J., SANCHEZ, C.G. (1998) - The Use of Biomass Residues in the Brazilian Soluble Coffee Industry - Biomass and Bioenergy, vol.14, n.5/6, pp.457-467.

- SMOLLEN M. (1990) – Evaluation of Municipal Sludge Drying and Dewatering with Respect to Sludge Volume Reduction - Water Science and Technology, vol.22, n.12, pp.153-161.
- SMOLLEN M., KAFAAR, A. (1997) – Investigation Into Alternative Sludge Conditioning Prior to Dewatering - Water Science and Technology, vol.36, n.11, pp.115-119.
- SOUZA, M.E.P. – Transporte de Massa e Calor na Secagem de Cavaco de Madeira – Dissertação de Mestrado, ed. da Unicamp, 1994
- STAUFFER, C. E. - Fats and Oils, Eagan Press, 1996.
- STEEL, E.W. – Water Supply and Sewerage, ed. McGraw-Hill, 1979
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. – Drying Principles, Applications and Design, London: Gordon and Breach Science Publ., 1986.
- TOTTE, F.; DIAZ, A.; MAROUZE, C., RAOULT-WACK, A-L. (1996) – Deep-fat Frying of Plantain (*Musa paradisiaca* L.). II. Experimental Study of Solid/Liquid Phase Contacting Systems - Lebensm.-Wiss.u.-Technol., vol.29, pp.599-605.
- TRYSTAM, G.; TRÉLÉA, I.C.; RAOULT-WACK, A.L.; DIAZ, A., COURTOIS, F. (1998) – Indirect Measurement and Control of Moisture Content During Dehydration Performed by Frying - Proceedings of the 11th International Drying Symposium (IDS'98), Halkidiki - Greece, August 19-22, vol.B, pp. 1460-1467.
- TSANG, K.R., VESILIND, P.A. (1990) - Moisture Distribution in Sludges - Water Science and Technology, vol.22, n.12, pp. 135-142.
- VARELA, G., BENDER, A. E., MORTON, I.D. – Frying of Foods: Principles, Changes, new Approaches, ed. Chichester, 1988.



VESILIND, P.A. (1994) – The Role of Water in Sludge Dewatering – Water Environmental Research, vol.66, n.1, pp.4-11.

VESILIND, P.A., HSU, C-C. (1997) – Limits of Sludge Dewaterability – Water Science and Technology, vol.36, n.11, pp.87-91.

VESILIND, P.A., RAMSEY, T. (1996) - Effect of Drying Temperature on the Fuel Value of Wastewater Sludge - Water Management and Research, vol.14, p. 189-196.

VITRAC, O. (2000) – Caracterization Experimentale at Modelisationb de L’Operation de Friture, dissertação de doutorado, Sciences Biologiques Fondamentales et Appliques, Ensia, número de identificação 2000EIAA 0109 (francês).

VITRAC, O., DUFOUR, D., TRYSTAM, G., RAOULT-WACK, AL. (2002) – Characterization of Heat and Mass Transfer During Deep-fat Frying and its Effect on Cassava Chip Quality – Journal of Food Engineering, vol. 53, pp.161-176.

WERTHER, J., OGADA, T. (1999) – Sewage Sludge Combustion – Progress in Energy and Combustion Science, vol.25, pp.55-116.

ZANONI, A. E., MUELLER, D.L. (1982) - Calorific Value of Wastewater Plant Sludges - Journal of the Environmental Engineering Division, ASCE, 108, p.187-195.

## ANEXA A

## RESULTADOS OBTIDOS NA UNIVERSIDADE DE QUEENSLAND

## A1. Ensaio Preliminares

Estão apresentados neste item do Anexo os resultados obtidos no processo de fritura de cilindros de madeira, referentes aos ensaios preliminares da primeira fase de trabalho deste doutorado.

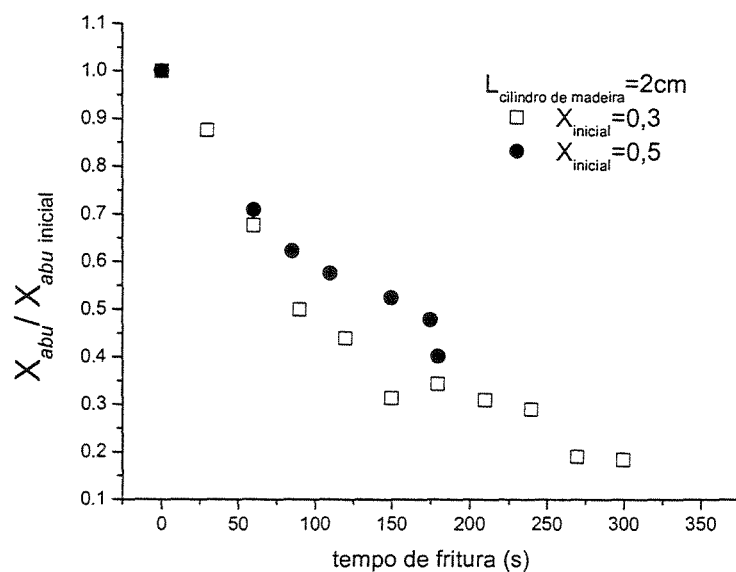


Figura A.1: Curvas de secagem ( $X_{abu}$  vs  $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com conteúdos de umidade inicial diferentes. A linha contínua aponta somente a tendência dos pontos.

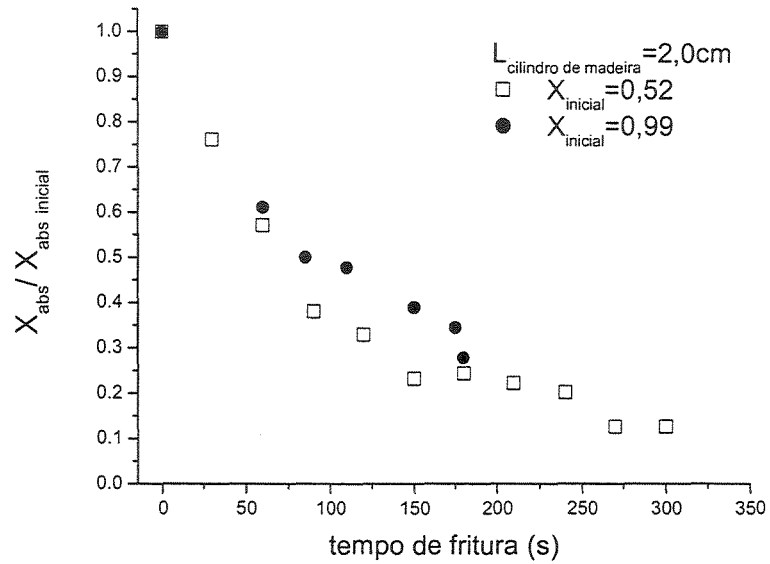


Figura A.2: Curvas de secagem ( $X_{abs}$  vs  $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com conteúdos de umidade inicial diferentes.

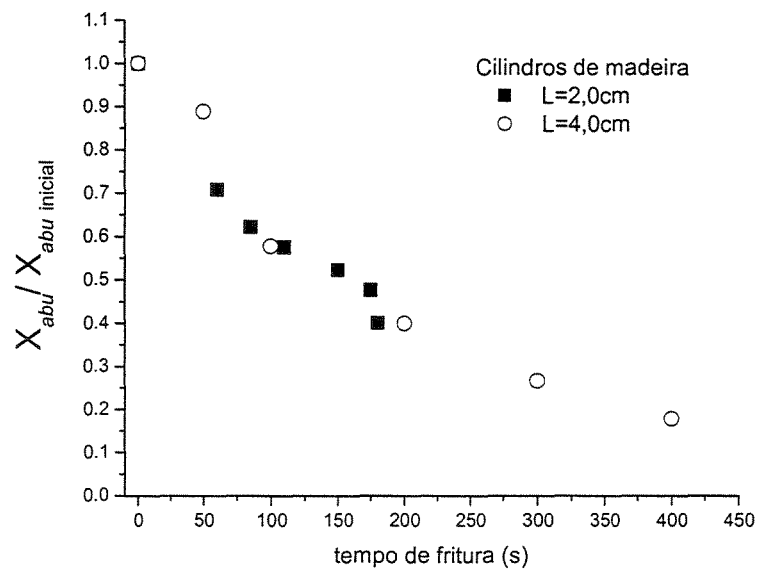


Figura A3: Curvas de secagem ( $X_{abs}$  vs  $t$ ) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com comprimentos diferentes. A linha contínua aponta somente a tendência dos pontos.

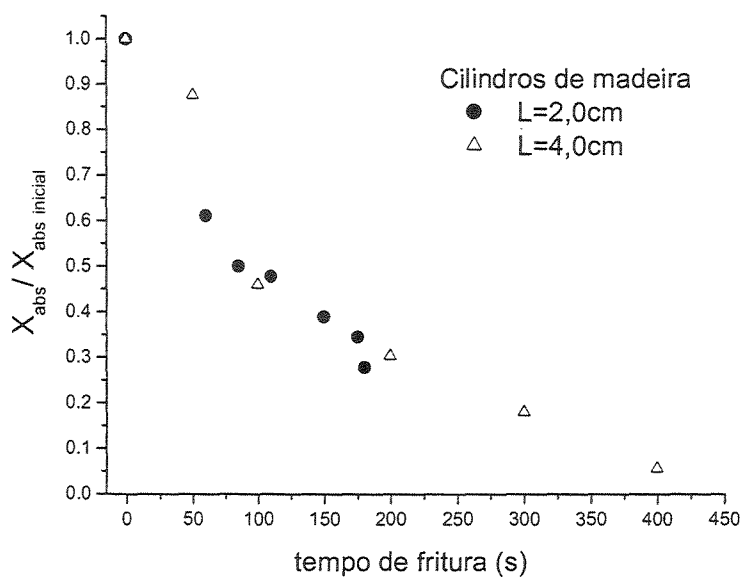


Figura A4: Curvas de secagem ( $X_{abu}$  vs t) obtidas durante a fritura de cilindros de madeira com comprimentos diferentes.

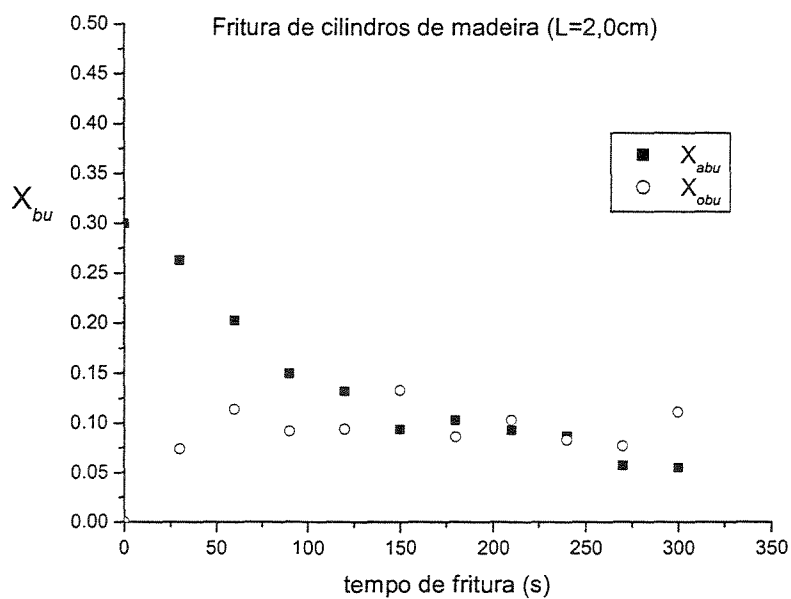


Figura A5: Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 2,0cm de comprimento. Base úmida

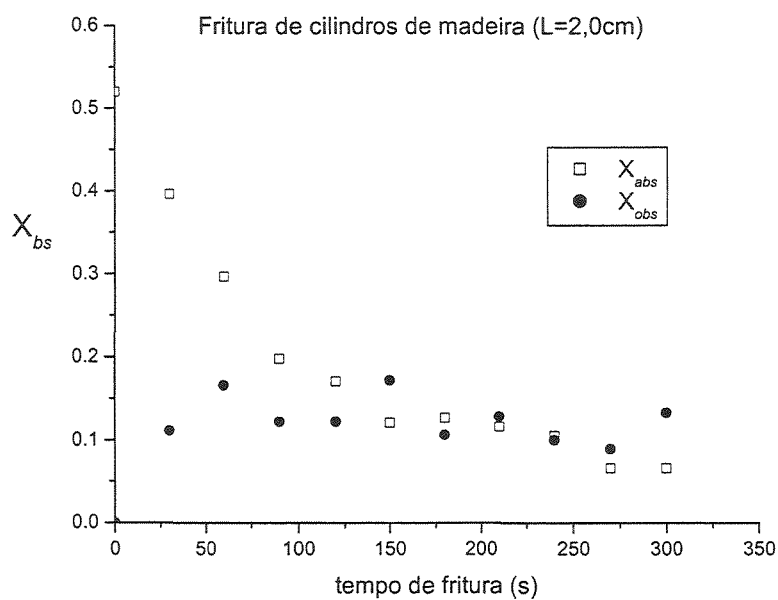


Figura A6: Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 2,0cm de comprimento. Base seca.

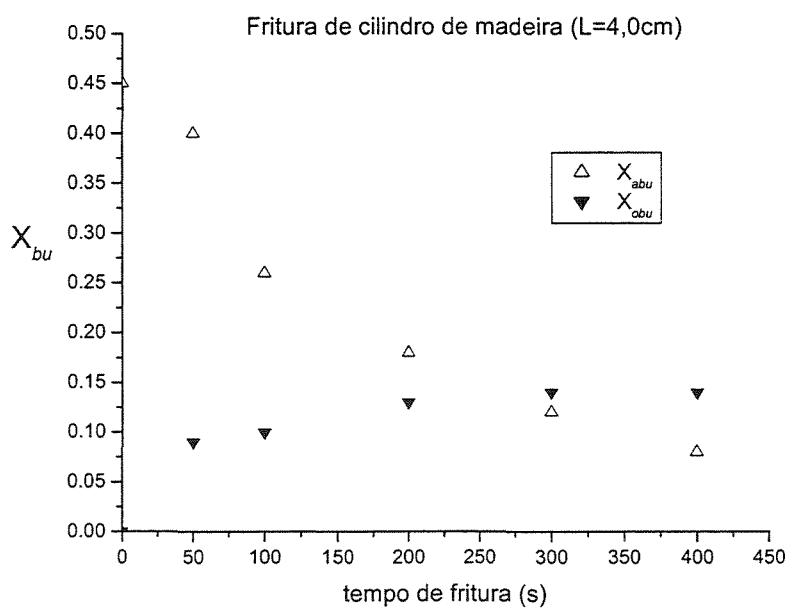


Figura A7: Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 4,0cm de comprimento. Base úmida

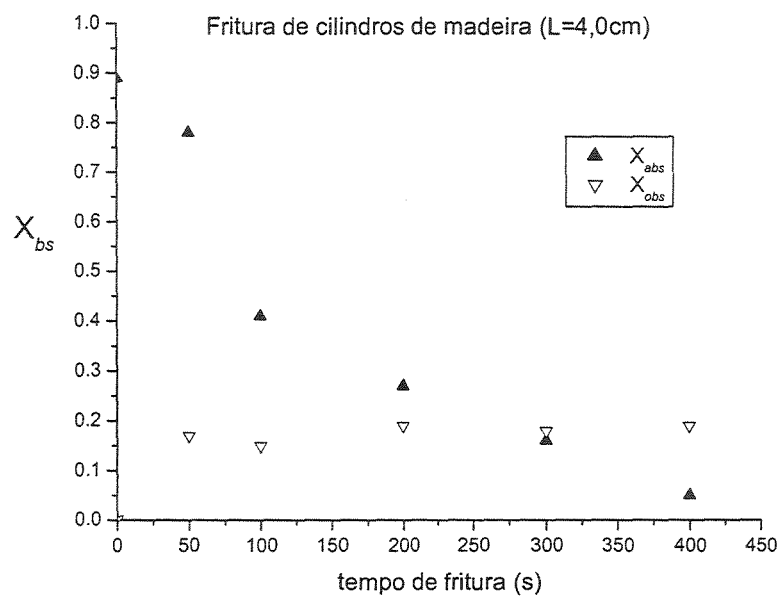


Figura A8: Variação do conteúdo de umidade e óleo durante a fritura de cilindros de madeira de 4,0cm de comprimento. Base seca.

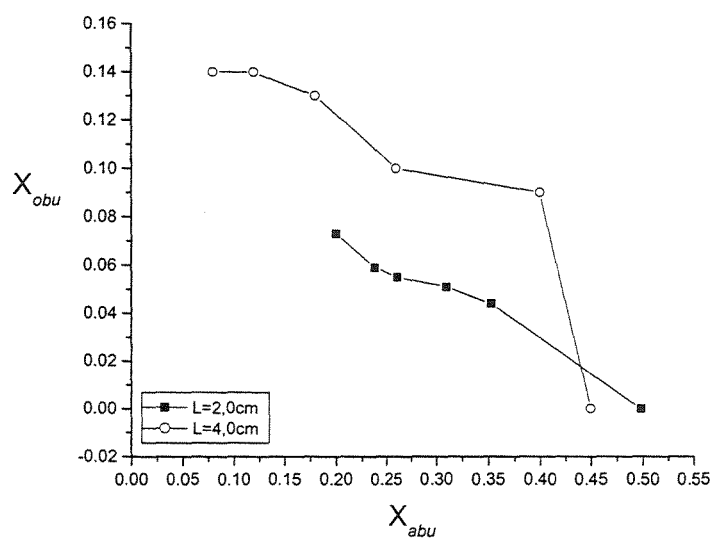


Figura A9: Variação do conteúdo de óleo ( $X_{obu}$ ) em função da umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de madeira. A linha contínua aponta tendência dos pontos.

## A2. Ensaio com o Lodo de Esgoto de Toowoomba

Estão apresentados neste item do Anexo os resultados obtidos para a de fritura de cilindros de lodo de esgoto, referentes aos ensaios da primeira fase de trabalho deste doutorado.

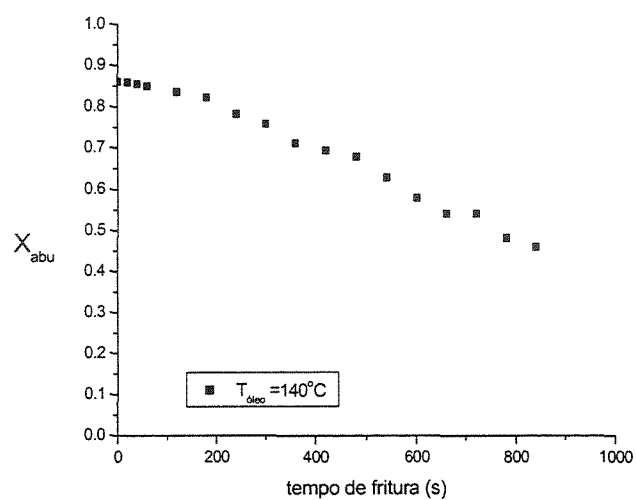


Figura A10: Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de lodo.  
Temperatura do óleo igual a 140°C.

