

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARINA KRIGUEL

**DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA E DA CURVA DE SECAGEM DE
LIDOS E ESCUMAS SANITÁRIOS**



CURITIBA

2015

KARINA KRIGUEL



**DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA E DA CURVA DE SECAGEM DE
LIDOS E ESCUMAS SANITÁRIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial da Universidade Federal do Paraná, em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial e a Universidade de Stuttgart, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Karen Juliana do Amaral
Coorientador: Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti

CURITIBA

2015

K92d Kriguel, Karina

Determinação da difusidade térmica e da curva de secagem de lodos e escumas sanitários / Karina Kriguel. – Curitiba, 2015.
102 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia em parceria com a Universidade de Stuttgart e o Sistema Nacional de Aprendizagem Industrial do Paraná. Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Karen Juliana do Amaral

Coorientador: Gustavo Rafael Collere Possetti

Bibliografia: p. 93-98

1. Difusividade térmica. 2. Secagem. 3. Lodo. I. Amaral, Karen Juliana do. II. Possetti, Gustavo Rafael Collere. III. Título.

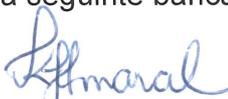
CDD 697.93

TERMO DE APROVAÇÃO

KARINA KRIGUEL

DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA E DA CURVA DE SECAGEM DE LODOS E ESCUMAS SANITÁRIOS

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI/PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:



Prof^a. Dr^a. KAREN JULIANA DO AMARAL
PPGMAUI/UNI STUTT



Prof. Dr. GUSTAVO RAFAEL COLLERE POSSETTI
SANEPAR/ISAE



Prof^a. Dr^a. REGINA WEINSCHUTZ
PPGMAUI/UFPR



Prof. Dr. CLEVERSON VITORIO ANDREOLI
SANEPAR/ISAE/FGV



Prof^a. Dr^a. MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE
Coordenadora do TC/PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 13 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por guiar os meus passos e por dar força para superar os obstáculos encontrados ao longo do caminho.

Aos meus familiares, especialmente à minha mãe Maria Lindamir Kriguel pelo carinho, dedicação e atenção. Ao meu pai, Gabriel Harlei Kriguel (*in memoriam*), que de onde estiver, tenho certeza, está olhando e cuidando de mim. Ao meu irmão Rodrigo Kriguel.

À minha orientadora, Prof^a. Dr^a. Karen Juliana do Amaral pelo profissionalismo, atenção e apoio nas etapas da elaboração deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti, pelo incentivo, conhecimento, atenção e apoio em todas as etapas da elaboração deste trabalho.

À Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), em especial à Diretoria de Meio Ambiente e Ação Social e à Diretoria de Operações, por permitir o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento da Sanepar.

Aos colaboradores, colegas e amigos das ETEs e ETAs da Sanepar, por auxiliarem nas amostragens para os experimentos, em especial à Unidade de Serviço de Esgoto de Curitiba e Região Metropolitana (USEG).

Aos amigos que conheci no curso de mestrado e que estiveram comigo durante todo o período de estudo, compartilhando diversos momentos.

Aos demais amigos que mesmo de longe torceram, deram força e apoiaram do início ao fim este projeto.

Por fim, a todos que participaram direta ou indiretamente da realização deste trabalho.

*Bom mesmo é ir à luta com determinação,
abraçar a vida com paixão, perder com classe
e vencer com ousadia, porque o mundo
pertence a quem se atreve e a vida é muito
para ser insignificante.*

Charles Chaplin

RESUMO

Os processos de tratamento de água e de esgoto geram resíduos, tais como lodo e espuma sanitários. O gerenciamento desses materiais, no entanto, não é trivial e pode representar mais da metade dos custos operacionais de uma planta. Por isso, nos últimos anos, alternativas para manejo e disposição final de lodos e de escumas vêm sendo amplamente discutidas no setor de saneamento. A secagem térmica e a pasteurização são técnicas que, além de promover a higienização, reduzem o volume do lodo. No entanto, o dimensionamento de equipamentos de secagem térmica depende do levantamento de algumas propriedades térmicas intrínsecas aos materiais que se pretende processar. Dentre essas propriedades destacam-se a difusividade térmica e a curva de secagem. Cabe destacar que estudos referentes à curva de secagem e difusividade térmica ainda são incipientes, sobretudo aqueles que se referem a lodos e escumas gerados no Brasil. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi quantificar experimentalmente a difusividade térmica e a curva de secagem de lodos oriundos dos processos de tratamento de água e de esgoto, bem como de escumas, com o intuito de estabelecer parâmetros para projetos de secagem e higienização desses materiais por via térmica. Para tanto, inicialmente, coletaram-se amostras de lodos provenientes do tratamento anaeróbico e do tratamento aeróbico de esgoto doméstico, bem como amostras de espuma anaeróbia e de lodo oriundo do tratamento de água. Para a determinação da curva de secagem dos materiais coletados, utilizou-se um medidor de umidade termogravimétrico programado para operar a 103 e a 140 °C. Para a determinação da difusividade térmica dos lodos e escumas foram obtidas cinco concentrações diferentes de sólidos totais por meio de secagem em estufa a 103 °C e, em seguida, mensuraram-se as difusividades térmicas dessas amostras, considerando-as como meios porosos de baixa condutividade térmica. As curvas de secagem demonstraram que o lodo aeróbico possui a secagem mais acelerada dentre as amostras avaliadas, enquanto que o lodo de ETA apresenta maior dificuldade de desidratação. Verificou-se que o tempo de secagem é dependente da temperatura e que a elevação para 140 °C reduz o tempo de secagem dos lodos e da espuma. Os resultados de difusividade térmica demonstraram que o lodo aeróbico possui os menores valores, dentre as amostras avaliadas, apresentando os resultados entre $(0,94 \pm 0,09)$ a $(2,14 \pm 0,02) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para as concentrações de $(0,90 \pm 0,10)$ e $(1,5 \pm 0,17)\%$ de sólidos totais, respectivamente, enquanto que a espuma apresenta os maiores valores, sendo $(1,47 \pm 0,06)$ a $(2,24 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para as concentrações de $(80,9 \pm 0,18)$ e $(18,4 \pm 0,62)\%$, respectivamente. Além disso, constatou-se que as difusividades térmicas dos lodos e da espuma dependem do teor de sólidos totais neles contidos e que o aumento do teor de sólidos totais dificulta o fluxo de calor pelos materiais. Modelos de regressão foram propostos para descrever tal comportamento.

Palavras-chave: Difusividade térmica. Curva de secagem. Secagem térmica. Lodos. Escumas.

ABSTRACT

The water and sewage treatment processes generate waste, such as sanitary sludge and scum. The management of these materials, however, is not trivial and may represent more than half of the operating costs of a plant. Therefore, in last few years, alternatives for the management and final disposal of sludge and scum have been largely discussed in the sanitation sector. The thermal drying and pasteurization are techniques that promote hygiene and reduce bulk sludge and scum. However, the dimensioning of thermal drying equipment depends on the knowing of some thermal properties inherent to the materials. Among these properties are the thermal diffusivity and the drying curve. It should be reported that studies about drying curve and thermal diffusivity are still incipient, especially those that refer to sludge and scum generated in Brazil. In a sense, the aim of this study was to quantify, by mean of experiments, the thermal diffusivity and the sludge drying curve from the water and sewage treatment process, as well as scum, in order to establish parameters for drying and hygienization projects of these materials by thermal means. For that, initially, some samples of sludges from both anaerobic and aerobic treatment of domestic sewage, anaerobic scum and sludge from the water treatment were collected. For the determination of the drying curve was used a moisture meter thermogravimetric programmed to operate at 103 and 140 °C. To determine the thermal diffusivity of the sludges and scum were obtained five different concentrations of total solids by drying in an oven at 103 ° C. Then the thermal diffusivities were measured, considering them as porous media with low thermal conductivity. The drying curves demonstrated that aerobic sludge has a faster drying, when compared with other evaluated samples, while the water sludge is more difficult to dehydration. It was found that the drying time depends on temperature and at 140 ° C there were a reduction on drying time of the sludges and scum. The results demonstrated that the aerobic sludge has a lower thermal diffusivity, whith values between $(0,94 \pm 0,09)$ to $(2,14 \pm 0,02) \times 10^{-3} \text{.cm}^2 \text{.s}^{-1}$, for concentrations of $(0,90 \pm 0,10)$ and $(1,5 \pm 0,17)\%$ of total solids, respectively, while the scum has the higher values, whith values between $1,47 \pm 0,06)$ to $(2,24 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \text{.s}^{-1}$, for concentrations of $(80,9 \pm 0,18)$ e $(18,4 \pm 0,62)\%$, respectively . Besides, it was determined that the thermal diffusivity of the sludges and scum depend on the total solids content and the increase of total solids content decrease the heat flow through the materials. Empiric regression models were computed to describe such behavior.