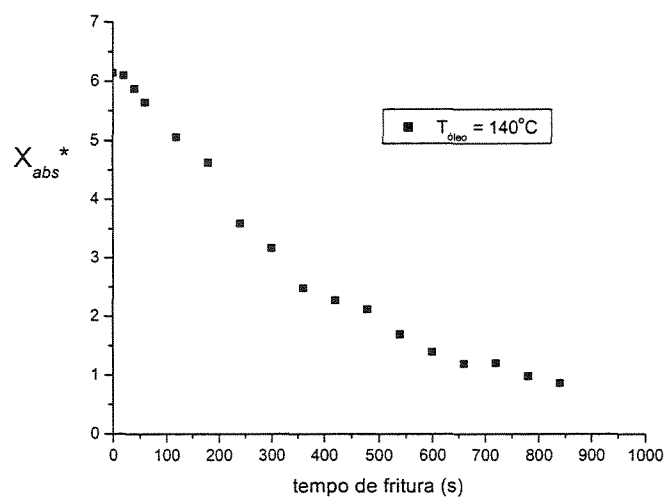


Figura A11: Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abs}^*$ ) durante a fritura de cilindros de lodo.  
Temperatura do óleo igual a 140°C.

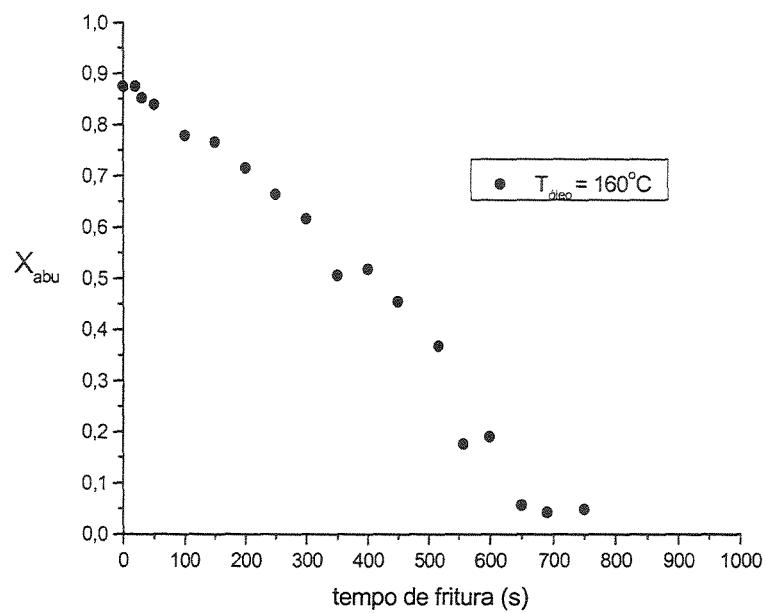


Figura A12: Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de lodo.

Temperatura do óleo igual a 160°C.

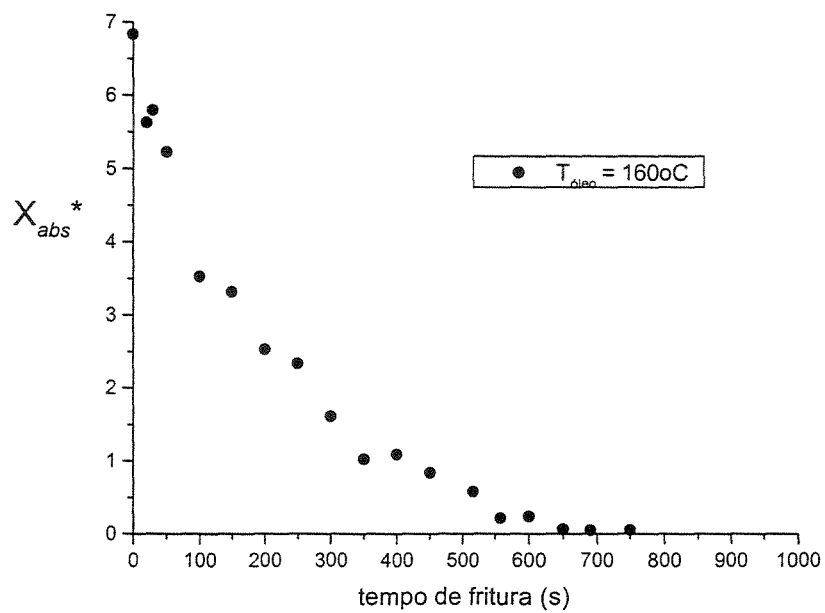


Figura A13: Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abs}^*$ ) durante a fritura de cilindros de lodo.

Temperatura do óleo igual a 160°C.



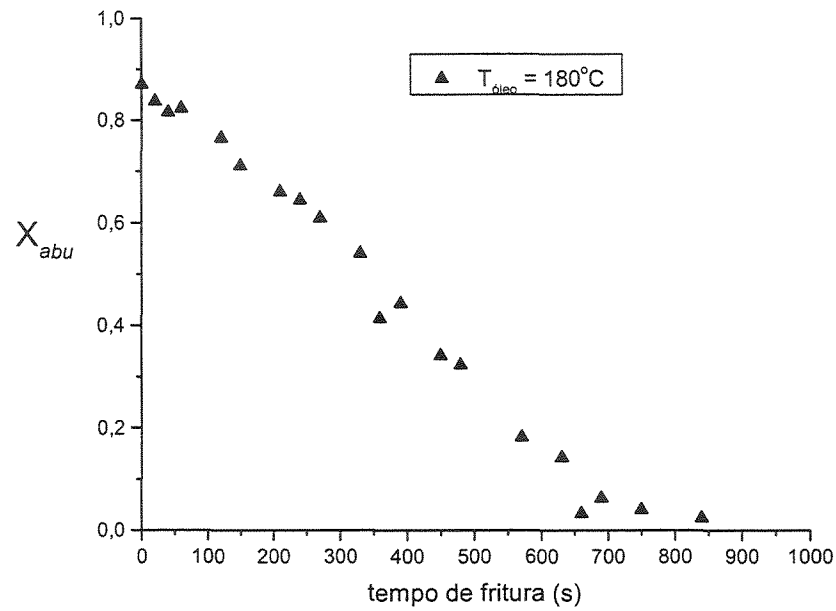


Figura A14: Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abu}$ ) durante a fritura de cilindros de lodo.  
Temperatura do óleo igual à 180°C.

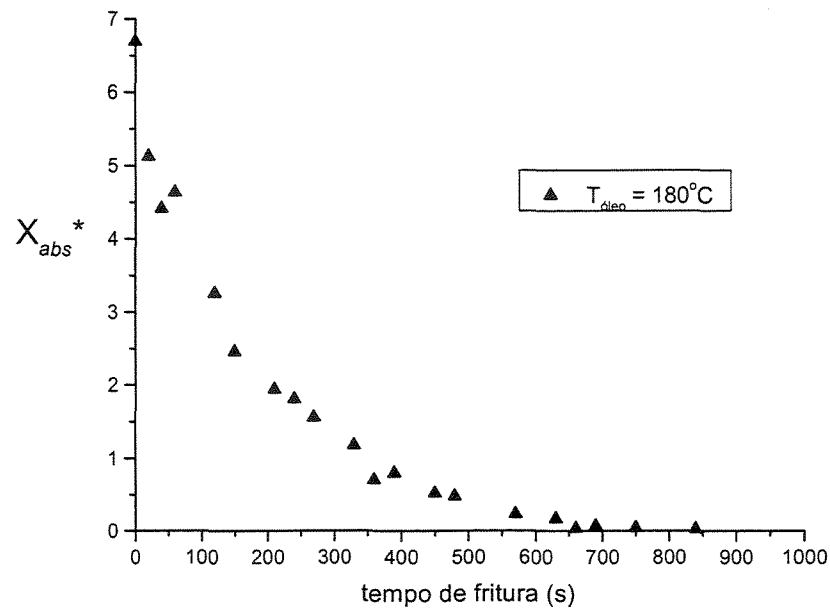


Figura A15: Variação do conteúdo de umidade ( $X_{abs}^*$ ) durante a fritura de cilindros de lodo.  
Temperatura do óleo igual à 180°C.

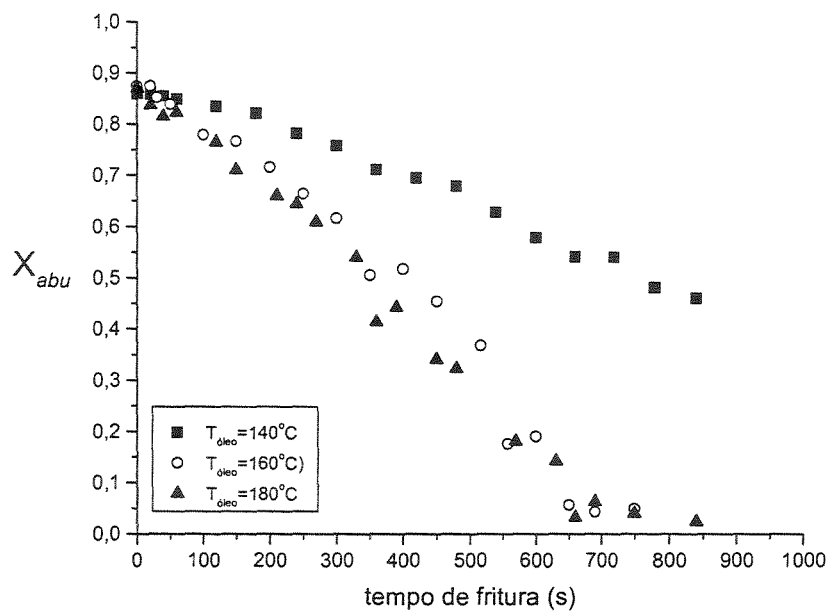


Figura A16: Efeito da temperatura do óleo nas curvas  $X_{abu}$  vs tempo

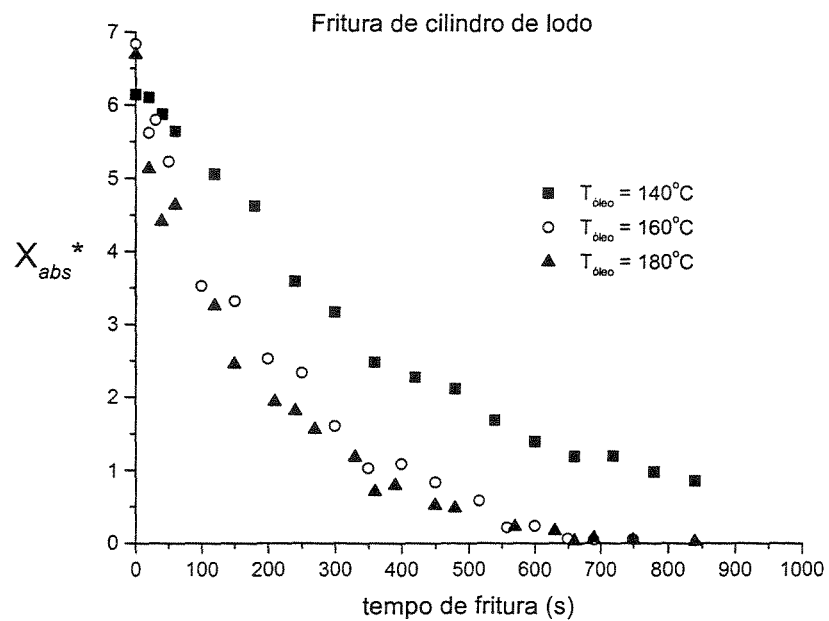


Figura A17: Efeito da temperatura do óleo nas curvas  $X_{abs}^*$  vs tempo

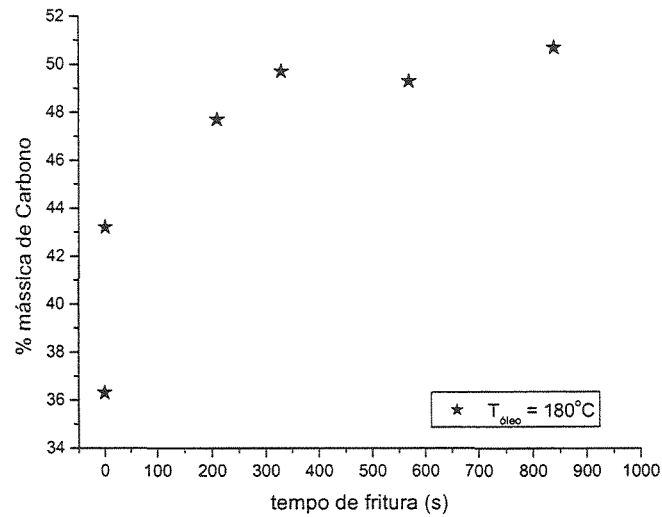


Figura A18: Variação da porcentagem mássica de carbono nas amostras de lodo frito em óleo a 180°C. O ponto “zero” é referente ao lodo seco a ar.

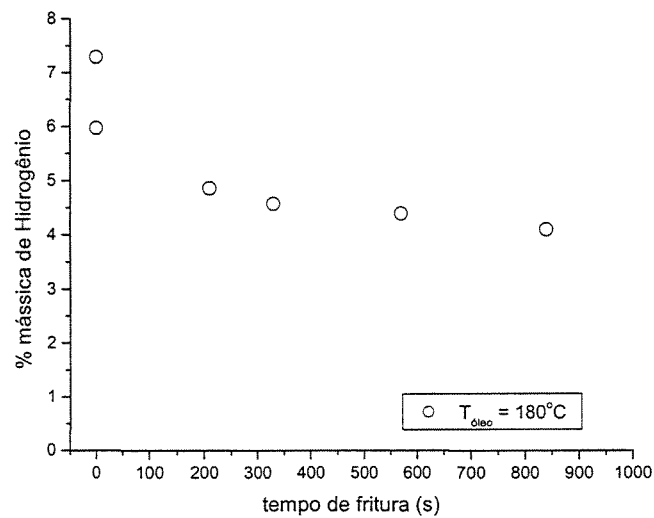


Figura A19: Variação da porcentagem mássica de hidrogênio nas amostras de lodo frito em óleo a 180°C. O ponto “zero” é referente ao lodo seco a ar.

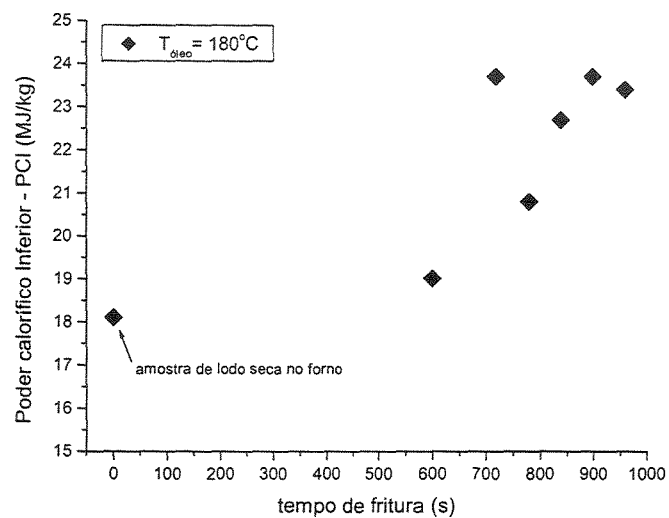


Figura A20: Poder calorífico de amostras de lodo fritas a 180°C: variação em relação ao tempo de fritura

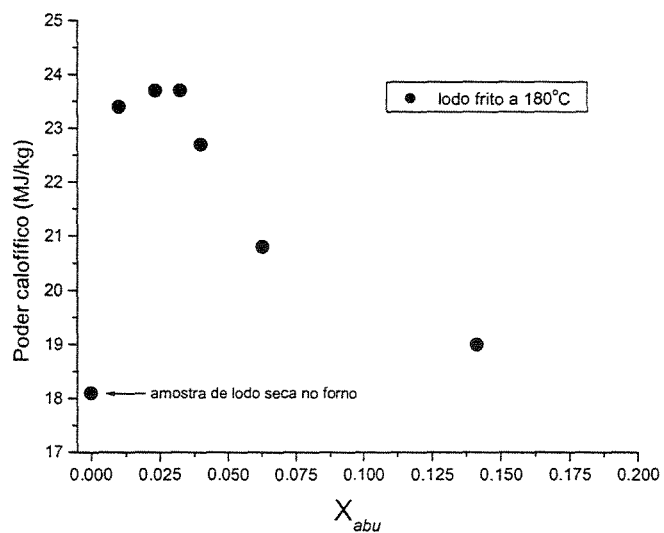


Figura A21: Poder calorífico de amostras de lodo fritas a 180°C: variação em relação à umidade da amostra.