Key-words: Thermal diffusivity. Drying curve. Thermal drying. Sludge. Scum.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO LODO.....	32
FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DA SECAGEM DIRETA POR CONVECÇÃO	38
FIGURA 3 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DA SECAGEM INDIRETA POR CONDUÇÃO	39
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM	51
FIGURA 5 - FOTO DO MEDIDOR DE UMIDADE TERMOGRAVIMÉTRICO.....	52
FIGURA 6 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA AVALIAÇÃO DA CURVA DE SECAGEM	53
FIGURA 7 - FLUXOGRAMA PARA OS ESTUDOS DAS DIFUSIVIDADES TÉRMICAS DAS AMOSTRAS	54
FIGURA 8 - AQUISITOR DE DADOS	55
FIGURA 9 - ARRANJO EXPERIMENTAL COM TUBO DE ENSAIO CONTENDO A AMOSTRA E IMERSA NO BANHO TÉRMICO	55
FIGURA 10 - DIAGRAMA DO PROCEDIMENTO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA	57

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RESULTADOS DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA LODO UASB + FILTRO E LODO UASB	46
TABELA 2 - DENOMINAÇÕES, ORIGENS, LOCAL DE AMOSTRAGEM E VOLUME COLETADO DE LODOS E ESCUMAS	48
TABELA 3 - CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS NAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMA	50
TABELA 4 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO A 103 °C E A 140 °C	59
TABELA 5 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DO LODO A EM 103 °C E 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA	60
TABELA 6 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO B A 103 °C E 140 °C	61
TABELA 7 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DO LODO B A 103 °C E A 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA	62
TABELA 8 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DA ESCUMA A 103 °C E A 140 °C	63
TABELA 9 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DA ESCUMA A 103 °C E A 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA	64
TABELA 10 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DA LODO C A 103 °C E A 140 °C	65
TABELA 11 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DO LODO C A 103 °C E 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA	66
TABELA 12 - SÓLIDOS TOTAIS, FIXOS E VOLÁTEIS DAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMAS E AS RELAÇÕES ENTRE SF/ST E SV/ST	70
TABELA 13 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO LODO A	74
TABELA 14 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO LODO B	78
TABELA 15 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA ESCUMA	81
TABELA 16 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO LODO C	85
TABELA 17 - VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA UMA AMPLA FAIXA DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS UTILIZANDO AS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS	88

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - CURVA DE SECAGEM DO LODO A.....	59
GRÁFICO 2 - CURVA DE SECAGEM DO LODO B.....	62
GRÁFICO 3 - CURVA DE SECAGEM DA ESCUMA	64
GRÁFICO 4 - CURVA DE SECAGEM DO LODO C	66
GRÁFICO 5 - DERIVADAS NUMÉRICAS DAS TAXAS DE VARIAÇÃO DE ST EM RELAÇÃO AO TEMPO PARA AS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMAS (a) 103 °C (b) 140 °C.....	68
GRÁFICO 6 - VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS E TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMAS EM FUNÇÃO DO TEMPO: (a) a 103 °C; (b) a 140 °C.....	69
GRÁFICO 7 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO A CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$	72
GRÁFICO 8 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LODO A CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14.....	73
GRÁFICO 9 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO A EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10.....	74
GRÁFICO 10 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODO A EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS.....	75
GRÁFICO 11 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO B CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$	76
GRÁFICO 12 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LODO B CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE	

SÓLIDOS TOTAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14.....	77
GRÁFICO 13 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO B EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10.....	77
GRÁFICO 14 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODO B EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS.....	78
GRÁFICO 15 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE ESCUMA CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^{\circ}\text{C}$	79
GRÁFICO 16 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE ESCUMA EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14.....	80
GRÁFICO 17 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE ESCUMA EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10.....	81
GRÁFICO 18 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE ESCUMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS.....	82
GRÁFICO 19 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO C CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^{\circ}\text{C}$	83
GRÁFICO 20 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LODO C CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14.....	84
GRÁFICO 21 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO C EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS	

TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10	84
GRÁFICO 22 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODO C EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS	85
GRÁFICO 23 - DIFUSIVIDADES TÉRMICAS DOS LODOS E ESCUMAS	86

LISTA DE SIGLAS

ETE - Estação de tratamento de água

ETE - Estação de tratamento de esgoto

Plansab - Plano Nacional de Saneamento Básico

Sanepar - Companhia de Saneamento do Paraná

SI - Sistema Internacional

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

LISTA DE SÍMBOLOS

ε - emissividade

σ - constante de Stefan-Boltzman

A - área

b - coeficiente angular

c - calor específico por volume

D - difusividade térmica

g - grama

h - coeficiente de transferência de calor na superfície

h_{cv} - coeficiente de transferência de calor por convecção

J_0 - função de Bessel de 1º tipo e ordem zero de x

J_1 - função de Bessel de 1º tipo e 1ª ordem de x

k - condutividade térmica

L - espessura

Ma - massa de água

Md - massa de sólido seco

Qcd - calor transferido por condução

Qcv - calor transferido por convecção

Qrd - calor transferido por radiação

r_m - raio do cilindro

ST - sólidos totais

SF - sólidos fixos

SV - sólidos voláteis

T - temperatura do lodo durante o aquecimento

T_0 - temperatura inicial do lodo

T_B - temperatura da água contida no banho térmico

T_i - temperatura do lodo

T_g - temperatura do gás

T_m - temperatura do meio de transferência de calor

T_r - temperatura absoluta da superfície radiante

Ww - sólido na base úmida

Xv - raiz positiva de $XJ_1(x)$

x - constante

X - fração de massa

y - taxa da diferença de temperatura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3 REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO	21
3.1.1 Tratamento de água	21
3.1.2 Tratamento de esgoto	21
3.2 RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO	23
3.2.1 Lodo proveniente de Estação de Tratamento de Água	23
3.2.2 Lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto.....	24
3.2.3 Escumas provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto	25
3.3 GERENCIAMENTO DE LODOS E ESCUMAS	26
3.3.1 Adensamento	26
3.3.2 Estabilização	27
3.3.3 Condicionamento	27
3.3.4 Desidratação	28
3.3.5 Higienização.....	29
3.3.6 Disposição final	29
3.4 FUNDAMENTOS SOBRE SECAGEM	30
3.4.1 Generalidades	30
3.4.2 Umidade dos sólidos	31
3.4.3 Mecanismos de transferência de calor.....	35
3.4.3.1 Condução.....	36
3.4.3.2 Convecção	36
3.4.3.3 Radiação	37
3.4.4 Tecnologias de secagem térmica.....	38
3.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS	40
3.5.1 Calor específico volumétrico	40
3.5.2 Condutividade térmica.....	40
3.5.3 Difusividade térmica	41
4 METODOLOGIA	48

4.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMA.....	48
4.2 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM	51
4.3 DETERMINAÇÃO DAS DIFUSIVIDADES TÉRMICAS	53
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	59
5.1 CURVA DE SECAGEM DE LODOS E ESCUMAS	59
5.1.1 Lodo anaeróbio	59
5.1.2 Lodo aeróbio	61
5.1.3 Escuma	63
5.1.4 Lodo de ETA	65
5.1.5 Comparação entre os lodos e escumas	67
5.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE LODOS E ESCUMAS.....	72
5.2.1 Lodo anaeróbio	72
5.2.2 Lodo aeróbio	76
5.2.3 Escuma	79
5.2.4 Lodo de ETA	83
5.2.5 Comparação entre os lodos e escumas	86
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
6.1 CONCLUSÕES	90
6.2 TRABALHOS FUTUROS	92
REFERÊNCIAS.....	93
APÊNDICE 1.....	99
ANEXO 1.....	100

1 INTRODUÇÃO

Os processos de tratamento de água bruta têm por finalidade remover as impurezas presentes em sua composição para atender aos padrões de potabilidade preconizados em lei. Esses processos geram, no entanto, resíduos, tais como o lodo que precisam ser gerenciados adequadamente em prol da saúde pública e da conservação do meio ambiente. O mesmo acontece com os processos de tratamento de esgoto que geram subprodutos como o lodo e a espuma e que devem ter uma destinação adequada.