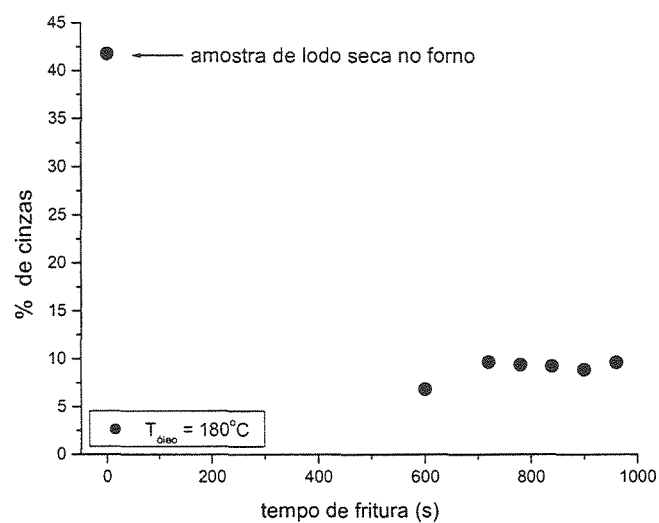
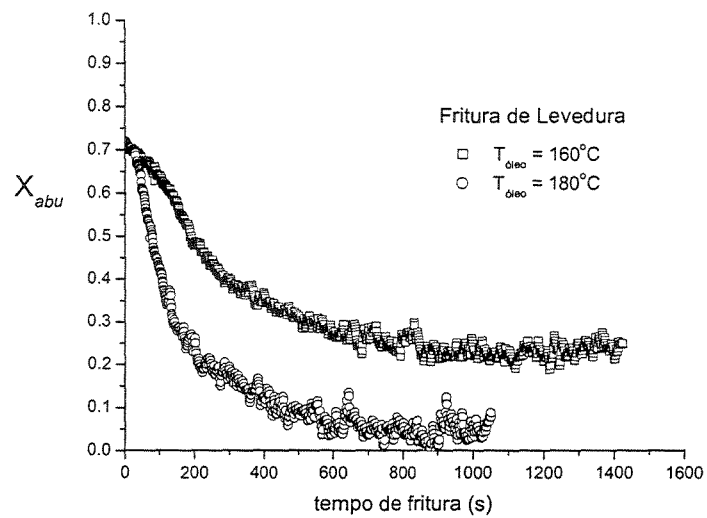
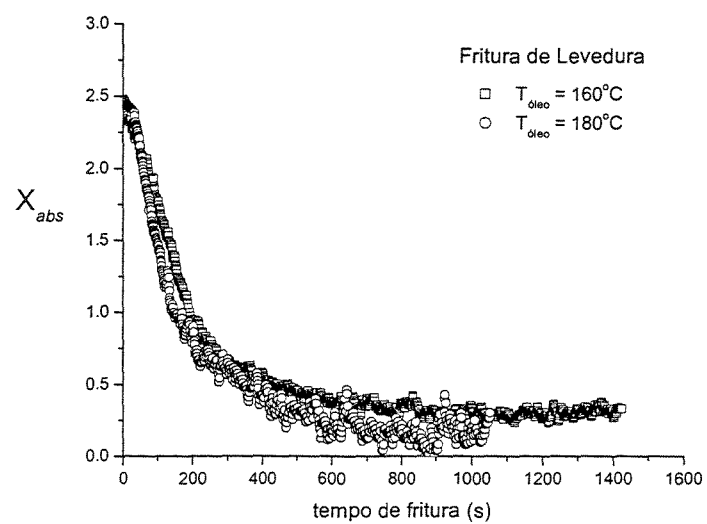


Figura A22: Porcentagem de cinzas após a combustão de amostras de lodo fritos a  $180^{\circ}\text{C}$ :  
variação em relação ao tempo de fritura.

## ANEXO B

## B1) Resultados dos ensaios preliminares

Figura B1: Curvas de  $X_{abu}$  vs tempo durante a fritura de levedura a diferentes temperaturas de óleoFigura B2: Curvas de  $X_{abs}$  vs tempo durante a fritura de levedura a diferentes temperaturas de óleo

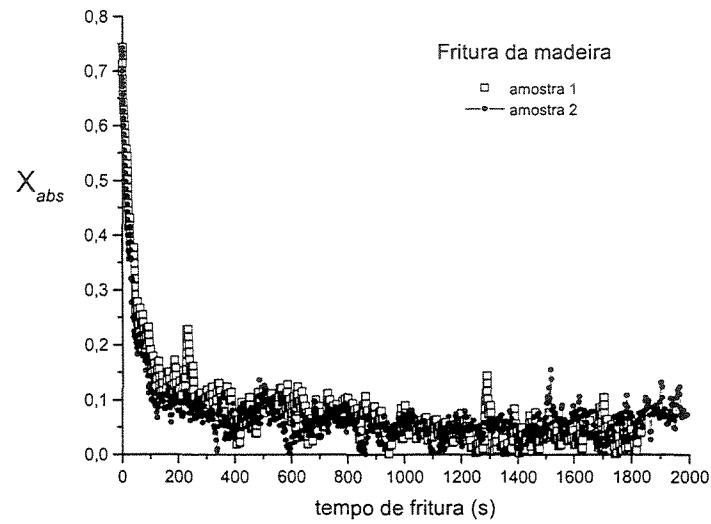


Figura B3: Fritura de semi-cilindros de madeira ( $X_{abs}$  vs tempo)

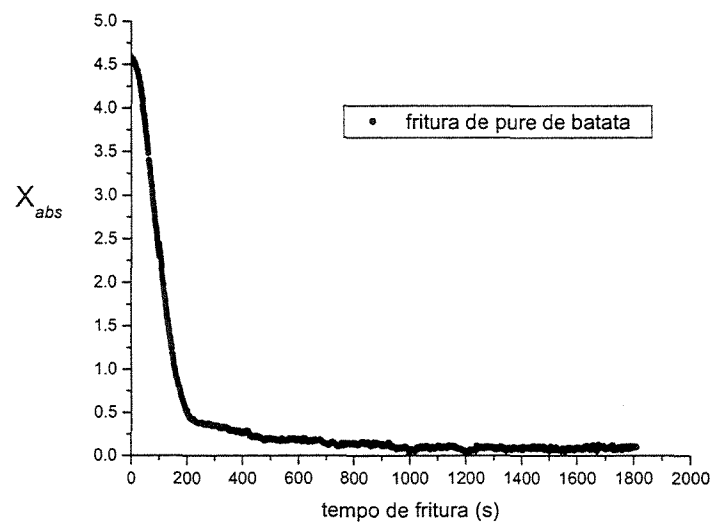


Figura B4: Fritura de semi-cilindros de purê de batata ( $X_{abs}$  vs tempo)

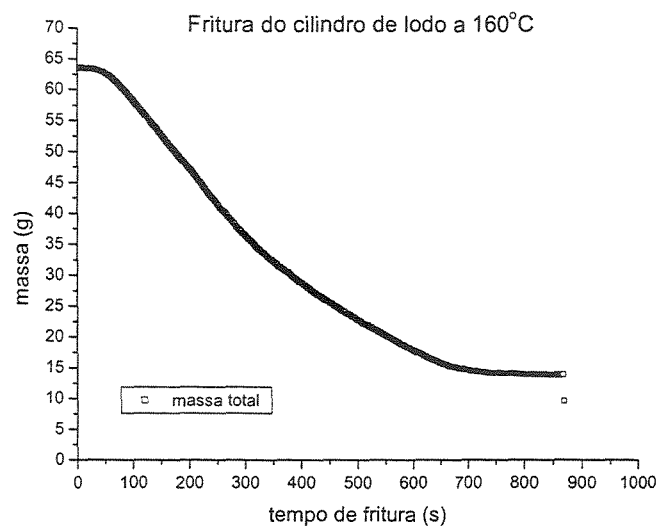
**B2) Resultados dos ensaios com o lodo**

Figura B5: Variação da massa total do cilindro durante a fritura de lodo a 160°C

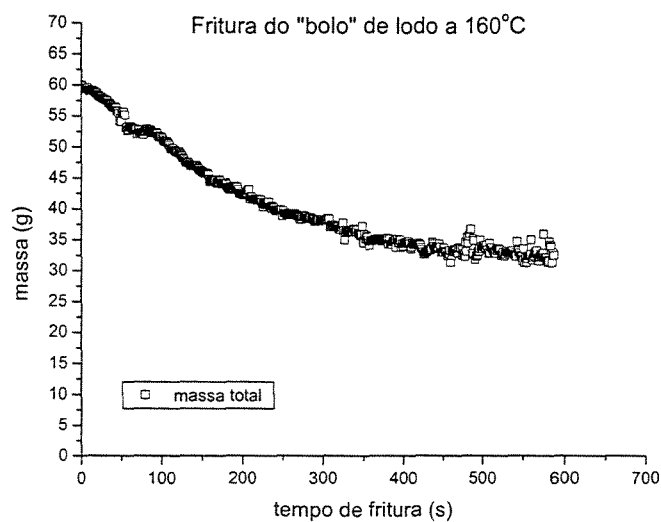


Figura B6: Variação da massa total do do "bolo" durante a fritura de lodo a 160°C.



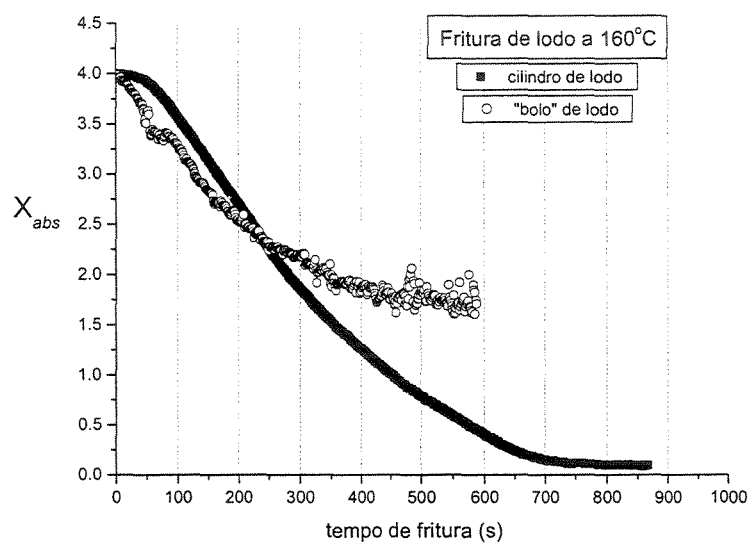


Figura B7: Comparação da variação da umidade do lodo, cilindro e "bolo".

Temperatura do óleo = 160°C.

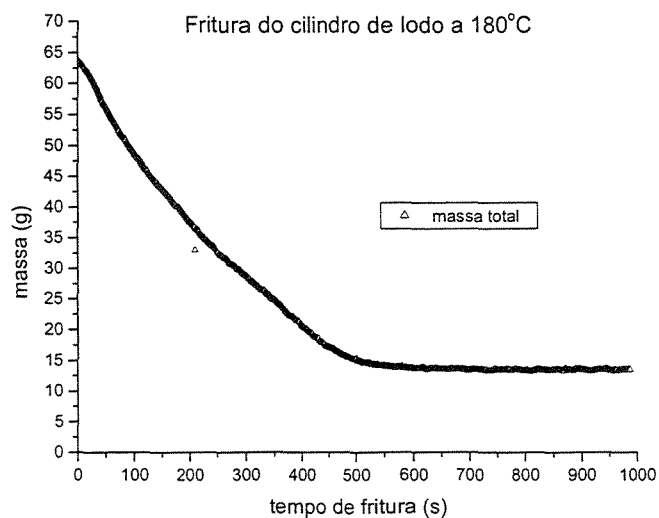


Figura B8: Variação da massa total do cilindro durante a fritura de lodo a 180°C.

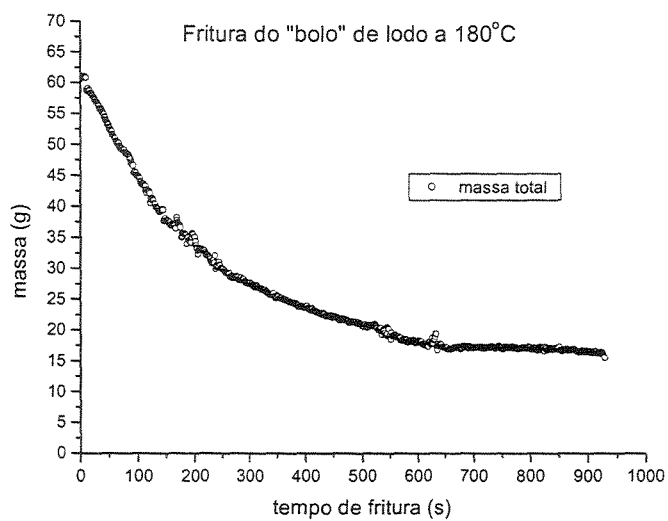


Figura B9: Variação da massa total do “bolo” durante a fritura de lodo a 180°C.

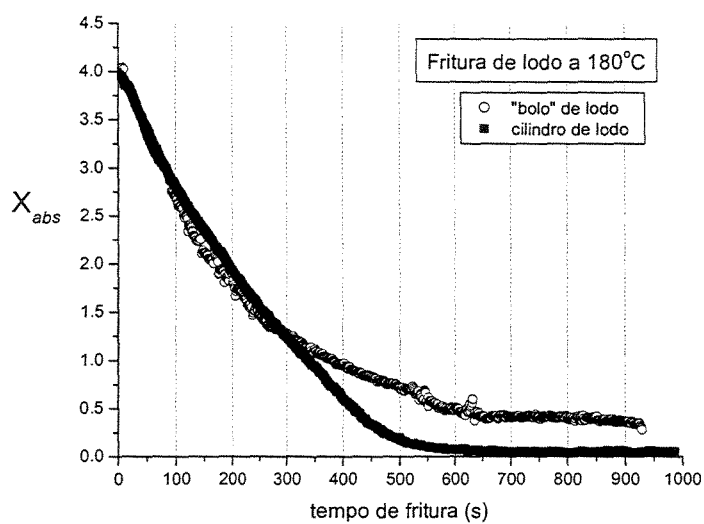


Figura B10: Comparação da variação da umidade do lodo, cilindro e “bolo”.

Temperatura do óleo = 180°C.

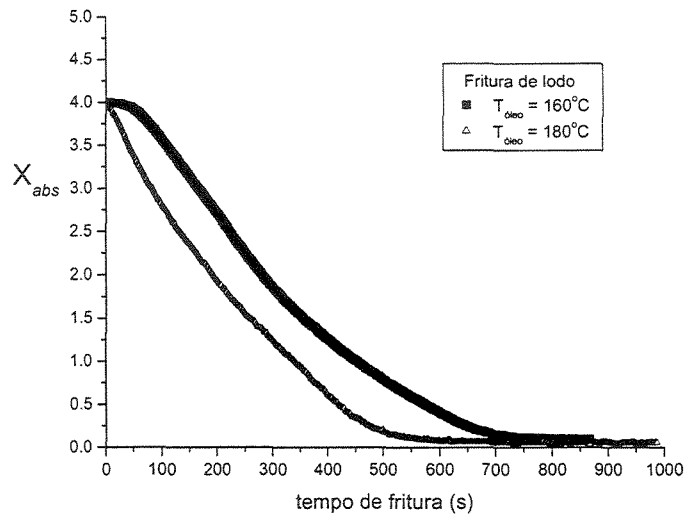


Figura B11: Variação da umidade do cilindro de lodo durante frituras a temperaturas diferentes.

### B3) Resultados dos ensaios para determinação da área de transferência de calor e massa

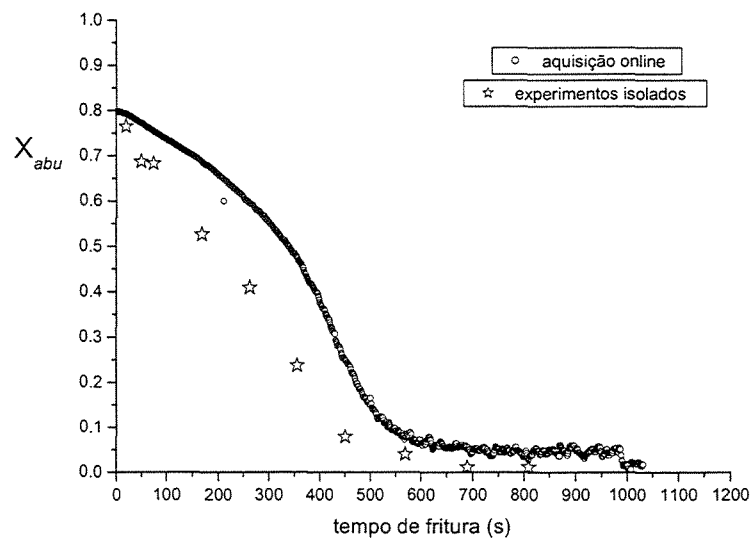


Figura B12: Curvas de secagem em base úmida: experimentos isolados em comparação com o experimento de aquisição online. Temperatura do óleo  $180^{\circ}C$ .

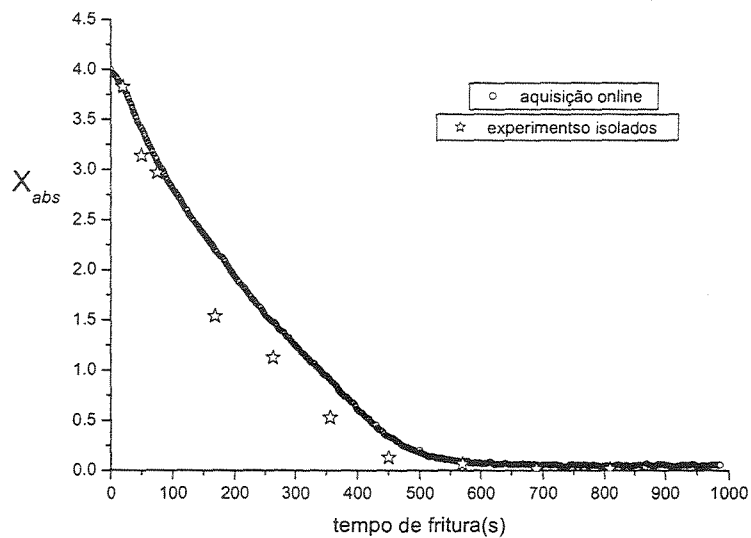


Figura B13: Curvas de secagem em base seca: experimentos isolados em comparação com o experimento de aquisição online. Temperatura do óleo 180°C.

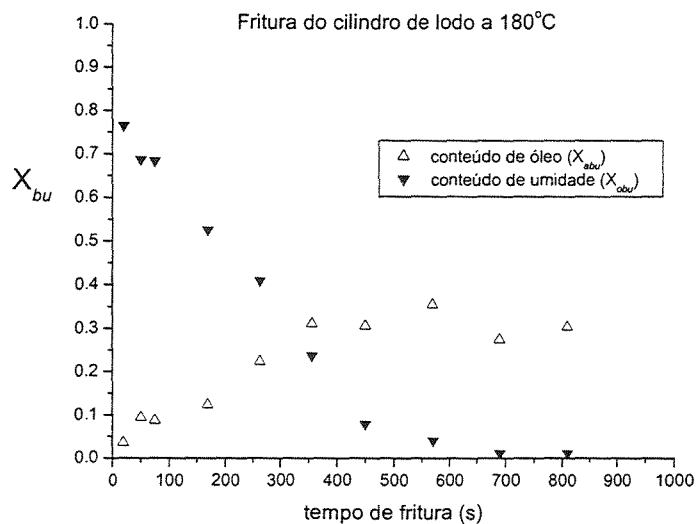


Figura B14: Variação da umidade e do óleo em função do tempo durante a fritura de lodo a 180°C. Base úmida

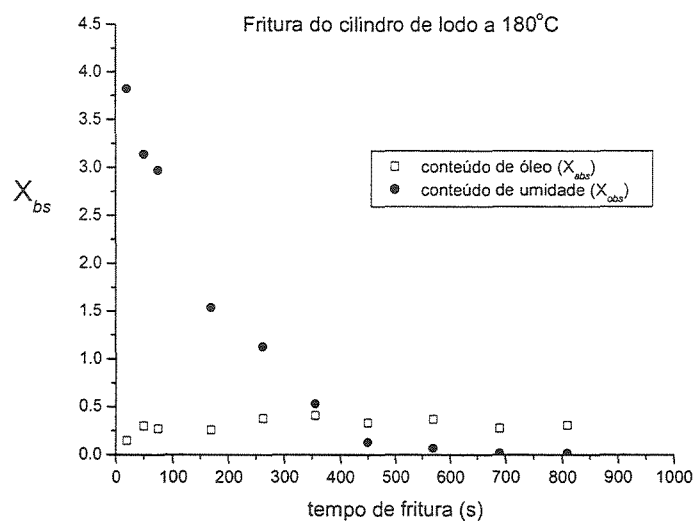


Figura B15: Variação da umidade e do óleo em função do tempo durante a fritura de lodo a 180°C. Base seca.

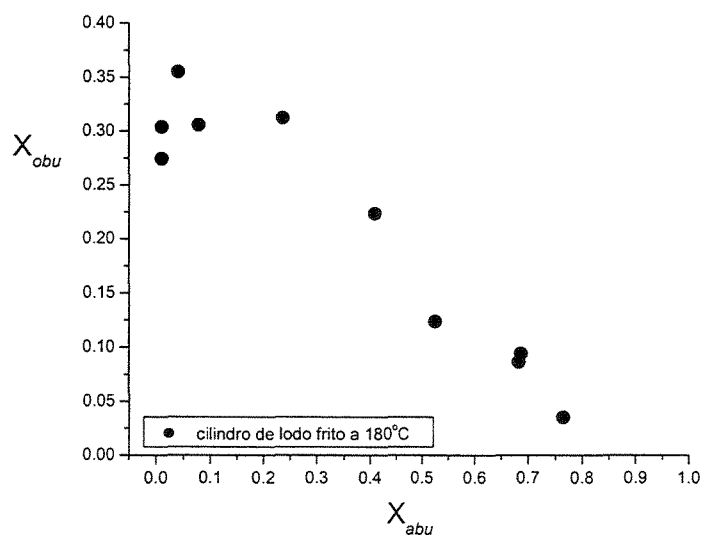


Figura B16: Relação entre o conteúdo de óleo incorporado ao lodo e seu conteúdo de umidade, base úmida

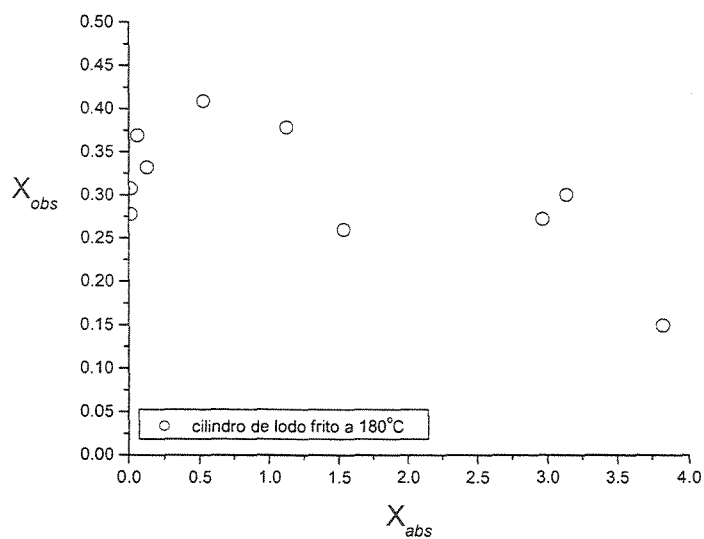


Figura B17: Relação entre o conteúdo de óleo incorporado ao lodo e seu conteúdo de umidade, base seca.

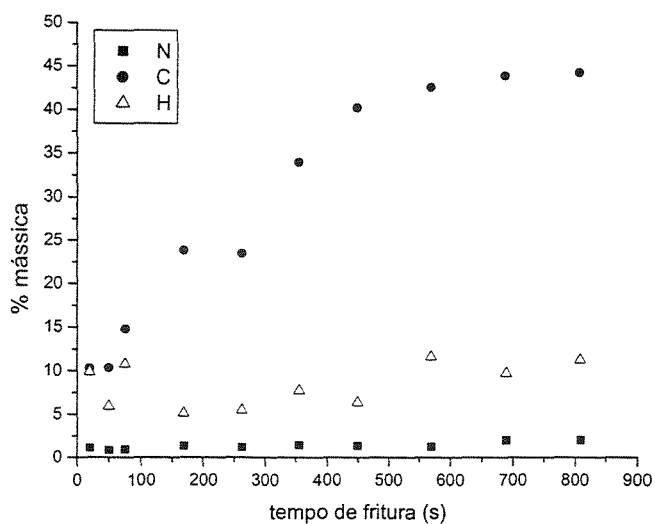


Figura B18: Variação da porcentagem mássica dos elementos C, H e N durante a fritura de lodo

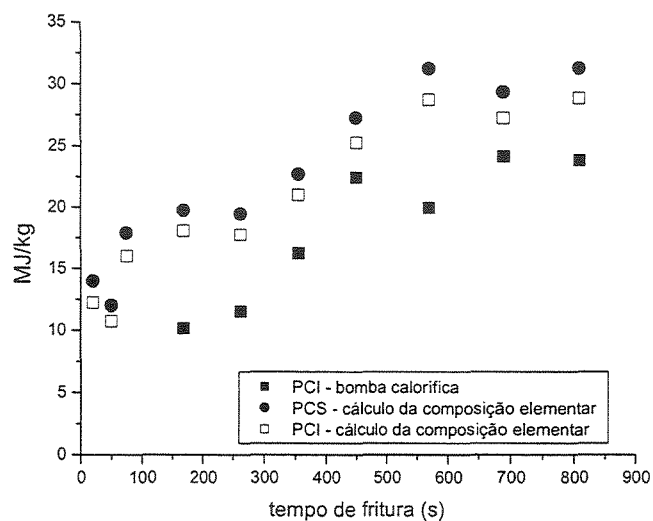


Figura B19: Variação do poder calorífico do lodo com o tempo de fritura.

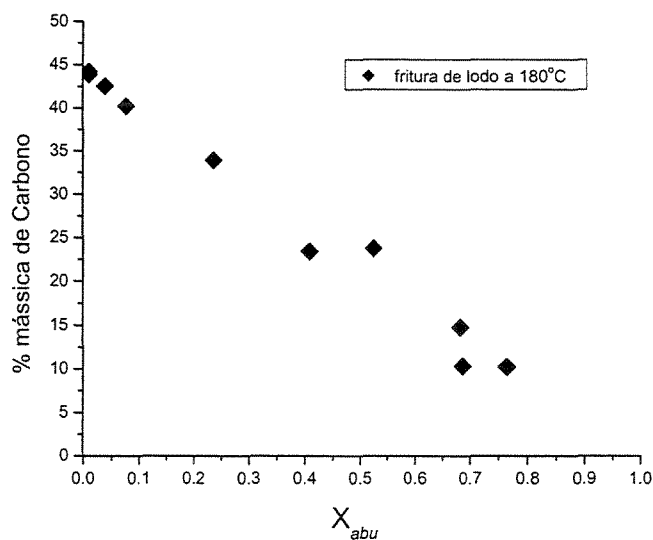


Figura B20: Porcentagem de carbono das amostras de lodo frito em função do seu conteúdo de umidade.

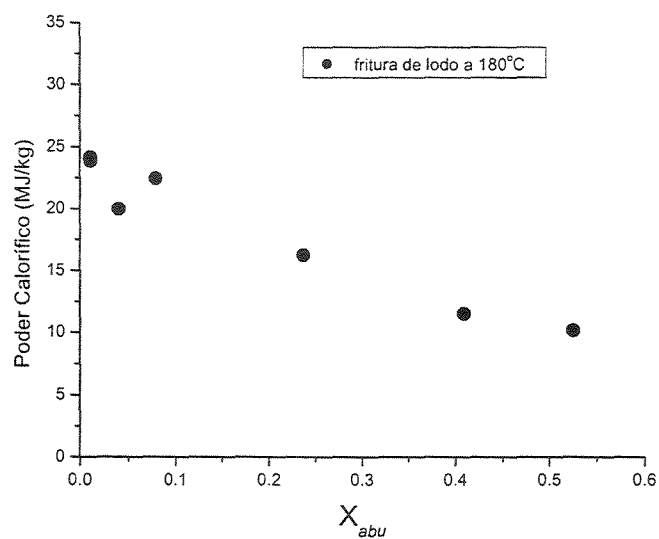


Figura B21: Variação do poder calorífico das amostras de lodo em função do seu conteúdo de umidade.

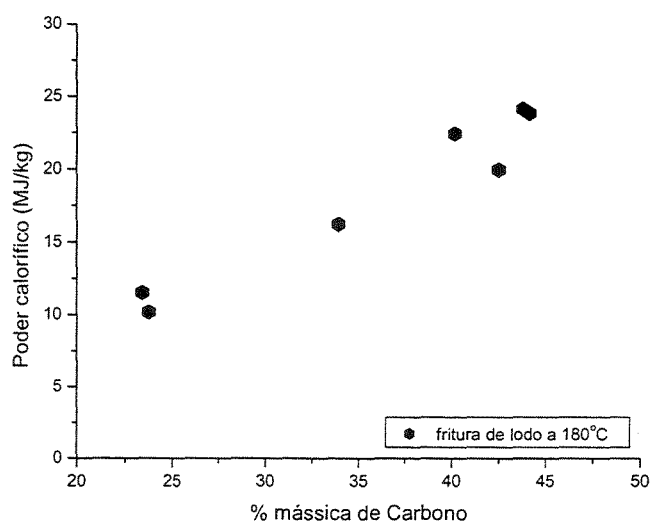


Figura B22: Variação do poder calorífico das amostras de lodo em função do seu conteúdo de carbono.



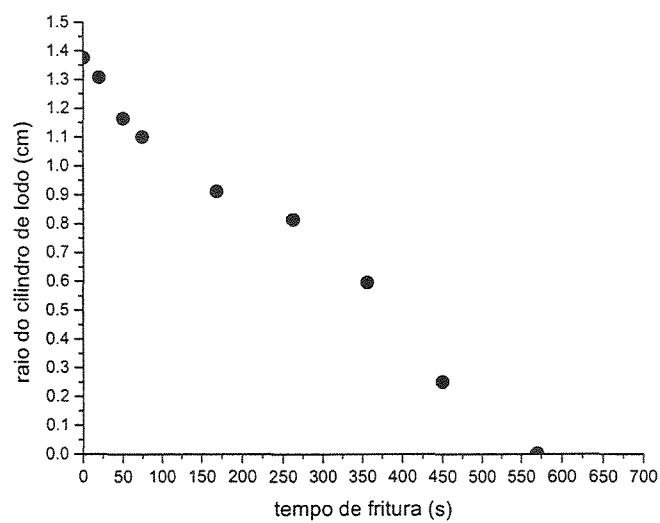


Figura B23: Diminuição do raio do cilindro durante a fritura

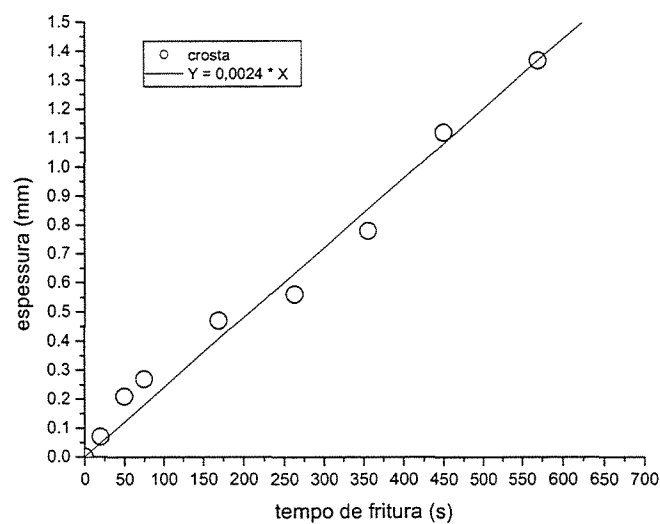


Figura B24: Aumento da espessura da crosta formada durante a fritura

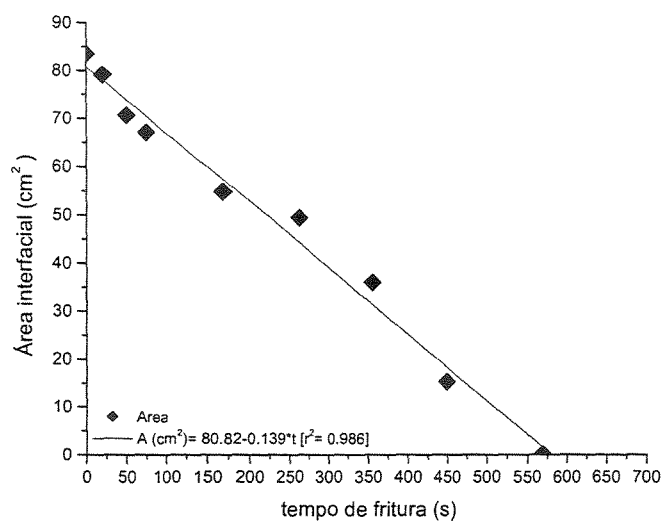


Figura B25: Diminuição em função do tempo da área interfacial de transferência de calor e massa

## ANEXO C

## C1 – Planejamento Experimental I

Este anexo contém os gráficos obtidos através das análises dos resultados do Planejamento Experimental I (Item 5.3.1).

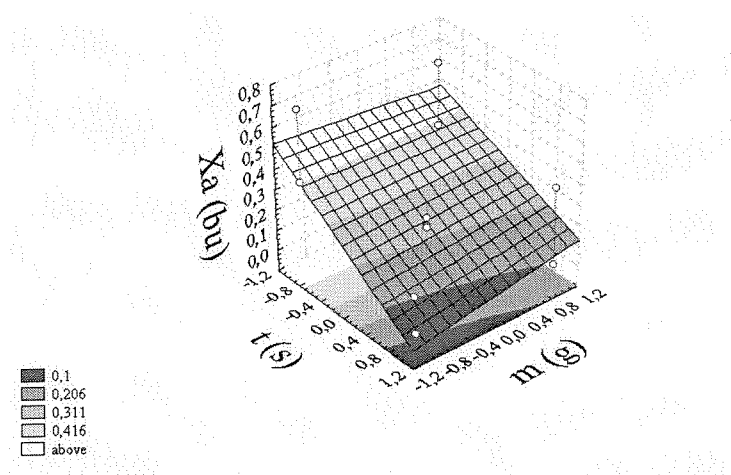


Figura C1: Superfície de resposta para o conteúdo de umidade,  $X_a$  (bu). Efeito do tempo de fritura ( $t$ ) e da massa de lodo ( $m$ )

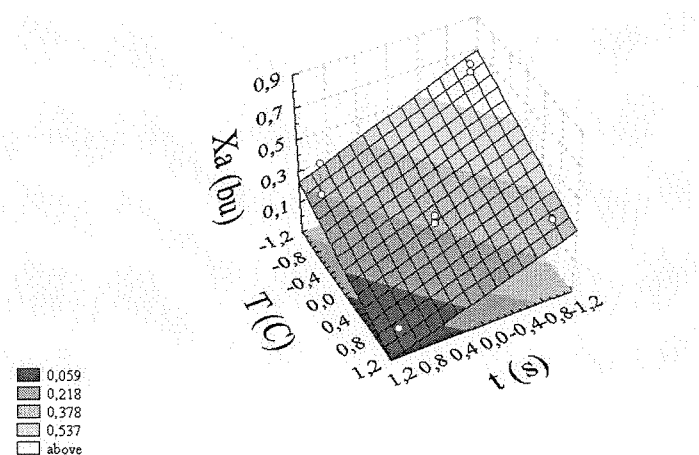


Figura C2: Superfície de resposta para o conteúdo de umidade,  $X_a$  (bu). Efeito da temperatura do óleo ( $T$ ) e do tempo de fritura ( $t$ )

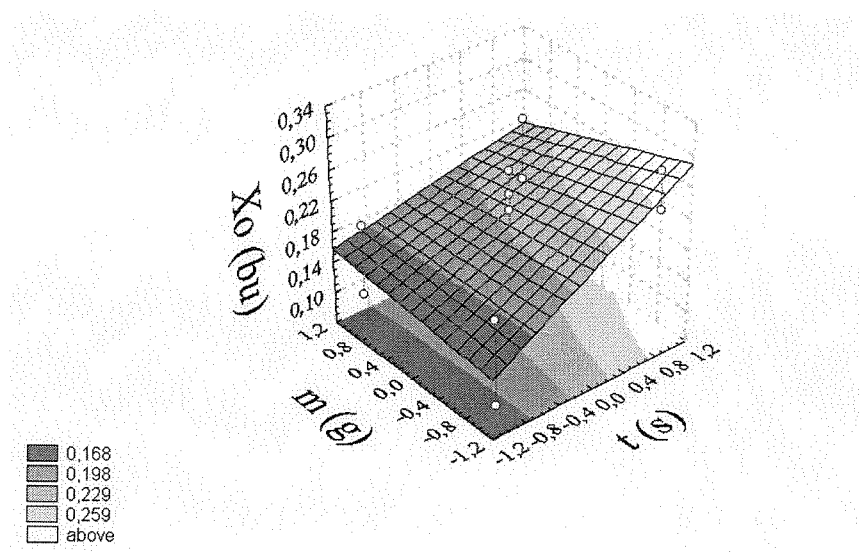


Figura C3: Superfície de resposta para o conteúdo de óleo,  $X_o$  (bu). Efeito do tempo de fritura ( $t$ ) e da massa de lodo ( $m$ )

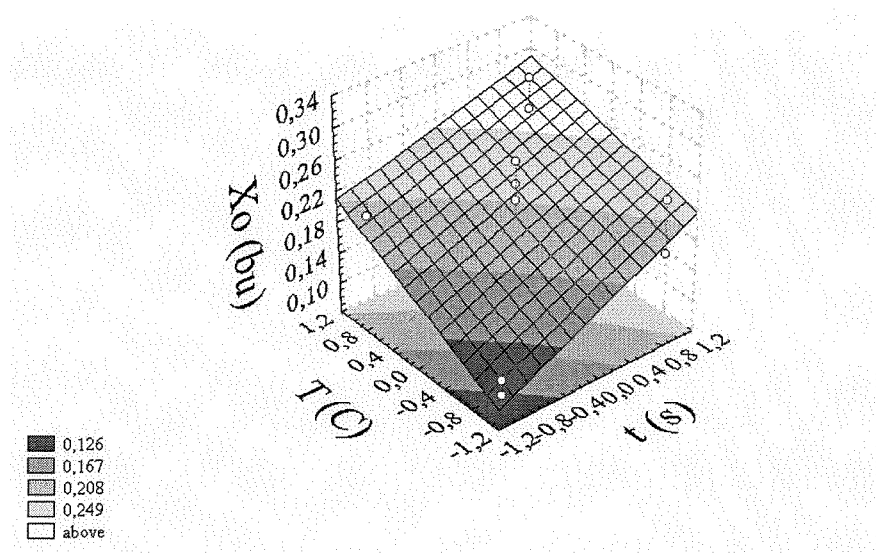


Figura C4: Superfície de resposta para o conteúdo de óleo,  $X_o$  (bu). Efeito da temperatura do óleo ( $T$ ) e do tempo de fritura ( $t$ )