O gerenciamento desses materiais pode representar mais da metade dos custos operacionais de uma estação de tratamento de água (ETA) ou de esgoto (ETE). Por isso, nos últimos anos, alternativas para o manejo e para a disposição final de lodos e espumas vêm sendo discutidas no setor de saneamento. Dentre essas alternativas destacam-se: a reciclagem agrícola do lodo de ETE, a qual somente se viabiliza depois que os microrganismos patogênicos presentes no lodo são eliminados por meio de um processo de higienização e verificado a quantidade de metais pesados, o envio da espuma para aterros sanitários e a recuperação de áreas degradadas com o uso do lodo de ETA.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS) para o ano de 2013, o índice de atendimento com rede de água no Brasil representou 82,5%, enquanto o índice de atendimento com rede de esgoto apresentou 48,6%, sendo que apenas 69,4% dos esgotos coletados foram devidamente tratados. A região Sul do Brasil apresentou o índice de 87,5% para o atendimento com rede de água, 38% para o atendimento com rede de esgoto, sendo que 78,9% dos esgotos coletados foram realmente tratados (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2014).

O Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) possui metas a curto, médio e longo prazos, 2015, 2020 e 2030, respectivamente, com a finalidade de universalização do acesso dos brasileiros aos serviços de abastecimento de água potável e de saneamento básico. As metas do Plansab (2011) até o ano de 2030 são abastecer 98% dos domicílios do Brasil com rede de distribuição de água, atingir 88% dos domicílios servidos com rede coletora de esgoto e ampliar para 88% o tratamento de todo esgoto doméstico coletado (MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2011).

Considerando a meta de ampliação das redes de abastecimento de água, rede coletora de esgoto e do tratamento de esgoto prevista no Plansab, um crescente aumento na quantidade produzida de lodos e escumas provenientes das ETAs e ETEs será verificado. Nesse sentido, torna-se importante ter alternativas para o gerenciamento, para o tratamento e para a disposição final dos lodos e escumas.

A secagem térmica tem sido apontada como a técnica capaz de otimizar rotinas e minimizar custos operacionais inerentes ao gerenciamento de lodos e escumas. Isso porque promove simultaneamente a redução do volume e a higienização do material, dispensando o uso de produtos químicos (POSSETTI *et al.*, 2012).

Os equipamentos projetados com base na transferência de calor, como aqueles utilizados para a secagem térmica, podem ser estudados de forma analítica por meio de cálculo ou análise matemática (ÇENGEL; GHAJAR, 2012). No entanto, para um melhor dimensionamento do equipamento de secagem térmica, é importante ter conhecimento sobre a curva de secagem do material a ser processado termicamente e conhecer algumas propriedades térmicas intrínsecas ao material que se pretende processar. A difusividade térmica é uma dessas propriedades e indica a capacidade de transmissão de calor inerente a um determinado material, sendo expressa pela relação entre sua condutividade térmica e seu calor específico por unidade de volume (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

O levantamento de dados experimentais referente à curva de secagem em diferentes temperaturas é um parâmetro importante para avaliar a forma que a fração de massa de lodos e escumas perde umidade ao longo do processo de aquecimento e para verificar as vantagens quando se aplica uma temperatura mais elevada para a secagem dos materiais.

Já a determinação da difusividade térmica é um parâmetro importante para medir a velocidade de penetração de calor no interior do material em análise e para projeto de equipamentos e cálculos de processamento térmico (CARBONERA *et al.*, 2003). Em sistemas de secagem e higienização térmica para lodos e escumas, os valores de difusividade térmica são necessários para verificar como a temperatura varia ao longo do tempo e ao longo de uma determinada camada do material a ser processado. Assim, obtendo-se o valor de difusividade térmica é possível calcular a

quantidade de material a ser processado em um sistema de secagem e higienização térmica.

Telles *et al.* (2000), por exemplo, determinaram que a difusividade térmica do lodo de esgoto contendo 0,15% de sólidos totais é $32,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Esse valor foi reduzido para $5,45 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo com teor de 5,0% de sólidos totais. Por sua vez, Silva *et al.* (2001) avaliaram lodos de esgoto contendo concentrações de sólidos totais variando entre 0,5 e 20,0%. Nesse estudo os autores encontraram difusividades térmicas variando entre $1,98 \times 10^{-3}$ e $1,27 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Apesar desses trabalhos sugerirem que existe uma relação entre a difusividade térmica e o teor de sólidos totais do lodo, esses trabalhos contemplam uma faixa muito restrita de teores sólidos.

Para verificar a influência dos sólidos no fluxo de calor pelo material é importante avaliar lodos e escumas contendo diferentes teores de sólidos totais em sua composição. Os resultados relatados em trabalhos conduzidos no Brasil apresentam valores de difusividade térmica divergentes e ausência de uma faixa de incerteza, o que restringe sua aplicabilidade prática para o dimensionamento de sistemas de tratamento térmicos para lodos e escumas.

Diante do exposto, estudos sobre a curva de secagem utilizando diferentes temperaturas e de difusividade térmica considerando diversos teores de sólidos totais em lodos e escumas sanitárias ainda se fazem necessários, sobretudo para o material oriundo do tratamento de água e tratamento do esgoto doméstico no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Quantificar experimentalmente a difusividade térmica para diferentes concentrações de sólidos totais e a curva de secagem de lodos oriundos do processo de tratamento de água e de esgoto, bem como de escumas, com o intuito de estabelecer parâmetros para projetos de secagem e higienização desses materiais por via térmica.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Determinar a curva de secagem de lodos e escumas sanitários quando submetidos ao processo de secagem com diferentes temperaturas;
- ii. Investigar a influência do teor de sólidos totais na difusividade térmica dos materiais sob análise, e;
- iii. Comparar os resultados da curva de secagem e da difusividade térmica para os lodos anaeróbios, aeróbios e de ETA e escumas sanitários.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO

3.1.1 Tratamento de água

A água pode conter elementos químicos, substâncias tóxicas e micro-organismos prejudiciais que podem causar problemas de saúde. Com o aumento da industrialização e o crescimento populacional, a contaminação dos mananciais têm se intensificado, tornando indispensável o tratamento da água destinado ao consumo humano (DI BERNARDO; PAZ, 2008).

As estações de tratamento de água (ETAs) têm a finalidade de remover as impurezas presentes na água por meio de combinações de processos e operações de tratamento, a fim de obter água conforme exigências do padrão de potabilidade (DI BERNARDO; PAZ, 2008). O tratamento convencional é constituído pelas etapas de aeração, eliminação de impurezas grosseiras, pré-cloração, coagulação, decantação, filtração, desinfecção, correção do pH e fluoretação (DI BERNARDO; PAZ, 2008; TEIXEIRA *et al.*, 2006).

O tratamento de água gera um resíduo denominado lodo. As principais fontes de geração de lodo em uma ETA são os decantadores ou flotadores e a água da lavagem dos filtros. O lodo é constituído basicamente por água e sólidos suspensos e suas características variam conforme a qualidade da água a ser tratada e dos produtos químicos utilizados no processo. Contudo, esse lodo precisa ser desidratado, tratado e destinado corretamente (RICHTER, 2001).

3.1.2 Tratamento de esgoto

O esgoto doméstico é constituído majoritariamente por despejos domiciliares, e, em menor proporção, por águas pluviais, águas de infiltração e, eventualmente, por despejos industriais, formado por matéria orgânica e inorgânica. Os compostos orgânicos são uma combinação de carbono, hidrogênio e nitrogênio, oriundas principalmente de proteínas, carboidratos, gorduras, óleos, ureia, surfactantes, fenóis, dentre outros. A matéria inorgânica é composta por areia e substâncias minerais dissolvidas (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) têm a finalidade de tratar o esgoto de forma adequada e assim produzir um efluente com características que respeitem a qualidade do corpo receptor, a capacidade de autodepuração do rio e os requisitos legais exigidos para o lançamento do efluente (ANDRADE; NETO; CAMPOS, 1999).

O tratamento de esgoto pode abranger tratamento primário, secundário (biológico) ou terciário. Em uma ETE convencional, o tratamento primário envolve o gradeamento, desarenadores e caixa de gordura para remoção de sólidos grosseiros, areia e gorduras, respectivamente. No tratamento secundário ocorre a degradação biológica da matéria orgânica formando o lodo biológico e no tratamento terciário o objetivo é a remoção de nitrogênio e fósforo, e, pode haver produção de lodo químico proveniente da adição de produtos químicos para remoção dos poluentes (ANDRADE NETO; CAMPOS, 1999).