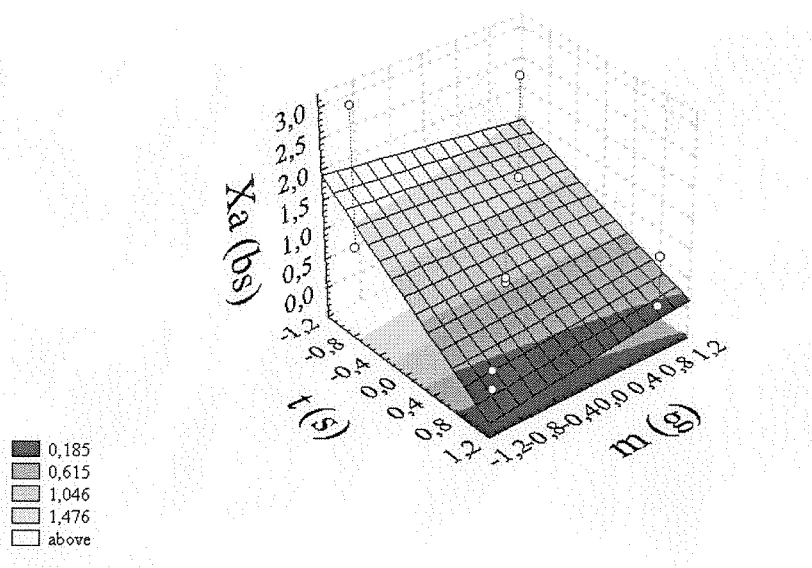


Figura C5: Superfície de resposta para o conteúdo de umidade,  $X_a$  (bs). Efeito do tempo de fritura ( $t$ ) e da massa de lodo ( $m$ )

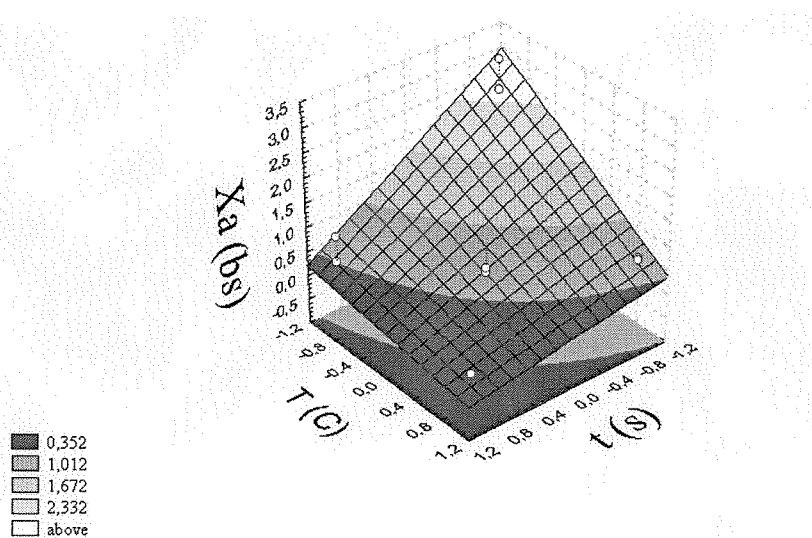


Figura C6: Superfície de resposta para o conteúdo de umidade,  $X_a$  (bs). Efeito da temperatura do óleo ( $T$ ) e do tempo de fritura ( $t$ )

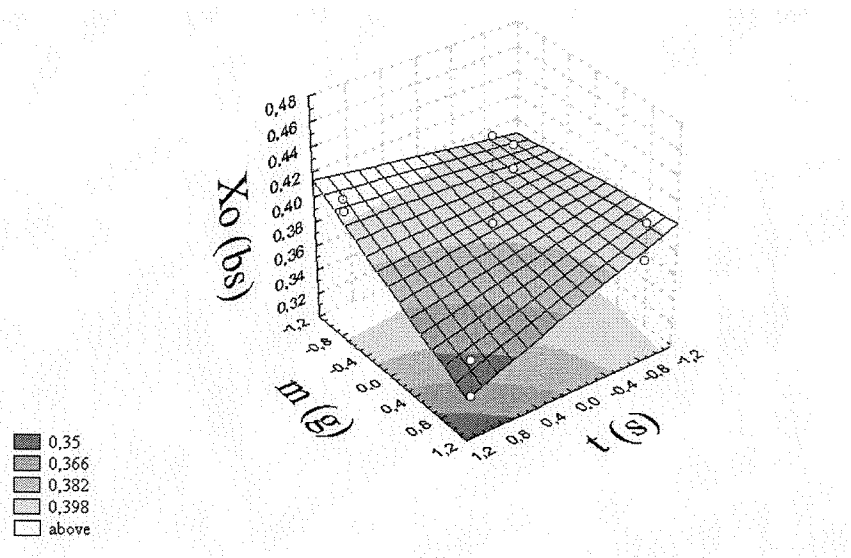


Figura C7: Superfície de resposta para o conteúdo de óleo,  $X_o$  (bs). Efeito do tempo de fritura ( $t$ ) e da massa de lodo ( $m$ )

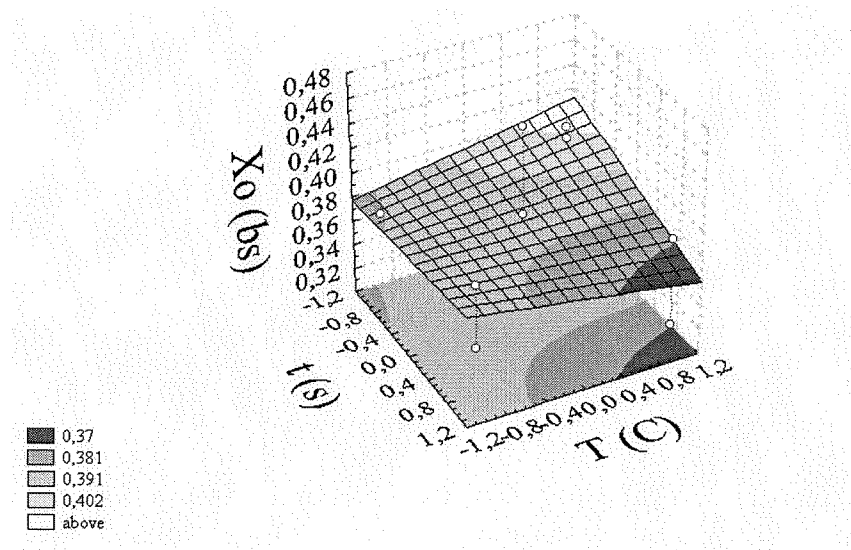


Figura C8: Superfície de resposta para o conteúdo de óleo,  $X_o$  (bs). Efeito da temperatura do óleo ( $T$ ) e do tempo de fritura ( $t$ )

## C2 – Planejamento Experimental II

Este anexo contém as curvas de secagem obtidas durante a realização do Planejamento Experimental II (Item 5.3.2).

### 1) Curvas de $X_{abu}$ versus $t$

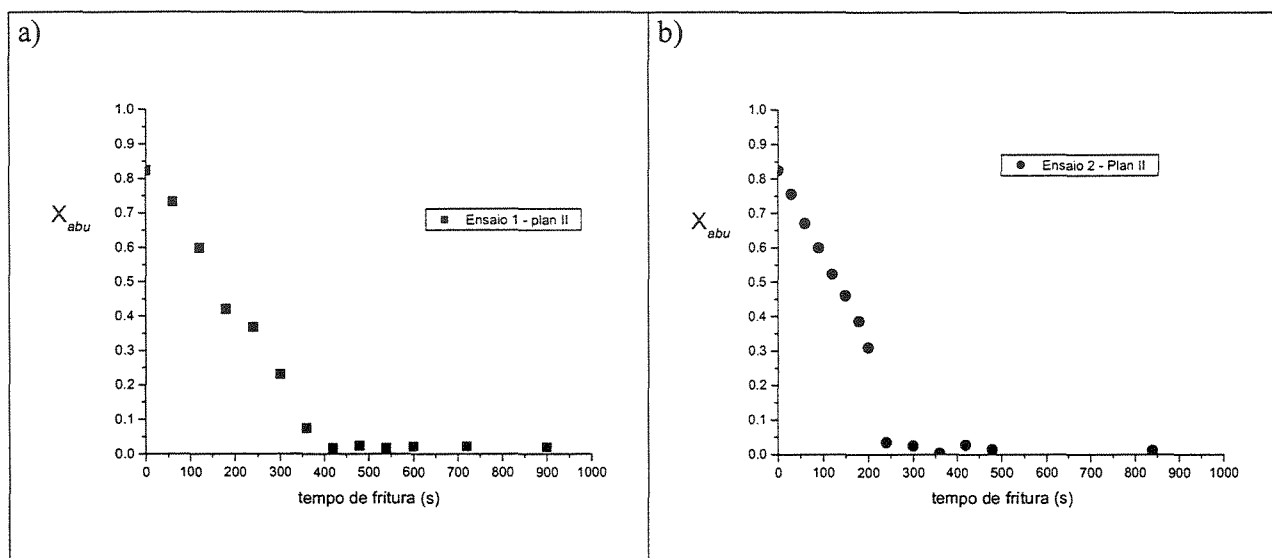


Figura C9: Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 1 e b) ensaio 2

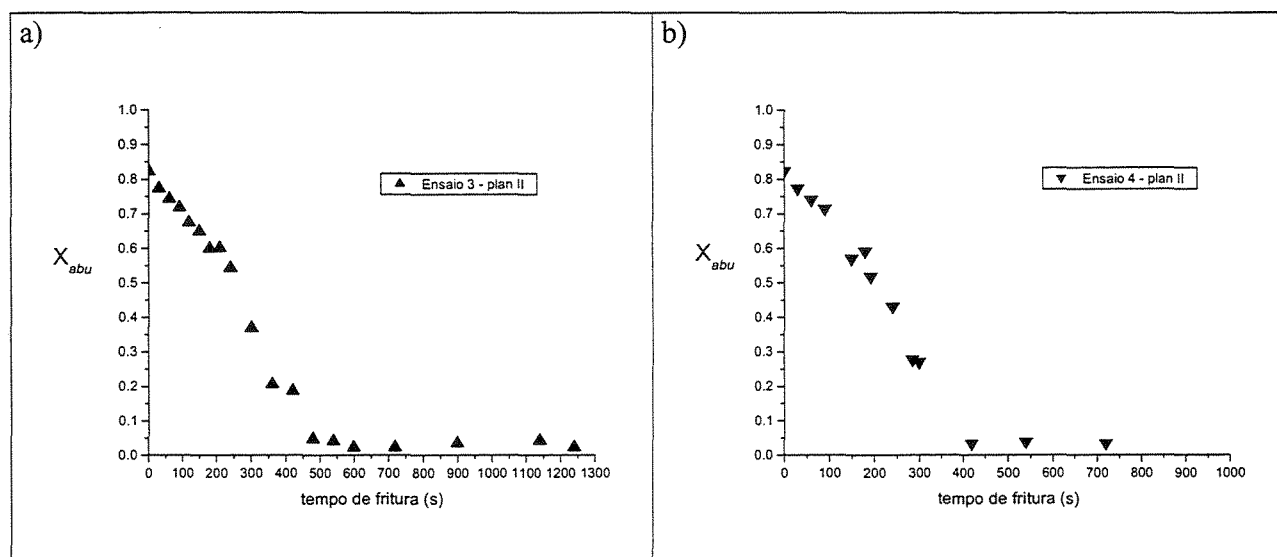


Figura C10: Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 3 e b) ensaio 4

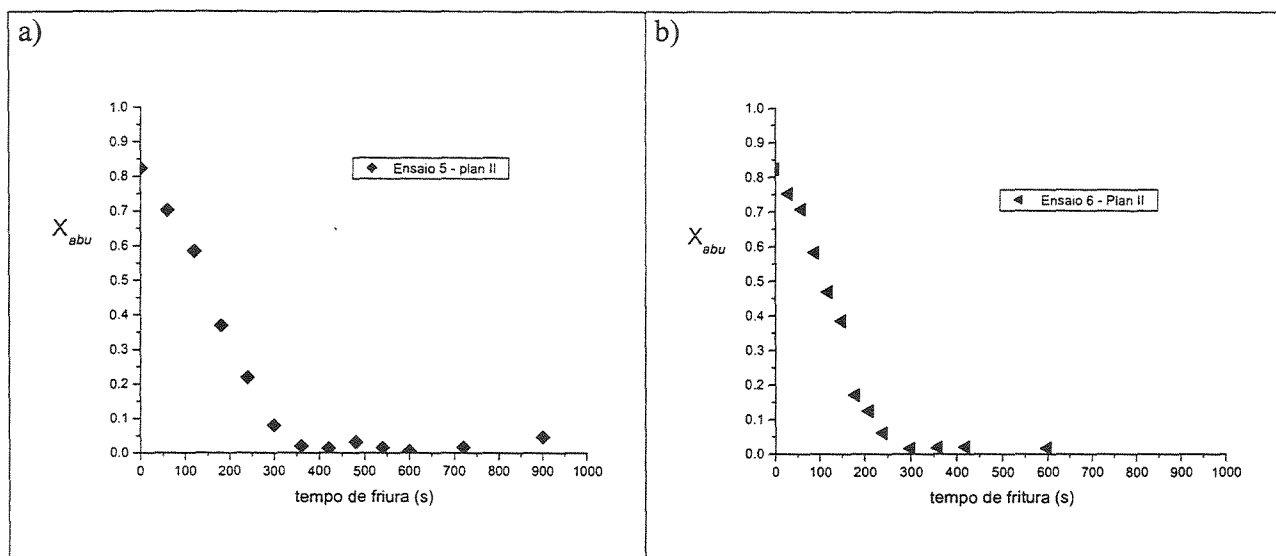


Figura C11: Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 5 e b) ensaio 6

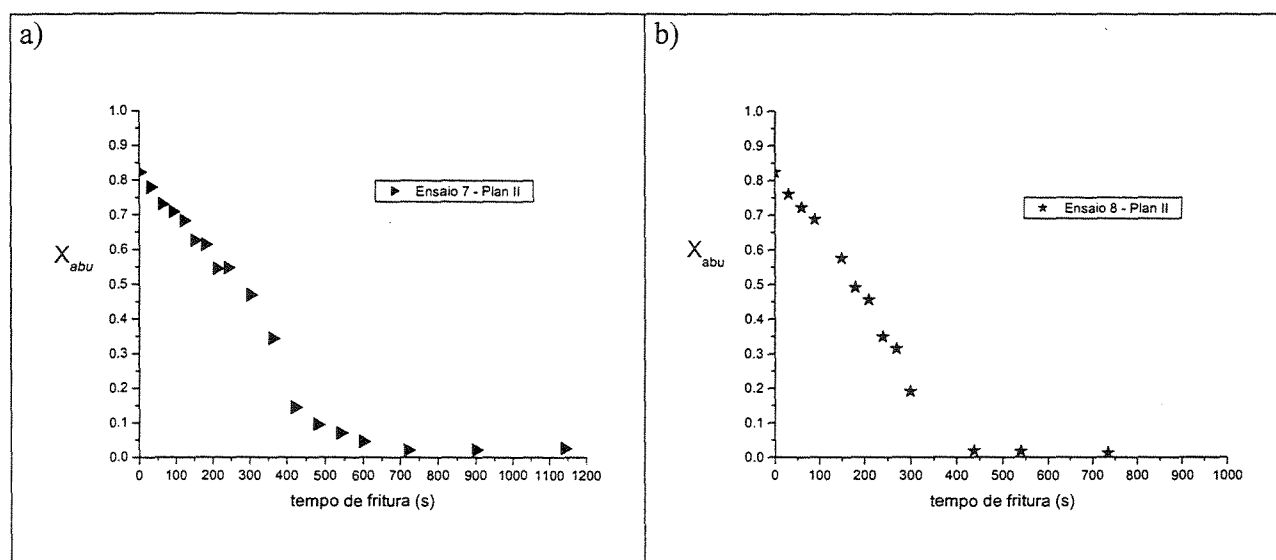


Figura C12: Variação do conteúdo de umidade do material (base úmida) em função do tempo de fritura. a) ensaio 7 e b) ensaio 8



## 2) Curvas de $X_{abs}^*$ versus t

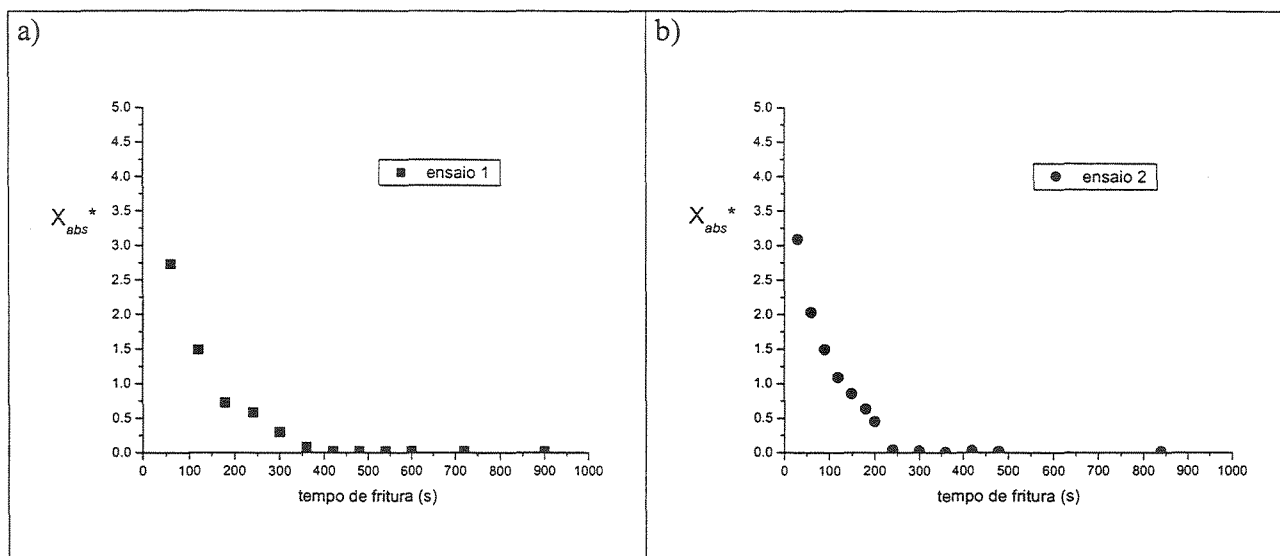


Figura C13: Variação do conteúdo de umidade do material (base seca\*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 1 e b)ensaio 2

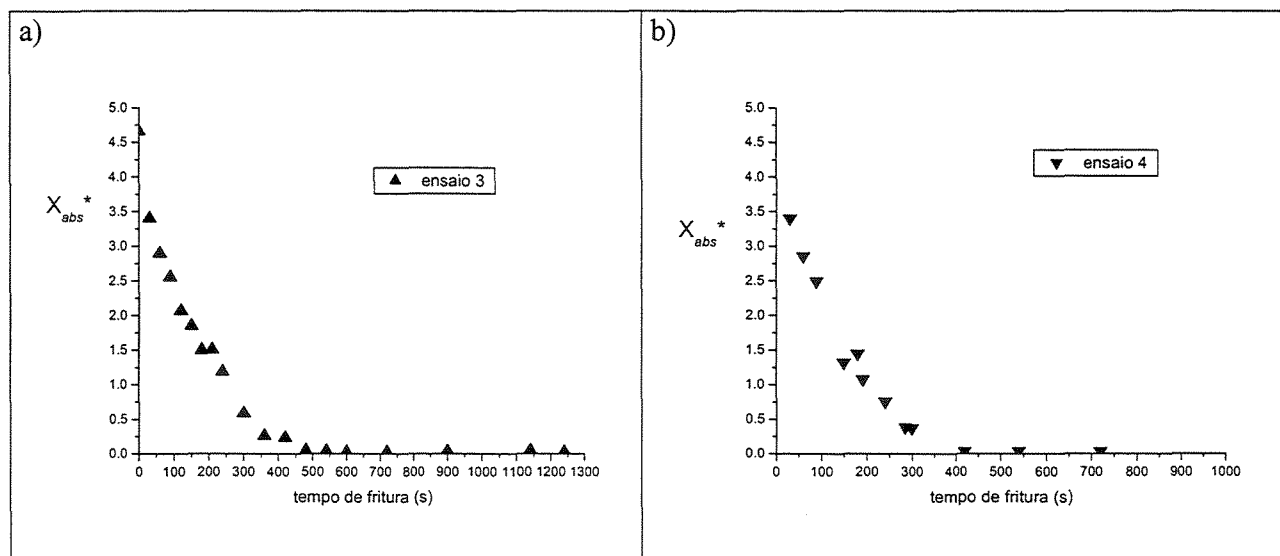


Figura C14: Variação do conteúdo de umidade do material (base seca\*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 3 e b)ensaio 4

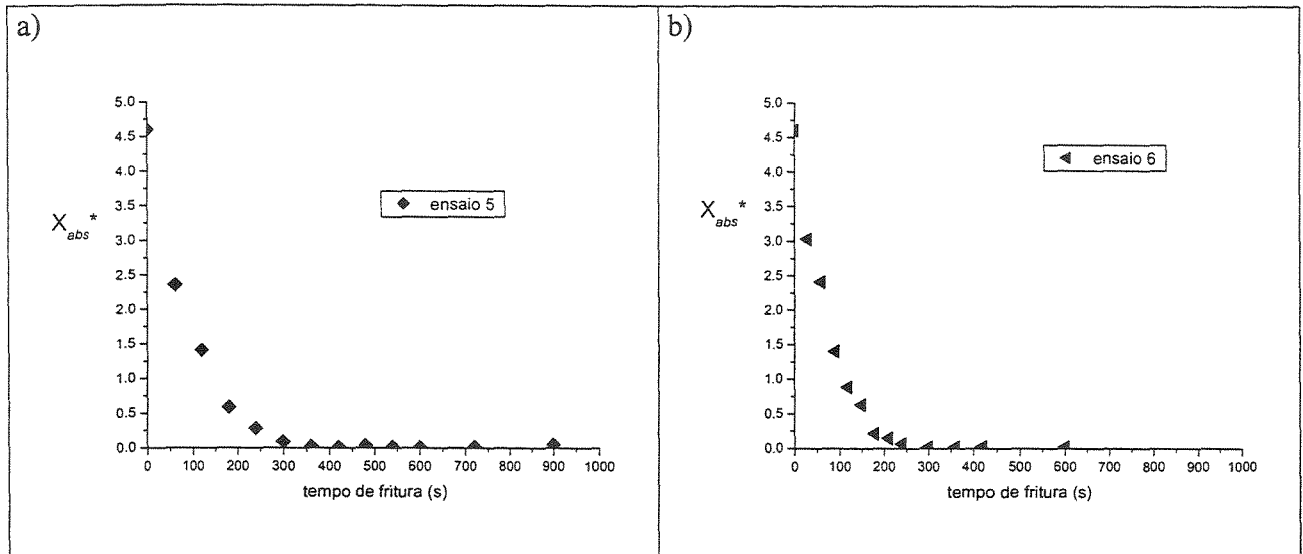


Figura C15: Variação do conteúdo de umidade do material (base seca\*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 5 e b)ensaio 6

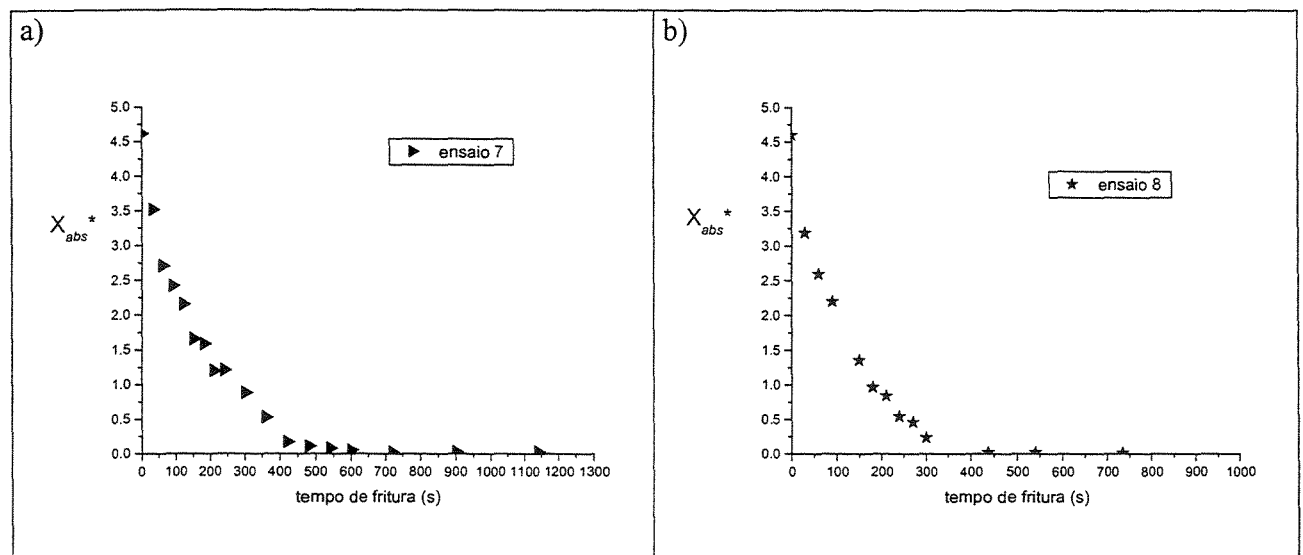


Figura C16: Variação do conteúdo de umidade do material (base seca\*) em função do tempo de fritura. a) ensaio 7 e b)ensaio 8

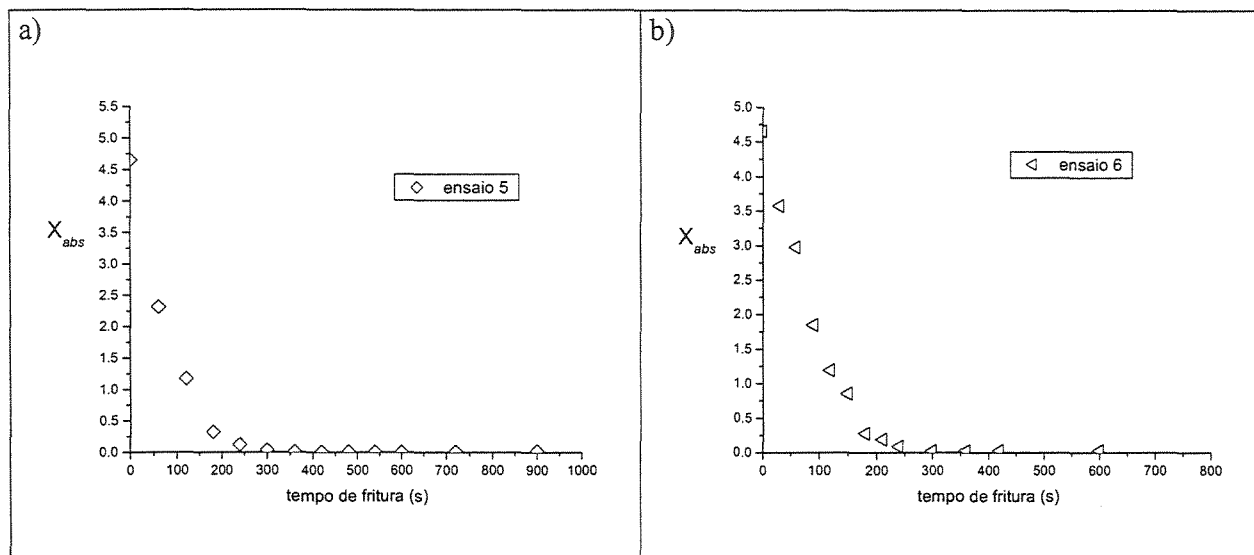
3) Curvas de  $X_{abs}$  versus  $t$ 

Figura C17: Variação do conteúdo de umidade do material (base seca) em função do tempo de fritura. a) ensaio 5 e b)ensaio 6

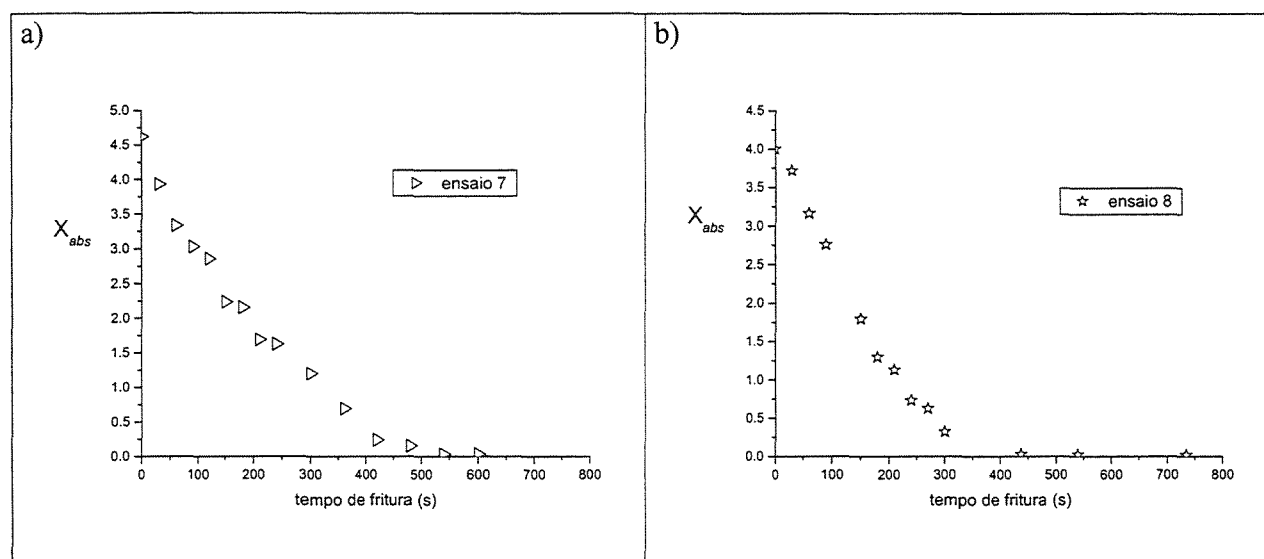


Figura C18: Variação do conteúdo de umidade do material (base seca) em função do tempo de fritura. a) ensaio 7 e b)ensaio 8

#### 4) Efeito do tipo de óleo usado na fritura

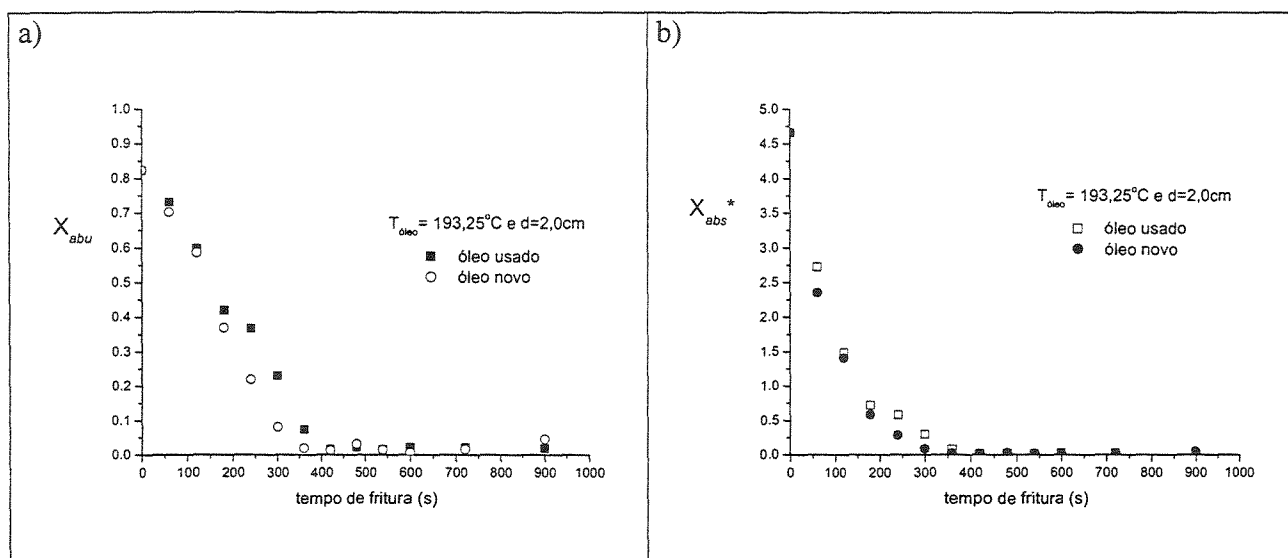


Figura C19: Curvas de secagem do lodo, fritura a  $T_{\text{óleo}} = 193,25^{\circ}\text{C}$  e diâmetro do cilindro de 2,0cm

. a) base úmida e b) base seca\*

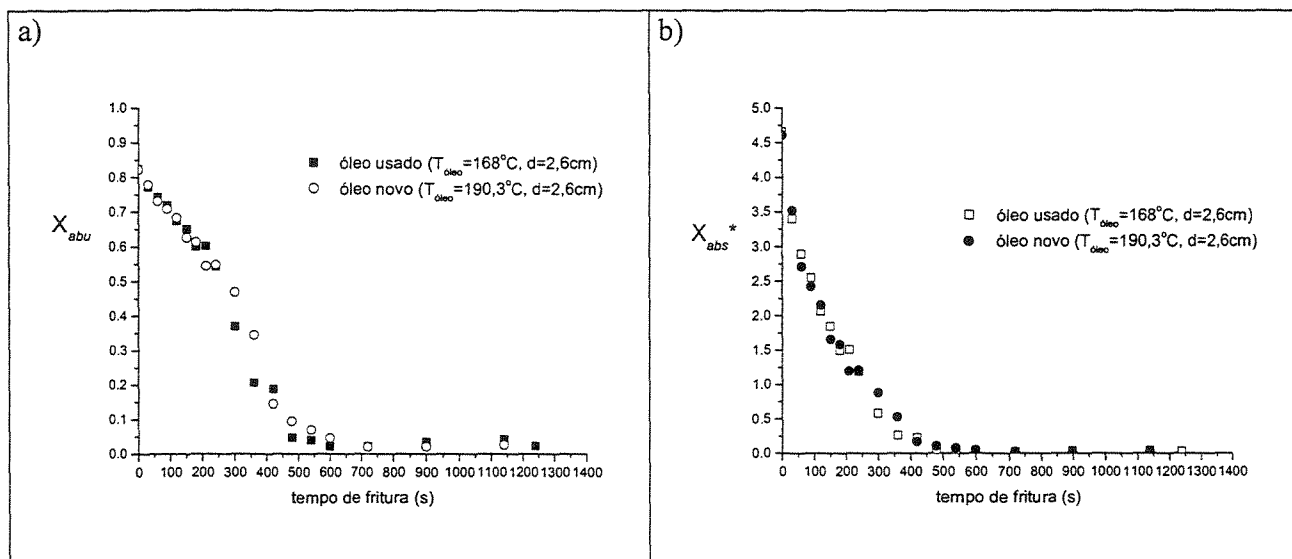


Figura C20: Curvas de secagem do lodo, fritura a  $T_{\text{óleo}} = 168$  e  $190,3^{\circ}\text{C}$  e diâmetro do cilindro de

2,6cm . a) base úmida e b) base seca\*

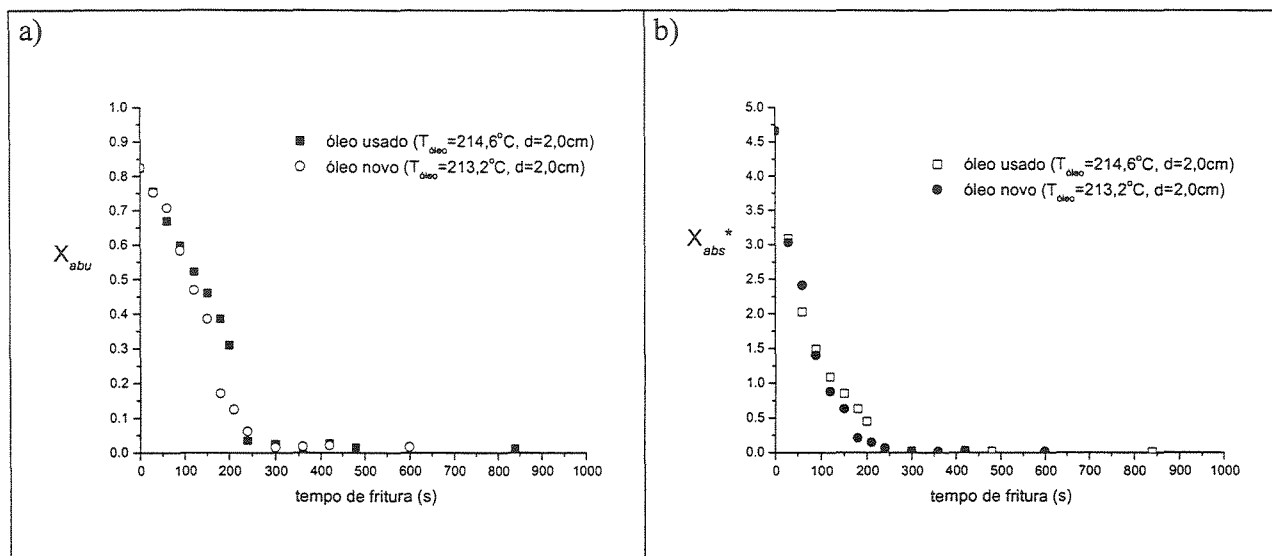


Figura C21: Curvas de secagem do lodo, fritura a  $T_{óleo}=214,6$  e  $213,2^{\circ}\text{C}$  e diâmetro do cilindro de  $2,0\text{cm}$  . a) base úmida e b) base seca\*