Os processos de tratamento biológico de esgoto doméstico são, normalmente, classificados em aeróbio e anaeróbio. O tratamento aeróbio ocorre na presença de oxigênio e a matéria orgânica presente no esgoto é convertida em gás carbônico, água e lodo. O processo anaeróbio, por sua vez, necessita de menor consumo de energia, produz biogás, gera menor quantidade de lodo biológico, demanda menor volume dos reatores, porém apresenta dificuldade em atender aos padrões de lançamento restritivo (JORDÃO; PESSÔA, 2011; VON SPERLING, 2005). O tratamento anaeróbio ocorre na ausência de oxigênio sendo a matéria orgânica transformada em biogás, água e lodo. O processo aeróbio apresenta uma maior capacidade de remoção da matéria orgânica presente no esgoto, reduzida possibilidade de maus odores. No entanto, esse processo normalmente é caracterizado por elevados custos de implantação, operação e consumo de energia, bem como a geração de elevada quantidade de lodo (JORDÃO; PESSÔA, 2011; VON SPERLING, 2005).

3.2 RESÍDUOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ÁGUA E ESGOTO

3.2.1 Lodo proveniente de Estação de Tratamento de Água

O lodo das ETA é composto por água, sólidos de natureza orgânica e inorgânica como algas, bactérias, partículas orgânicas em suspensão, coloides, areia, sílica, cálcio e magnésio e dos produtos flocculantes aplicados durante o processo de tratamento, tais como hidróxido de alumínio, cloreto férrico e polímeros. São provenientes dos decantadores e formados nos processos de coagulação, floculação, decantação e filtração (GRANDIN *et al.*, 1993; TSUTIYA; HIRATA, 2001; RICHTER, 2001).

Os componentes encontrados no lodo de ETA sofrem influências antrópicas e naturais, as quais ocorrem desde as nascentes do rio até a captação da água. As influências antrópicas são as contribuições por erosão, produtos químicos utilizados na agricultura, impactos decorrentes da remoção da cobertura vegetal, poluição difusa, lançamentos de efluentes industriais e domésticos. Nas condições naturais, as principais influências são a erosão natural, leito dos rios e contribuições atmosféricas (ANDREOLI *et al.*, 2013).

O lodo se apresenta em estado gel quando em repouso e líquido quando agitado (SILVA; ISAAC, 2002). O teor de sólidos totais do lodo de água normalmente varia entre 5 e 25%. Tipicamente, 92% do volume do lodo é originário de coagulantes e 8% são considerados resíduos provenientes das impurezas removidas da água (DEMATOS *et al.*, 2001).

Segundo Carneiro *et al.* (2013) estima-se que no ano de 2011 tenham sido gerados 118 mil litros de lodo de ETA por dia no estado do Paraná, sendo esse volume produzido por 176 ETAs operadas pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Devido à elevada geração de lodo nas ETAs é necessário que se conheça as características e propriedades térmicas para um correto tratamento e posterior destinação final desse subproduto.

O lodo produzido por cinco ETAs de Curitiba e região metropolitana representam 35% da produção total do estado do Paraná, sendo utilizado na recuperação de áreas degradadas após ser misturado com resíduos da construção civil. No entanto, o lodo gerado por 47 ETAs, pertencentes a quatro regionais do Paraná, são lançados nos corpos receptores (CARNEIRO *et al.*, 2013).

O critério básico utilizado para a disposição do lodo de ETA é o teor de sólidos totais. Dessa forma, lodos contendo teor de sólidos totais inferior a 1 até 8% podem ser despejados em curso d'água ou em redes de esgoto sanitários, lodos com teor de sólidos de 1 até 15% aplicados no solo e lodos com sólidos acima de 15% são destinados em aterros sanitários (RICHTER, 2001). O lodo também pode ser utilizado para recuperação de áreas degradadas, para a fabricação de cerâmica e na produção de matriz de concreto (CARNEIRO; ANDREOLI, 2013).

3.2.2 Lodo proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto

As ETEs podem possuir três tipos de lodos: lodo primário, lodo biológico e lodo químico. O lodo primário é gerado em decantadores primários, são compostos por sólidos sedimentáveis do esgoto bruto e podem exalar forte odor em condições de elevada temperatura. O lodo biológico é a própria biomassa que cresceu com o alimento fornecido pelo esgoto afluente, sendo uma mistura complexa de sólidos de origem mineral e orgânico, onde parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, fazendo parte da biomassa microbiana. Poluentes, nutrientes e contaminantes também ficam concentrados no lodo. Em sistemas de tratamento que utilizam uma etapa físico-química, como a flotação, o lodo é denominado lodo químico (ANDREOLI *et al.*, 2006; CORRÊA; FONSECA; CORRÊA, 2007; VON SPERLING; GONÇALVES, 2001; LUDUVICE; FERNANDES, 2001).

O lodo biológico pode ser aeróbio não estabilizado, proveniente dos processos de lodo ativado convencional e reatores aeróbios com biofilmes de alta carga; aeróbio estabilizado, resultante dos processos de lodos ativados com aeração prolongada e reatores com biofilmes de baixa carga, e; lodo biológico anaeróbio, oriundo de lagoas de estabilização e reatores anaeróbios. O lodo anaeróbio é, tipicamente, estabilizado, pois fica retido no processo por um longo período, o que favorece à digestão anaeróbia do próprio material (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

No estado do Paraná, a Sanepar possui 231 ETEs que fazem o tratamento do efluente por meio de tratamento anaeróbio e uma ETE que possui tratamento aeróbio. A geração de lodo nessas ETEs no período de 2011 a 2013 foi de 1.437.309 m³, com teor médio de sólidos totais de 4%. A ETE Belém com tratamento

por lodos ativados e aeração prolongada é a maior geradora de lodo, com a média anual de 185.532 m³, e teor de sólidos de 2,5% (BITTENCOURT *et al.*, 2014).

Os lodos gerados nas ETEs da Sanepar são desaguados em leitos de secagem, nas ETEs de menor porte, ou em centrífugas, nas ETEs de grande porte. Após o desaguamento, tais lodos, passam pelo processo de higienização por meio da estabilização alcalina prolongada e são encaminhados para a reciclagem agrícola (BITTENCOURT *et al.*, 2014).

Segundo Possetti (2013), o lodo proveniente de tratamento anaeróbio apresenta composições diferentes de lodo oriundo de tratamento aeróbio. O lodo anaeróbio apresenta 44,94% de cinzas, 48,79% de material volátil e 6,27% de carbono fixo e sua composição elementar é formada por 30,76% de carbono, 4,32% de hidrogênio, 3,29% de nitrogênio, 5,21% de enxofre e 11,46% de oxigênio. Já o lodo aeróbio possui 33,63% de cinzas, 55,58% de material volátil e 7,86% de carbono fixo e sua composição elementar é formada por 38,39% de carbono, 4,99% de hidrogênio, 5,08% de nitrogênio, 0,57% de enxofre e 17,33% de oxigênio.

3.2.3 Escumas provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto

A espuma da ETE é um subproduto sólido constituído geralmente de materiais flotáveis não degradados durante o tratamento. Pode conter graxas, óleos vegetais e minerais, gorduras animais, sabões, resíduos de comida, cascas de frutas e vegetais, cabelos, papéis, algodões, pontas de cigarros, materiais plásticos, partículas de areias e materiais similares. A espuma é um subproduto comum em reatores anaeróbios e depende das características do efluente bruto e do tratamento preliminar existente na estação, como o gradeamento e decantador primário (VON SPERLING; GONÇALVES *et al.*, 2001).

Uma maior quantidade de espuma pode ser formada quando os reatores operam com baixo tempo de detenção hidráulica, pois a alta velocidade ascensional aumenta a quantidade de sólidos e esses sólidos são arrastados para a superfície do reator, ocasionando o aumento das camadas de espuma (SOUZA; AQUINO; CHERNICHARO, 2006).

No estudo realizado por Ross *et al.* (2013) foi verificado que para 564.189 m³.dia⁻¹ de esgoto tratado estima-se que a produção de espuma seja de 6.523 m³.dia⁻¹. Esse volume de espuma corresponde a 203 ETEs operadas pela

Sanepar e que atendem 143 cidades do estado do Paraná. A espuma, normalmente, tem como disposição final o aterro sanitário.

Segundo Ross *et al.* (2014), a espuma proveniente de reatores anaeróbios da ETE Padilha Sul apresenta teor de sólidos totais de 18,75%, 28 g.kg⁻¹ de óleos e graxas, 65,48% de carbono orgânico, 3.844 UFC.g⁻¹ de *salmonella spp* e 38.698 UFC.g⁻¹ de coliformes termotolerantes. Algumas características são semelhantes ao lodo de esgoto, como a relação entre teor de sólidos voláteis e teor de sólidos totais, apresentando relação de 0,64, o que indica seu potencial de biodegradação (ROSS *et al.*, 2014).

3.3 GERENCIAMENTO DE LODOS E ESCUMAS

Projetos de ETAs e ETEs devem considerar em sua concepção todo o ciclo dos lodos e escumas, desde a geração até a destinação final, pois a tecnologia utilizada para o tratamento determina a qualidade e a quantidade que serão gerados desses subprodutos (FERNANDES *et al.*, 2001). O processamento e destinação final dos lodos e escumas deve ser parte integrante do projeto de uma ETA e ETE, pois representa de 20 a 60% do custo da operação e está vinculada a qualidade da água e esgoto a ser tratado, tipo de tratamento, processamento e destinação final (FERNANDES *et al.*, 2001).

A espuma deve ser retirada dos reatores, desidratada e destinada corretamente. As principais formas de acondicionamento da espuma são em leitos de secagem, *bags* e valas na própria ETE. A destinação final predominante para a espuma é o aterro sanitário municipal ou aterro sanitário particular (ROSS *et al.*, 2013).

Para o gerenciamento adequado dos lodos, as principais etapas, segundo Von Sperling e Gonçalves (2001) são: adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação, higienização e disposição final, que serão detalhadas a seguir.

3.3.1 Adensamento

O adensamento é o processo físico para concentração do teor de sólidos totais, visando à redução do volume do lodo e facilitando as etapas subsequentes do

tratamento do lodo. Pode ser utilizado o adensamento por gravidade ou por flotação (JORDÃO; PESSÔA, 2011; VON SPERLING, 2005).

O adensamento por gravidade é semelhante aos decantadores, tendo um formato circular, alimentação central, saída de lodo pelo fundo e saída do sobrenadante pela periferia. No processo de adensamento por flotação com ar dissolvido, o ar é introduzido em uma solução mantida em elevada pressão. Quando acontece a despressurização, o ar dissolvido é liberado na forma de pequenas bolhas. Essas bolhas de ar tendem a carregar o lodo para a superfície por meio de um movimento ascensional, onde são removidas (GONÇALVES; LUDUVICE; VON SPERLING, 2001a).

3.3.2 Estabilização

Os processos de estabilização do lodo têm como objetivo a redução da quantidade de organismos patogênicos, dos odores ofensivos, eliminação do potencial de putrefação do lodo e estabilização da fração biodegradável da matéria orgânica nele presente (VON SPERLING, 2005).

Os processos de estabilização são divididos em (FERNANDES; SOUZA, 2001; VON SPERLING, 2005):

- i. Estabilização biológica: utiliza microrganismos para promover a estabilização da matéria orgânica por meio da digestão aeróbia e anaeróbia.
- ii. Estabilização química: ocorre por meio da oxidação química da matéria orgânica. O tratamento químico mais utilizado é a via alcalina, normalmente com óxido de cálcio (cal), que consiste em elevar o pH para destruir parte dos microrganismos patogênicos.
- iii. Estabilização térmica: ação do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados para eliminação dos patógenos e dos odores emanados pelo lodo.

3.3.3 Condicionamento

A etapa de condicionamento é utilizada para a preparação do lodo para a etapa de desidratação. Consiste na adição de produtos químicos para a coagulação

e floculação do lodo. A coagulação tem o objetivo de desestabilizar as partículas para facilitar suas aproximações e a floculação permite a aglomeração dos colóides e sólidos finos formando agregados maiores, ou seja, os flocos (FERNANDES *et al.*, 2001; GONÇALVES *et al.*, 2001b).

Os principais coagulantes utilizados são de natureza inorgânica, tais como o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o sulfato ferroso, o sulfato férrico, a cal virgem e hidratada e os polímeros orgânicos como os polieletrólitos. A utilização desses produtos químicos provoca alterações na composição química e na quantidade de sólidos do lodo que segue para a etapa de desidratação (DAVID, 2002; GONÇALVES *et al.*, 2001a).

3.3.4 Desidratação

Os principais motivos para realização da desidratação ou desaguamento são (VON SPERLING, 2005):

- i. Redução do volume de lodo para os tratamentos posteriores;
- ii. Redução do custo de transporte do lodo até a destinação final;
- iii. Facilidade no manejo do lodo;
- iv. Redução do volume de lodo para a disposição em aterro sanitário ou utilização na agricultura;
- v. Diminuição da umidade para a etapa de secagem e incineração.

O processo de desidratação é realizado por meio natural ou mecanizado. O processo natural utiliza a evaporação ou percolação natural e necessita de maiores áreas e volumes para instalação, um exemplo são os leitos de secagem. Os processos mecanizados são unidades compactas onde a desidratação ocorre rapidamente e os principais processos são a centrifugação, prensas desaguadoras e filtro prensa (VON SPERLING, 2005).

A escolha do mecanismo mais apropriado para a desidratação deve considerar o tipo de lodo a ser desaguado, espaço disponível e destino final que será dado ao lodo (DAVID, 2002). Para a secagem térmica ou incineração, o lodo deve apresentar no mínimo 35% de sólidos para que se tenha uma boa eficiência do processo (FERNANDES *et al.*, 2001).

3.3.5 Higienização

A higienização de lodo de ETE é uma etapa importante para garantir baixo nível de patogenicidade, principalmente quando o lodo é disposto no solo ou reciclado na agricultura. O objetivo da higienização é evitar riscos à saúde da população, e aos trabalhadores que fazem o manuseio, bem como diminuir os impactos negativos ao meio ambiente (VON SPERLING, 2005).

Segundo Andreoli *et al.* (2001) e Von Sperling (2005) o tratamento do lodo para remoção dos microrganismos patogênicos envolvem vários processos, que podem ser físicos, biológicos e químicos. Os principais processos são: compostagem, digestão anaeróbia, caleação ou estabilização alcalina, pasteurização e a secagem térmica. Como a secagem térmica é o foco deste trabalho, o assunto será detalhado no capítulo seguinte.

3.3.6 Disposição final

O destino final dos lodos e escumas gerados nas ETEs e ETAs envolve estudos e decisões referentes ao condicionamento, estabilização, grau de desidratação e eventual reuso ou reciclagem. Os principais aspectos que devem ser considerados antes da destinação final são (JORDÃO; PESSÔA, 2011):

- i. Produção e caracterização dos lodos e escumas;
- ii. Presença de efluentes industriais nos lodos de ETEs;
- iii. Características químicas, físicas e biológicas que possam interferir na disposição final dos lodos e escumas.

O lodo de ETA, normalmente, é disposto para recuperação de áreas degradadas, em aterros sanitários ou podem servir para fabricação de solo-cimento, materiais cerâmicos, pigmentos para argamassas e revestimentos ou aditivos para agregados (BIDONE; SILVA; MARQUES, 2001; CARNEIRO *et al.*, 2013).

A espuma originária das ETEs tem como principal destino os aterros sanitário municipal e aterro sanitário particular (ROSS *et al.*, 2013). No entanto, alternativas tem sido estudadas, como por exemplo, a incorporação da espuma em lodos de ETEs para ser destinado na agricultura (ROSS *et al.*, 2014) e a conversão de espuma em biodiesel (BI *et al.*, 2015; PEDROSO, *et al.*, 2012).

O lodo de ETEs, tipicamente, são dispostos em aterros sanitários, lançados em oceanos, incinerados, aplicados em solos com fins agrícolas e em áreas de reflorestamento (FERNANDES *et al.*, 2001; JORDÃO; PESSÔA, 2011). Segundo Kelessidis e Stasinakis (2012), nos 27 países membros da União Europeia, a utilização de lodo de ETE na agricultura é o principal destino para o resíduo, seguida pela incineração e disposição em aterro sanitário. A previsão de destinação final de lodos até o ano de 2020 indica que a utilização de lodo na agricultura e a incineração devem ser as principais práticas adotadas para as destinações finais (KELESSIDIS; STASINAKIS, 2012).

3.4 FUNDAMENTOS SOBRE SECAGEM

3.4.1 Generalidades

A secagem térmica é o processo de remoção das substâncias voláteis de um material sólido ou líquido, devido aos diferentes gradientes de umidade e de temperatura entre o material do qual a umidade é removida e o meio para o qual é transferida. O objetivo é a remoção do líquido agregado ao sólido, para um meio gasoso por meio da evaporação térmica. Nesse processo a evaporação ocorre à temperatura inferior a temperatura de ebulição do líquido na pressão do sistema (DAVID, 2002; MUJUMDAR, 2006).