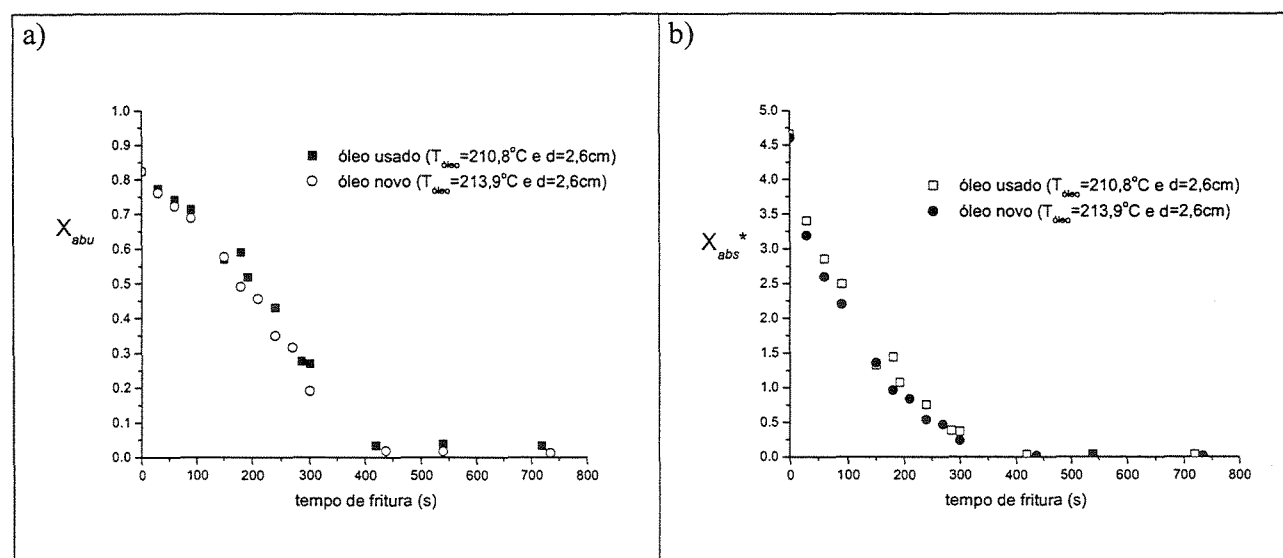


Figura C22: Curvas de secagem do lodo, fritura a  $T_{óleo}=210,8$  e  $213,9^{\circ}\text{C}$  e diâmetro do cilindro de  $2,6\text{cm}$  . a) base úmida e b) base seca\*

### 5) Efeito da temperatura do óleo de fritura

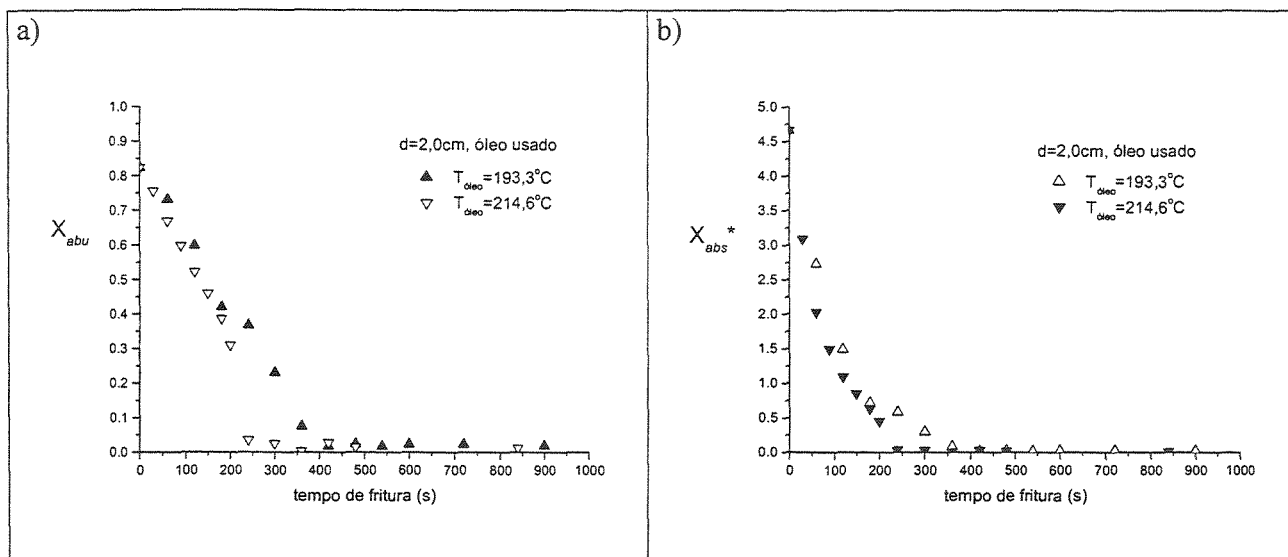


Figura C23. Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,0cm e óleo usado. a) base úmida e b) base seca\*

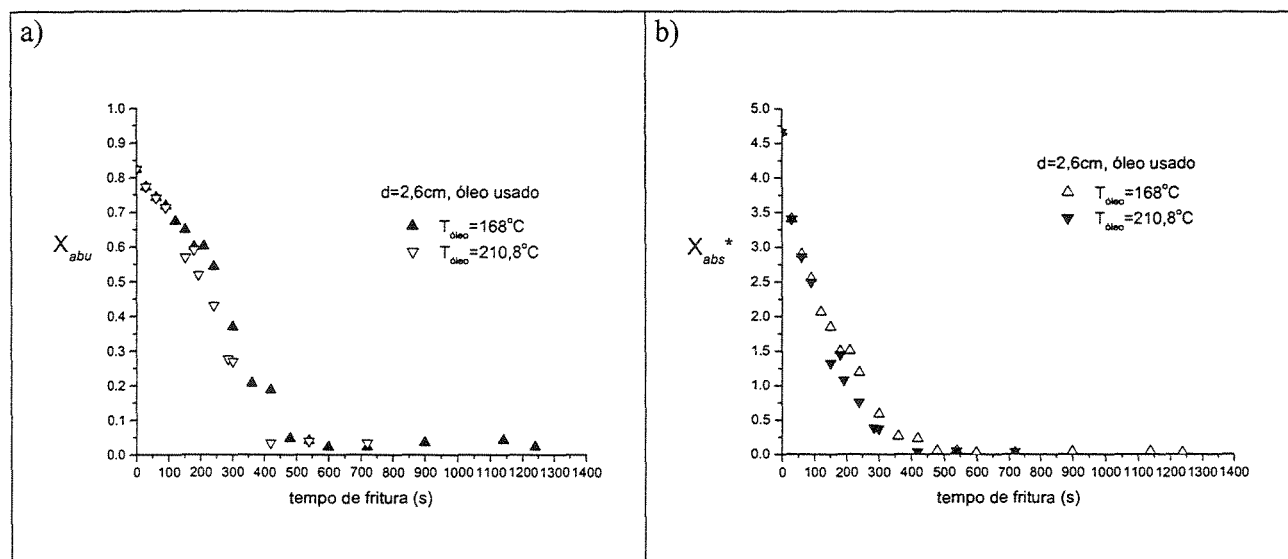


Figura C24: Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,6cm e óleo usado. a) base úmida e b) base seca\*

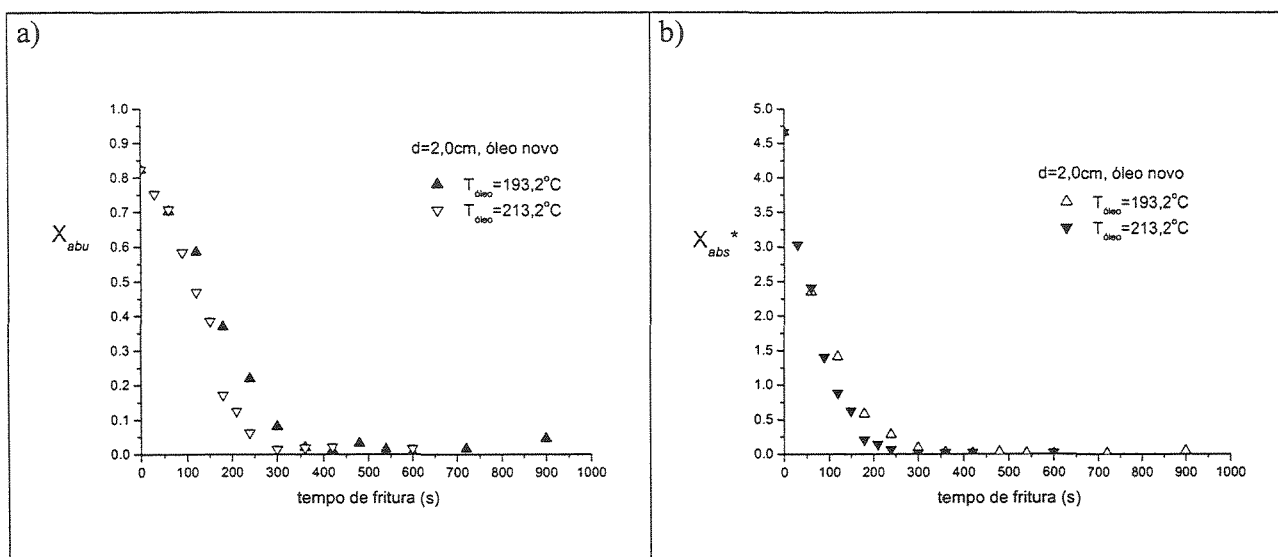


Figura C25: Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,0cm e óleo novo. a) base úmida e b) base seca\*

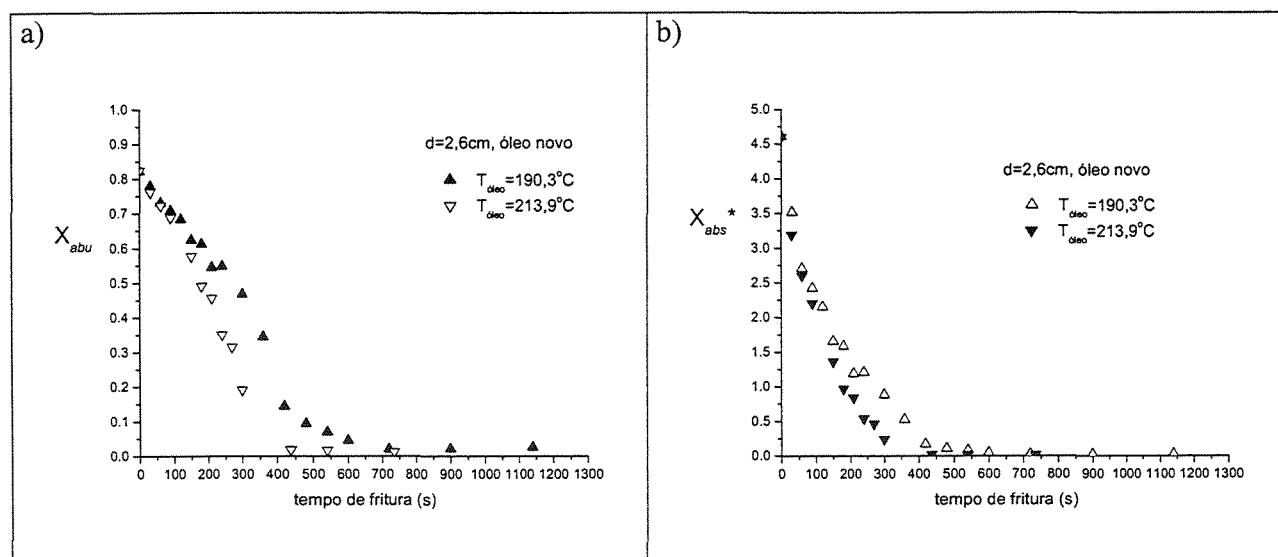


Figura C26: Curvas de secagem do lodo a temperaturas diferentes, diâmetro do cilindro de 2,6cm e óleo novo. a) base úmida e b) base seca\*

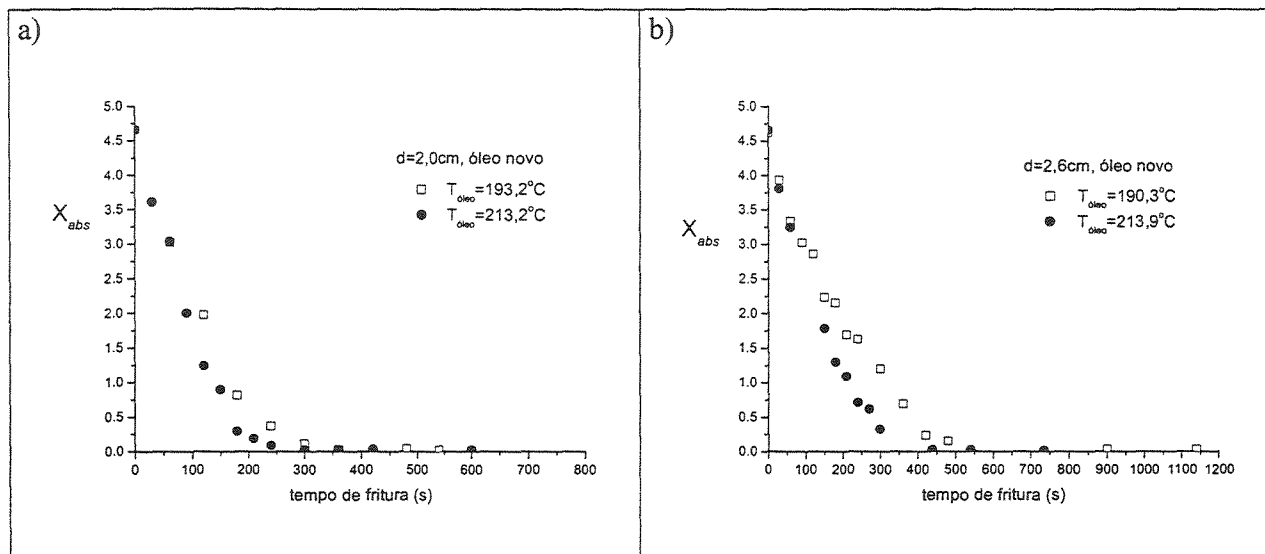


Figura C27: Verificação do efeito da temperatura nas curvas (base seca). a)  $d=2,0\text{cm}$  e b)  $d=2,6\text{cm}$

## 6) Efeito do diâmetro do cilindro de lodo

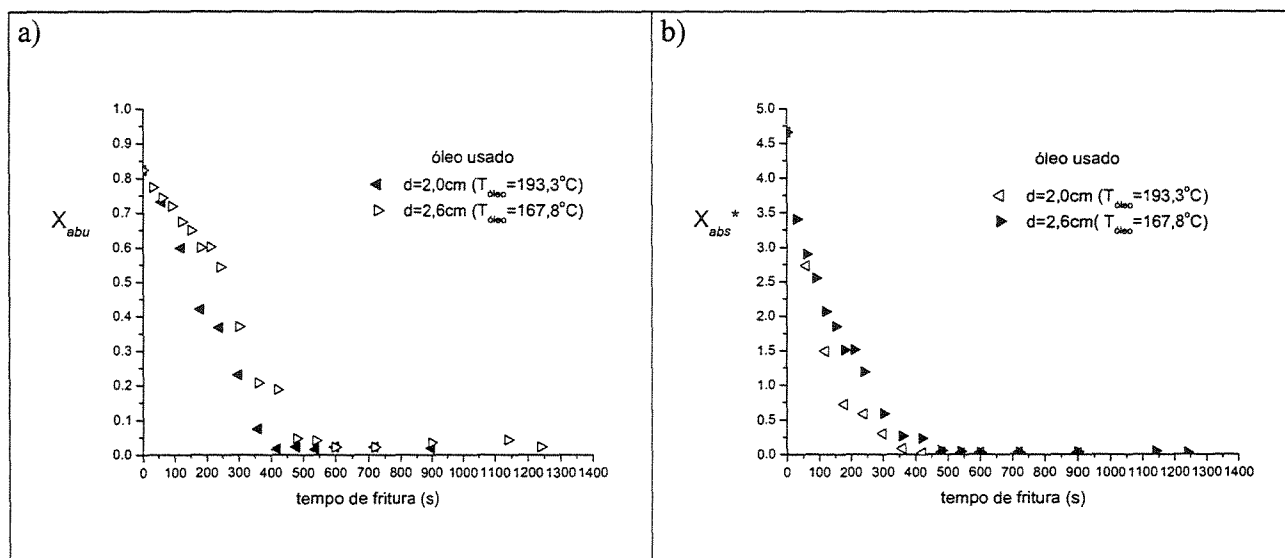


Figura C28: Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes,  $T_{\text{óleo}}$  = nível inferior. a) base úmida e b) base seca\*