Dois processos fundamentais precisam acontecer simultaneamente para que a secagem térmica ocorra: transferência de calor para evaporação do líquido e transferência de massa como líquido ou vapor dentro dos sólidos e como vapor pela superfície (MUJUMDAR, 2006).

A separação entre um sólido e líquido por prensagem, centrifugação ou filtração são considerados métodos mecânicos de desaguamento e a separação por evaporação é designado secagem (DAVID, 2002).

As principais vantagens da secagem térmica dos lodos e escumas são (GONÇALVES *et al.*, 2001a; LUDUVICE; FERNANDES, 2001; JORDÃO; PESSÔA, 2011):

- i. Redução do volume de material a ser gerenciado;
- ii. Redução de custos para transporte e estocagem dos materiais;
- iii. Produto final estabilizado e livre de patógenos;

- iv. Preservação das propriedades agrícolas dos materiais;
- v. Produto final apropriado para reuso agrícola, conversão térmica ou disposição final em aterro sanitário;
- vi. Utilização do material seco como combustível para o próprio secador ou conversores térmicos, devido ao elevado poder calorífico remanescente e aos gases quentes que podem ser gerados e recuperados como fonte de energia térmica.

3.4.2 Umidade dos sólidos

As propriedades mecânicas do lodo estão diretamente relacionadas com o teor de umidade e este tem relação direta com o teor de sólidos. Segundo Von Sperling e Gonçalves (2001) a quantidade de água nos sólidos influenciam as propriedades mecânicas, o manuseio, o volume e a disposição final do lodo. As denominações do lodo são descritas conforme a umidade existente no material (VON SPERLING; GONÇALVES, 2001):

- i. Umidade de 75 a 100%: lodo fluido;
- ii. Umidade de 65 a 75%: torta semi-sólida;
- iii. Umidade de 40 a 65%: sólido duro;
- iv. Umidade de 15 a 40%: lodo em grânulos ;
- v. Umidade de 0 a 15%: lodo desintegrado em pó fino.

A água contida nos lodos de ETAs e ETEs e escumas pode ser dividida de acordo com a facilidade de separação em água livre, água intersticial, água superficial ou vicinal e água de hidratação ou intracelular, conforme demonstra a FIGURA 1 (CHEN *et al.*, 2006; VAXELAIRE; CÉZAC, 2004; VON SPERLING; GONÇALVES, 2001).

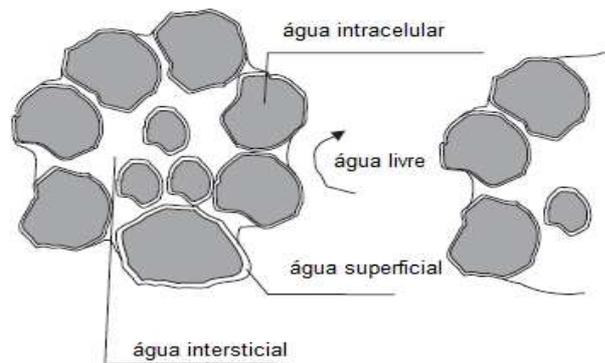


FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA NO LODO
 FONTE: CHEN *et al.* (2006)

A água livre não está associada aos flocos de lodo e pode ser facilmente removida por gravidade (adensamento, flotação). A quantidade de água removida depende da fragilidade estrutural dos flocos e das características de sedimentação.

A água intersticial é a parcela de água que fica presa dentro de fendas e espaços intersticiais dos flocos, sendo caracterizada pela baixa energia de ligação entre as partículas sólidas e líquidas. Pode se tornar água livre se o floco for destruído por força mecânica forte, pois as partículas estão unidas fisicamente por forças capilares.

A água superficial ou vicinal refere-se a água presa à superfície das partículas por adsorção e adesão, e que devido à tensão superficial e rigidez estrutural dos flocos pode ser removida quando aplicada pressão e vácuo. Pode ser removida por força mecânica ou pelo uso de floculante sem que ocorra a ruptura do floco.

A água de hidratação ou intracelular é a água ligada quimicamente às partículas do lodo. Como essa água faz parte da fase sólida só pode ser removida por forças térmicas que promovam uma mudança no estado de agregação da água, ou seja, por meio de processos específicos de secagem.

Conforme David (2002) e Vaxelaire e Cézac (2004), essa divisão é meramente teórica, pois não existem técnicas capazes de caracterizar cada tipo de associação e é muito difícil obter uma clara distribuição das águas dentro dos lodos, mas é muito útil para estudo dos métodos de separação.

Segundo Chen *et al.* (2006), a água que pode ser removida por processos de desidratação mecânica é denominado água livre e a água que permanece é chamada de água ligada. O teor de água ligada é o limite teórico da desidratação

mecânica. A água livre inclui verdadeiramente a livre, intersticial e uma parcela da água superficial, enquanto que a água ligada inclui a água intracelular e uma parcela da água superficial.

A curva de secagem de lodos e escumas é importante para avaliar como a água é removida do material durante o processo de aquecimento e quanto de fração de massa de sólidos totais permanece ao longo do experimento.

Segundo Standard Methods (2012), o sólido total é o resíduo do material após o processo de evaporação de uma amostra a temperatura de 103 a 105 °C e corresponde aos sólidos totais suspensos e aos sólidos totais dissolvidos presentes na composição da amostra. O cálculo para os sólidos totais é definido conforme a equação 1:

$$ST = \frac{Md}{Ma + Md} \quad (1)$$

em que:

ST é o teor de sólidos totais (expresso em kg de sólidos secos por kg de base úmida);

Ma é a massa de água (kg); e,

Md é a massa de sólido seco (kg).

O cálculo para umidade de sólido na base úmida (Ww) é expresso em kg de água por kg de sólido úmido, conforme a equação 2:

$$Ww = \frac{Ma}{Ma + Md} \quad (2)$$

A transformação da umidade de uma base para a outra pode ser feita pela equação 3:

$$Ww = 1 - ST \quad (3)$$

Os valores de Ww e ST podem assumir valores entre 0 e 1 ou serem representados em porcentagem, multiplicando-os por 100 (DAVID, 2002).

Luo *et al.* (2013) avaliaram as características da secagem térmica de lodos desidratados em digestores anaeróbios por meio de um analisador termogravimétrico. Os autores consideraram que a evaporação da umidade foi dividida em etapas, sendo a primeira etapa a da taxa de evaporação constante onde a água livre foi reduzida. Na segunda etapa ocorre a evaporação da água intersticial (umidade entre as partículas do lodo) e na terceira etapa, a água da superfície (umidade absorvida na superfície sólida) foi perdida assim que a água intersticial foi evaporada completamente. Assim, segundo os autores, a umidade do lodo removida durante o período de taxa constante, primeiro período de queda e o segundo período de queda foram considerados água livre, água intersticial e água de superfície, respectivamente. A água intracelular (água ligada) foi parcialmente convertida para água livre, água intersticial e água da superfície e o teor de umidade residual foi considerado como água intracelular.

As curvas de secagem para lodos e escumas são pouco reportados na literatura, porém para outros materiais, como sementes de frutos, existem vários estudos, principalmente para avaliação das influências das variáveis de temperatura e de velocidade do ar de secagem.

Gouveia *et al.* (2003), por exemplo, determinaram as curvas de secagem em frutos de cajá em temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C e encontraram equações polinomiais ajustadas para os valores dentro da faixa de temperatura e velocidade do ar estudadas. Segundo os autores, o processo de secagem ocorreu no período de taxa decrescente e não apresentou período de taxa constante, que pode ser devido à natureza da umidade ser na forma de suspensão de células e de soluções e não somente umidade superficial livre.

Segundo Villela e Silva (1992), a secagem de semente de milho utilizando a secagem intermitente com temperatura de 80 e 90 °C possui velocidade de secagem de 27 e 52%, respectivamente, maiores que a 70 °C. Os autores também constataram que com a elevação da temperatura do ar de secagem, ocorre aumento da velocidade de secagem e redução do tempo total de exposição das sementes ao ar aquecido.

Almeida *et al.* (2006) avaliaram a cinética de secagem da acerola em um secador de leito fixo com temperatura de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 e 1,5 m.s⁻¹. Os resultados demonstraram que a temperatura foi a

variável de maior influência no processo e que a cinética de secagem da acerola ocorreu dentro do período de taxa decrescente.