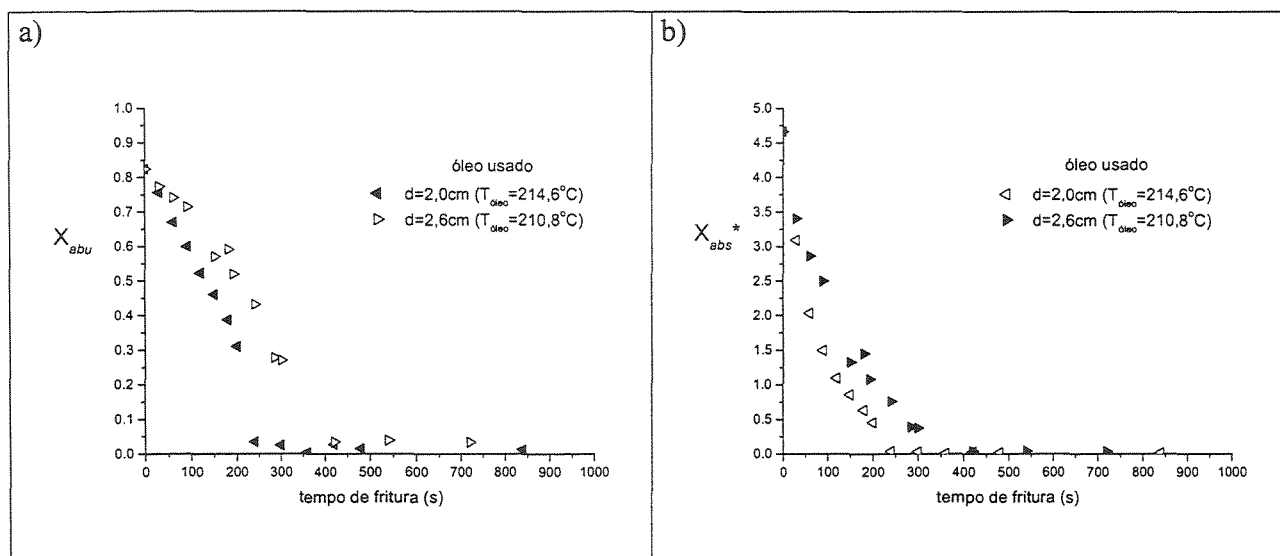


Figura C29: Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes,  $T_{\text{óleo}} = \text{nível superior}$ , e óleo usado. a) base úmida e b) base seca\*

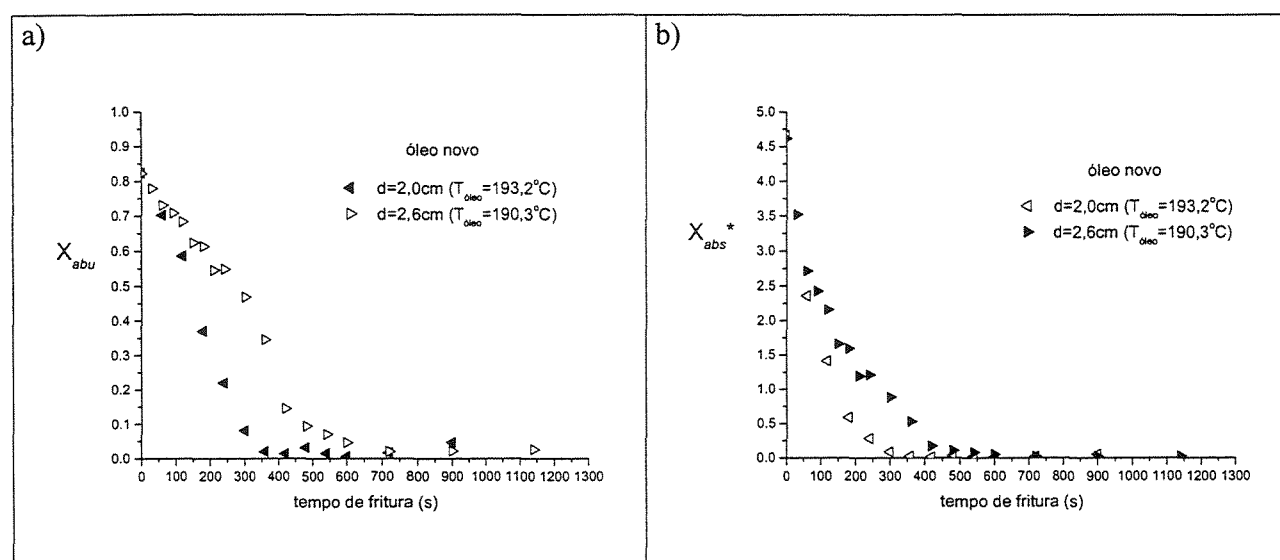


Figura C30: Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes,  $T_{\text{óleo}} = \text{nível inferior}$ , e óleo novo. a) base úmida e b) base seca\*

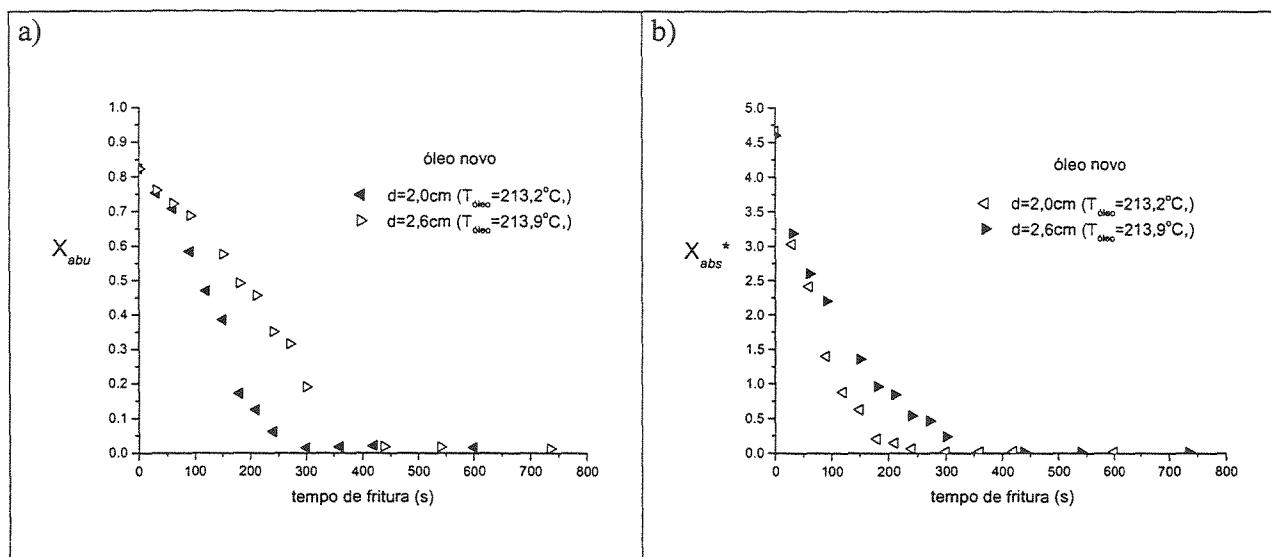


Figura C31: Curvas de secagem do lodo com diâmetros do cilindro diferentes,  $T_{\text{óleo}}=200^{\circ}\text{C}$ , e óleo novo. a) base úmida e b) base seca\*

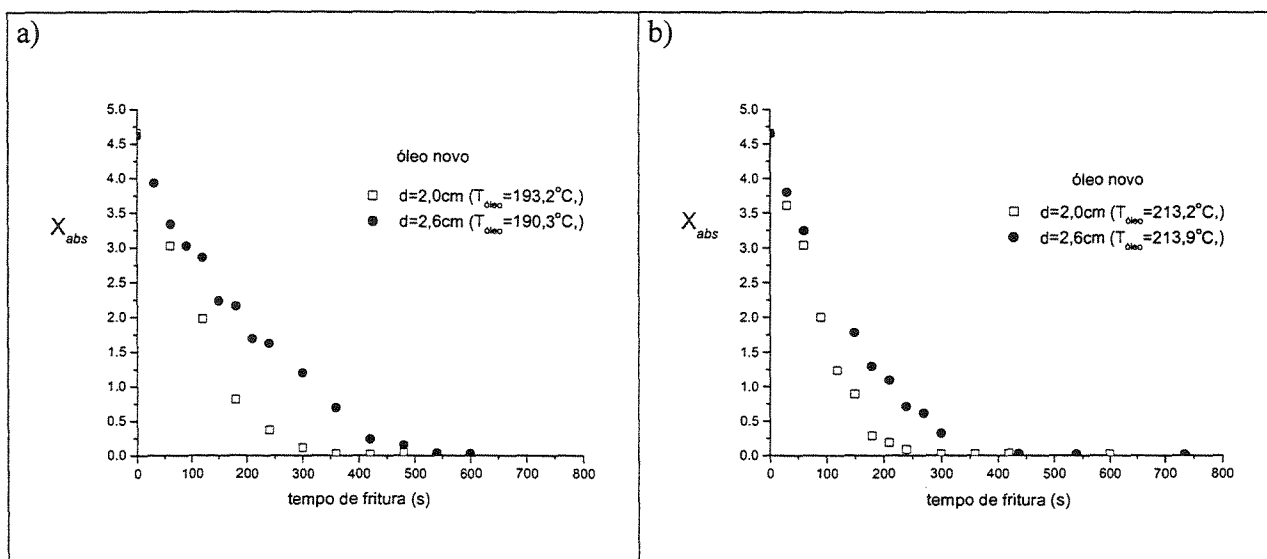


Figura C32: Verificação do efeito do diâmetro nas curvas (base seca). a)  $T=\text{nível inferior}$  e b)  $T=\text{nível superior}$

# 7) Relação entre o conteúdo de óleo e o conteúdo de umidade no material frito

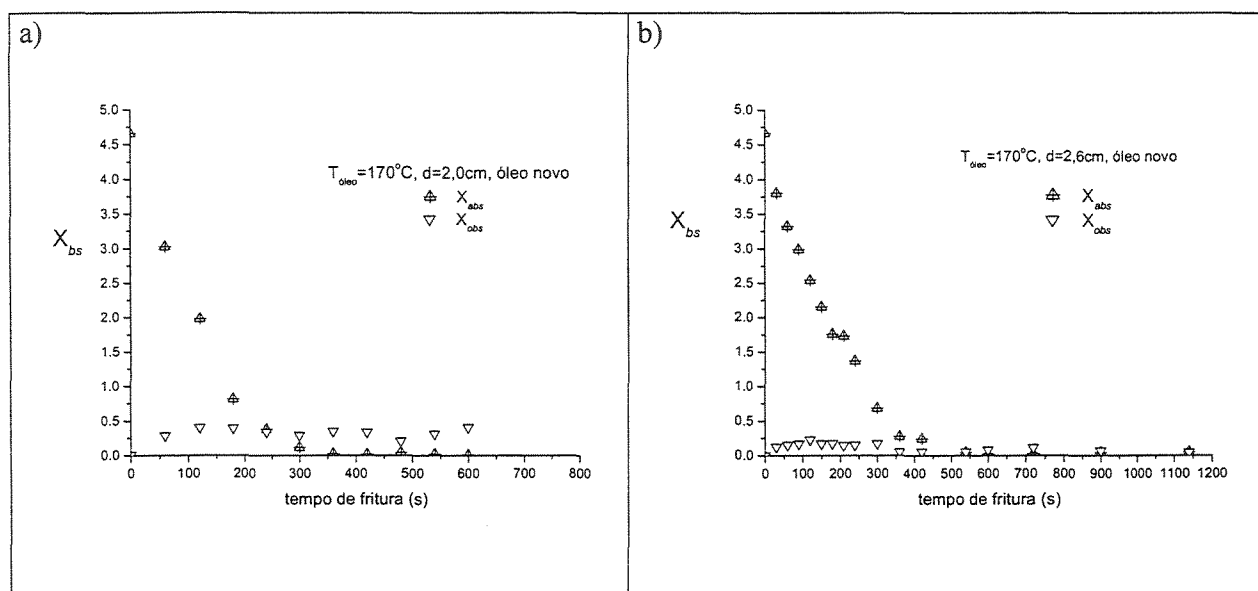


Figura C33: Curvas de secagem do lodo e de absorção de óleo. a) ensaio 5 e b) ensaio 7

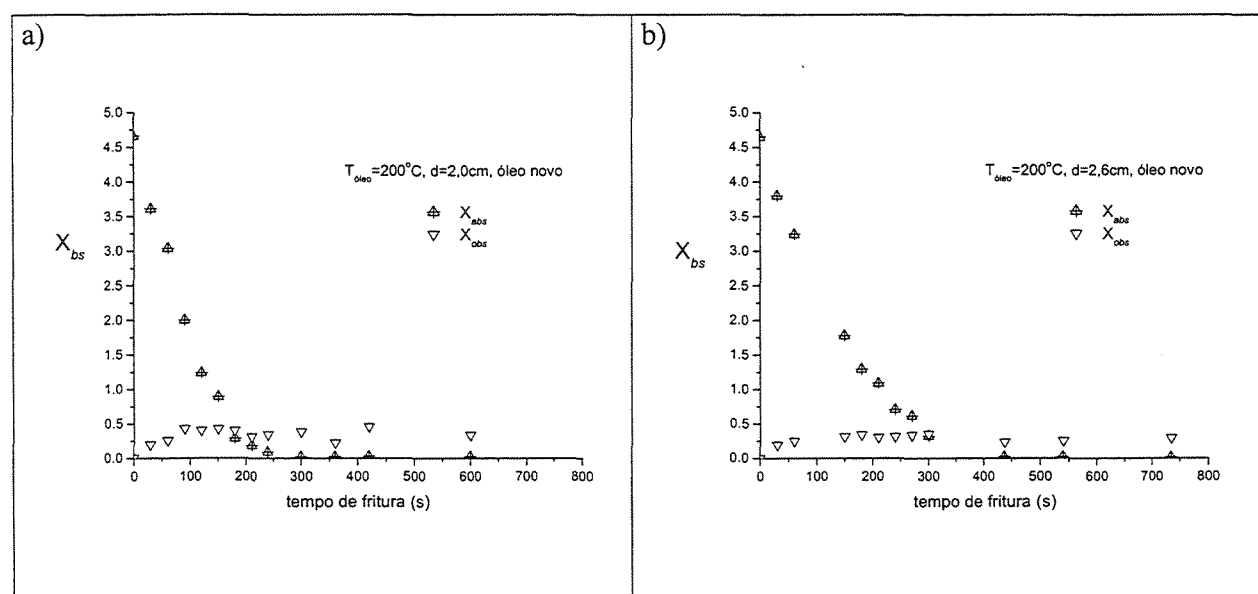


Figura C34: Curvas de secagem do lodo e de absorção de óleo. a) ensaio 6 e b) ensaio 8

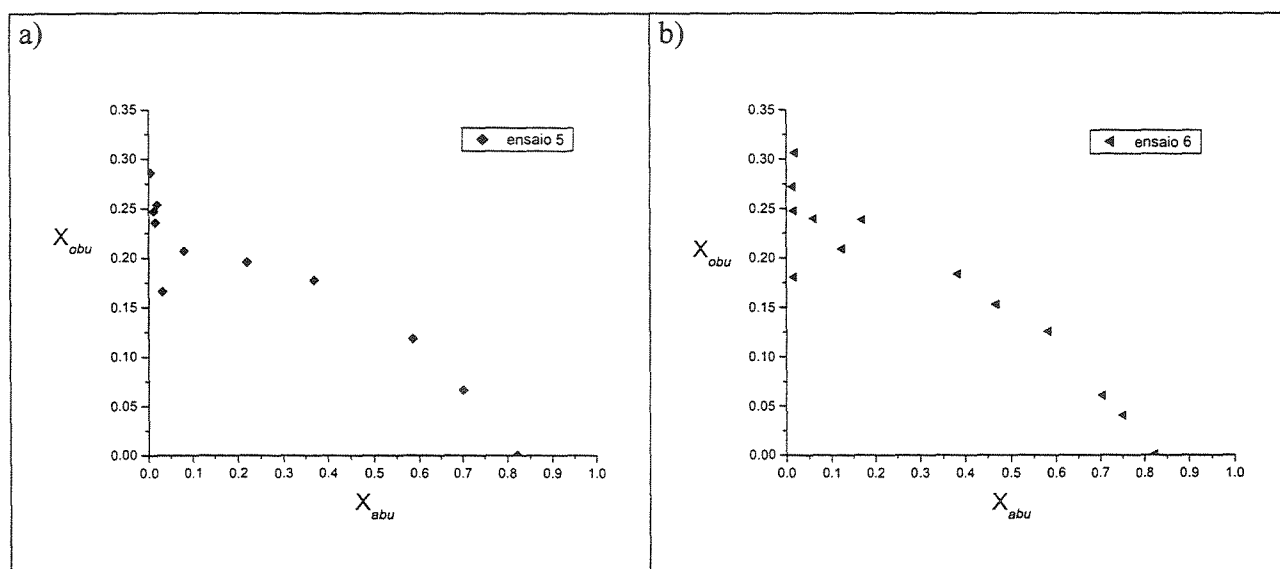


Figura C35: Conteúdo de óleo em função da água presente no material. a) ensaio 5 e b) ensaio 6

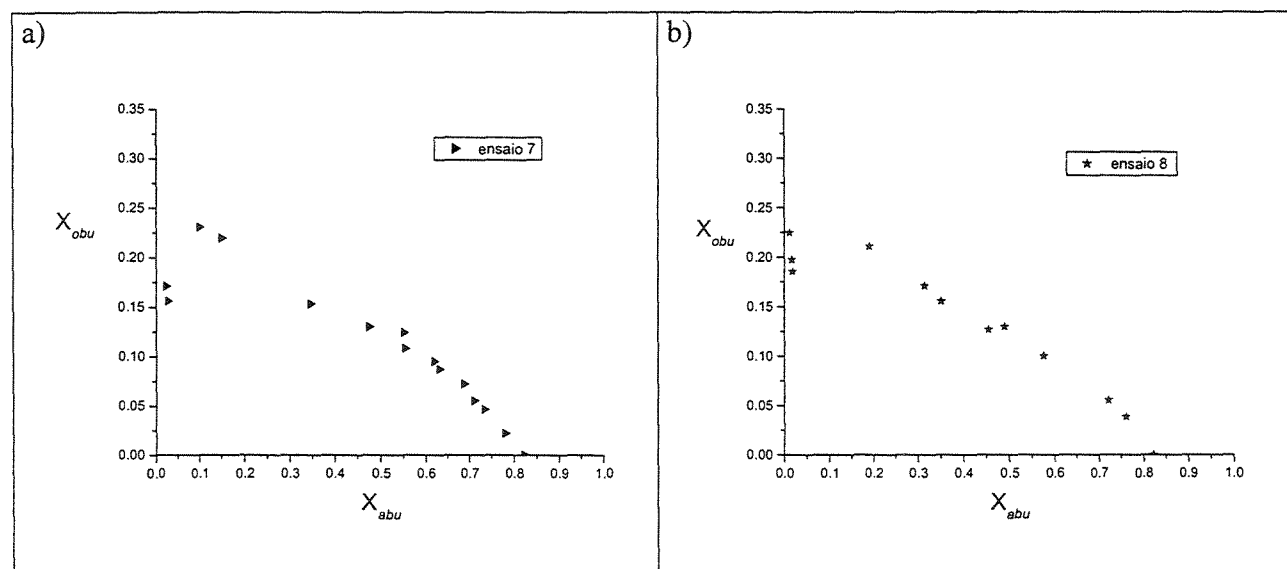


Figura C36: Conteúdo de óleo em função da água presente no material. a) ensaio 7 e b) ensaio 8