No estudo realizado por Santos *et al.* (2012), referente à cinética de secagem da batata-doce em um secador solar, observou-se que a umidade livre na superfície da batata-doce foi facilmente removida e que a taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem e pelo aumento do fluxo de ar por unidade de tempo, sendo a temperatura afetada pela velocidade de evaporação da umidade superficial e da difusão da umidade interna.

Os dados de curva de secagem para lodos e escumas são pouco citados na literatura, o que mostra a necessidade de estudos no assunto. A forma como ocorre a perda de umidade desses materiais, o tempo de secagem adequado em diferentes temperaturas e as vantagens quando se aplica uma temperatura mais elevada para a secagem dos materiais podem ser verificados pela curva de secagem. Para tanto deve-se considerar a faixa de teor de sólidos totais que se pretenda atingir ao final da secagem, pois dependendo do destino a ser dado aos lodos e escumas, não é necessário a secagem total dos materiais e sim redução parcial da umidade.

3.4.3 Mecanismos de transferência de calor

A transferência de calor é definida como a energia térmica em trânsito devido à diferença de temperaturas entre os meios (INCROPERA *et al.*, 2008). Na secagem térmica o calor transferido para o lodo aumenta a sua temperatura e, conseqüentemente, a água contida na superfície evapora, formando um gradiente de temperatura da superfície para o interior do lodo. A migração da umidade do interior para a superfície ocorre por escoamento capilar, difusão e diferenças de pressão internas. As condições externas como temperatura, umidade, velocidade e direção do gás de secagem, área da superfície de exposição e tempo de detenção afetam a transferência de calor para o lodo. Logo essas características são importantes, assim como a determinação da difusividade térmica, para secagem do lodo, escolha do secador apropriado e operação adequada (DAVID, 2002; WEF, 1992).

Os mecanismos da transferência de calor podem ocorrer por meio de condução, convecção e radiação térmica e esses mecanismos caracterizam o tipo de equipamento de secagem a ser utilizado (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

3.4.3.1 Condução

A condução está associada à transferência de calor que ocorre ao nível molecular onde as partículas mais energéticas transferem energia para as menos energéticas. Na presença de um gradiente de temperatura a transferência de energia por condução ocorre na direção da diminuição da temperatura (INCROPERA *et al.*, 2008).

No processo de secagem térmica, a transferência de calor por condução ocorre por meio de uma parede que separa o lodo do meio que transfere o calor, que pode ser óleo térmico ou vapor (DAVID, 2002). A condução térmica é expressa matematicamente conforme a seguinte equação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012):

$$Q_{cd} = k.A.(T_m - T_i).L^{-1} \quad (4)$$

em que:

Q_{cd} é a taxa de transferência por condução (W);

k é a condutividade térmica ($W.m^{-1}.K^{-1}$);

A é a área da superfície de transferência de calor (m^2);

T_m é a temperatura do meio de transferência de calor (K);

T_i é a temperatura do lodo (K); e,

L é a espessura da parede (m).

3.4.3.2 Convecção

A convecção refere-se à transferência de calor entre uma superfície e um líquido ou gás em movimento quando ambos estiverem em temperaturas diferentes. A energia térmica se propaga por meio do movimento molecular aleatório (difusão) e do movimento global ou macroscópico do fluido devido à diferença de temperatura e ação da gravidade (INCROPERA *et al.*, 2008).

No processo de secagem térmica a transferência de calor por convecção ocorre por meio do contato direto do meio de secagem com o lodo (DAVID, 2002). A convecção pode ser expressa matematicamente por (ÇENGEL; GHAJAR, 2012):

$$Q_{cv} = h_{cv} \cdot A \cdot (T_g - T_i) \quad (5)$$

em que:

Q_{cv} é a taxa de transferência por convecção (W);

h_{cv} é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$);

A é a área exposta ao meio de secagem (m^2);

T_g é a temperatura do gás (K); e,

T_i é a temperatura do material a ser processado (K).

3.4.3.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria em temperatura não nula. A emissão é devido à mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas da matéria sendo a energia transportada por ondas eletromagnéticas (INCROPERA *et al.*, 2008).

Na secagem térmica de lodos e escumas a transferência de calor ocorre por meio de energia radiante proveniente de superfícies aquecidas por resistência elétrica, lâmpada infravermelha ou superfície refratária incandescente (DAVID, 2002). A expressão matemática para a radiação é definida conforme a equação (ÇENGEL; GHAJAR, 2012):

$$Q_{rd} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_r^4 - T_i^4) \quad (6)$$

em que:

Q_{rd} é a taxa de transferência por radiação (W);

ε é a emissividade da superfície aquecida;

σ é a constante de Stefan-Boltzman ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$);

A é a área exposta à fonte radiante (m^2);

T_r é a temperatura absoluta da superfície radiante (K); e,

T_i é a temperatura absoluta do material a ser processado (K).

3.4.4 Tecnologias de secagem térmica

Existem vários tipos de equipamentos para secagem térmica de lodos e escumas e a forma de classificação do equipamento mais adequado depende do modo de transferência de calor para os sólidos úmidos e as características de manipulação e propriedades físicas do material úmido (DAVID, 2002).

Segundo Chen *et al.* (2006), em relação ao processo de transferência de calor, os secadores térmicos podem ser classificados em secadores diretos, secadores indiretos e sistemas mistos.

Nos secadores diretos, a transferência de calor é realizada por convecção, por meio de contato direto do lodo com o meio de secagem. Este pode ser ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido que é utilizado como fonte de calor para o processo de secagem, conforme mostra a FIGURA 2 (DAVID, 2002).

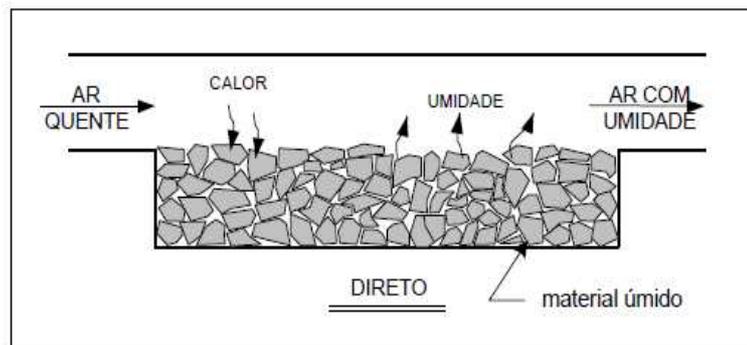


FIGURA 2 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DA SECAGEM DIRETA POR CONVECÇÃO
FONTE: DAVID (2002)

A vantagem do secador direto é que a taxa de troca de calor é mais alta e o lodo é seco rapidamente, chegando a teores de umidade inferiores a 20%, entretanto, a principal desvantagem é a geração de grande quantidade de gases com odores e o risco de potencial de incêndio, que pode ser provocado pela autoignição do lodo seco e escumas em contato com os gases quentes (CHEN *et al.*, 2006).

Nos secadores indiretos, a transferência de calor ocorre por condução, por meio de uma parede normalmente metálica que separa o material a ser processado do meio de secagem que pode ser vapor saturado ou óleo térmico. Para que o calor seja transferido, a temperatura da parede metálica deve ser bem superior que

aquela do material que se pretende processar (DAVID, 2002), conforme ilustra a FIGURA 3.

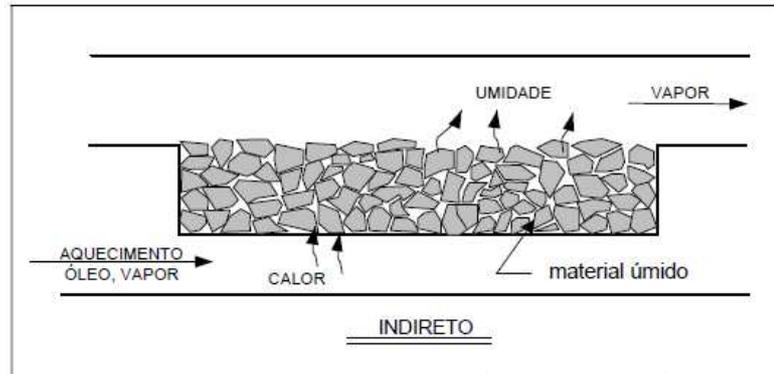


FIGURA 3 - DIAGRAMA ESQUEMATICO DA SECAGEM INDIRETA POR CONDUÇÃO
 FONTE: DAVID (2002)

Para que ocorra a transferência de calor, o lodo e/ou espuma devem ser constantemente revolvidos por meio de sua agitação ou raspagem frequente da superfície de troca de calor. A vantagem da secagem indireta é a produção de quantidades mínimas de vapores, porém a taxa de secagem é menor que aquelas verificadas em secadores diretos por operar em temperaturas menores (CHEN *et al.*, 2006).

Alguns trabalhos já foram desenvolvidos utilizando a secagem indireta. Andreoli *et al.* (2002), por exemplo, utilizaram leite de secagem coberto com estufa plástica e injeção subsuperficial de calor utilizando o biogás produzido em reator anaeróbio para aquecer o óleo. O óleo aquecido passou por tubos de cobre instalado na camada drenante do leite, tendo por objetivo o aquecimento ascendente da camada de lodo e o intuito de secagem e higienização do lodo. A temperatura máxima de aquecimento foi superior a 60 °C e a média em torno de 38 °C. Essa temperatura foi o suficiente para remoção total dos ovos de helmintos, demonstrando que a tecnologia pode ser adotada para secagem e higienização térmica de lodos.

O sistema térmico de higienização de lodos movido a biogás desenvolvido por Possetti *et al.* (2012) foi capaz de higienizar e secar lodos de esgoto por bateladas. O sistema denominado STHIL consistiu em utilizar o biogás produzido por reatores anaeróbios para aquecer a água e essa água circulou por tubulações disposta na forma de serpentina e constituiu a base do leito de higienização. A

temperatura média do STHIL foi de 59 °C e foi o suficiente para eliminar *salmonellas spp* e ovos viáveis de helmintos, bem como para aumentar cerca de 4% p/p por dia de teores de sólidos totais do lodo processado. Segundo Possetti *et al.* (2012), o STHIL pode ser considerado uma alternativa para ETEs de pequeno e médio porte que possuem biogás para a higienização de lodo.

3.5 PROPRIEDADES TÉRMICAS

3.5.1 Calor específico volumétrico

O calor específico é uma grandeza termodinâmica, importante em altas temperaturas, e está associado ao consumo de energia durante o aquecimento. O calor específico por unidade de volume é definido como a energia necessária para elevar em 1 °C a unidade de massa de uma dada substância em um volume de 1 cm³, mantendo o volume constante. A unidade no sistema internacional (SI) é expressa em J.m⁻³.K⁻¹ (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; SANTOS, 2005; CLIVATI, 1991).

Em solos o calor específico volumétrico depende principalmente da composição, umidade e estrutura dos solos. A matéria orgânica é o componente que mais influencia tal propriedade devido ao seu alto calor específico por unidade de massa, que é em torno de 0,46 cal. g⁻¹ °C⁻¹, enquanto que a areia e a argila possuem valores aproximadamente de 0,17 cal. g⁻¹ °C⁻¹. É importante ressaltar que o calor específico volumétrico varia com a umidade existente no material sob estudo (CLIVATI, 1991).

Zuma *et al.* (2015), investigou as propriedades químicas e térmicas de lodos provenientes de latrinas domésticas e verificou que a capacidade térmica do lodo amostrados em oito pontos ao longo do poço variaram entre 1970 a 3430 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ e a capacidade térmica média foi de 2430 kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

3.5.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica de um material é a medida da capacidade de conduzir calor, ou seja, a quantidade de calor que flui por unidade de tempo. A condutividade térmica é a propriedade que estabelece os níveis de temperatura de

trabalho de um material, sendo um parâmetro importante para transferência de calor em regime estacionário (ÇENGEL; GHAJAR, 2012; SANTOS, 2005).

Um material com alto valor de condutividade indica ser um bom condutor de calor, enquanto um valor baixo de condutividade significa que o material é mau condutor de calor ou um isolante. A água é um pobre condutor de calor ao se comparar com o ferro que é um bom condutor, porém a água é um excelente meio para armazenar energia térmica (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A condutividade térmica depende das frações sólidas, líquidas e gasosas, do tamanho e arranjo das partículas sólidas e das relações de interface entre a fase sólida e líquida (CLIVATI, 1991).

Sepaskhan e Boersma (1979) apud Clivevati (1991) estudaram a influência da temperatura e umidade na condutividade térmica de areia franca, solo franco e solo franco argiloso siltoso e verificaram que o aumento da condutividade térmica por aumento da umidade foi maior em solo com textura grossa do que em solo com textura fina.

A transferência de calor através dos poros preenchidos com ar contribui para o efeito da temperatura na condutividade térmica. Esse efeito é mais elevado quanto maior é o espaço preenchido com ar (CLIVATI, 1991).

Segundo Zuma *et al.* (2015) a condutividade térmica de lodo proveniente de latrinas domésticas foi de $0,55 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, por sua vez a condutividade térmica do lodo de esgoto determinada por Song *et al.* (2014) à temperatura de aproximadamente $20 \text{ }^\circ\text{C}$ e contendo teor de sólidos totais de 16,54% foi de $0,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, enquanto que após o processo de desidratação em reator de hidrólise térmica a $200 \text{ }^\circ\text{C}$, a condutividade térmica foi elevada para $0,704 \text{ W.m}^{-1}.\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ (SONG *et al.*, 2014).

Segundo Clivati (1991) os métodos para cálculo de condutividade térmica são baseados em regime de fluxo de calor permanente, quando a temperatura não é função do tempo e não permanente, quando a temperatura é função do tempo.

3.5.3 Difusividade térmica

A difusividade térmica (D) é a relação entre a condutividade térmica (k) e o calor específico por unidade de volume (c), conforme a equação 7. Assim, a

difusividade térmica expressa em $\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$, representa a variação de temperatura à medida que o calor flui por um determinado material (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$D = \frac{k}{c} \quad (7)$$

Os pequenos valores de difusividade térmica indicam que a maior parcela de calor é absorvida pelo material e uma pequena quantidade de calor é conduzida. Portanto, quanto maior a difusividade mais rapidamente será a propagação de calor no meio (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Em sistemas que sofrem processos de aquecimento ou resfriamento a difusividade térmica é um parâmetro importante para medir a velocidade de penetração de calor no interior do material em análise e fundamental para projeto de equipamentos e cálculos de processamento térmico (CARBONERA *et al.*, 2003). É uma propriedade utilizada principalmente para alimentos e solos, mas pouco estudada para lodos e escumas, sendo reportados poucos trabalhos na literatura referentes a esses tipos de materiais.

Segundo Çengel e Ghajar (2012), a difusividade térmica da água é de $1,4 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ em temperatura ambiente, sendo o mesmo valor de difusividade térmica para a carne bovina, enquanto a do tijolo e solo seco são da ordem de $5,2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2.\text{s}^{-1}$ (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A difusividade térmica pode ser afetada pelas propriedades dos materiais, sendo a umidade, textura, estrutura e densidade as mais importantes para os solos, enquanto para os alimentos, as propriedades que influenciam são a umidade, composição e porosidade (CLIVATI, 1991; SINGH, 1982).

Segundo Chudnovski (1962) apud Clivati (1991) a difusividade térmica aumenta com a umidade até um máximo que se mantém constante para diferentes tipos de solos, em diferentes intervalos de umidade.

A difusividade térmica em função da umidade está relacionada à formação de áreas de contato entre as partículas sólidas. Vazios preenchidos com ar dificultam o fluxo de calor pelo material, enquanto a água atua como agente facilitador desse fluxo. Isso ocorre porque a água possui condutividade térmica em torno de $1,4 \times 10^{-3} \text{ cal.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ e o ar em torno de $0,06 \times 10^{-3} \text{ cal.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{°C}^{-1}$, ou seja, o ar possui condutividade térmica cerca de 30 vezes menor que a da água.

Portanto, um aumento de umidade dos materiais causa considerável aumento na condutividade térmica. No entanto, em altas umidades, o aumento do calor específico pela adição de água tem maior importância que a condutividade térmica, devido ao alto calor específico volumétrico da água, que é $1,0 \text{ cal.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, em comparação com minerais que possuem condutividade da ordem de aproximadamente $0,3 \text{ cal.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ (CLIVATI, 1991).

A difusividade térmica é 1,8 a 2 vezes maior para grãos de areia com diâmetro pouco menor que 2 mm do que para os grãos com diâmetro de 0,1 a 0,01 mm, para porosidade de 42% e umidade de 0,5%, ou seja, quanto maior é o conteúdo de argila em relação à areia para um solo, menor será a difusividade térmica (CLIVATI, 1991).

Conforme o estudo realizado por Nakshabandi e Kohnke (1965) utilizando areia fina, solo franco siltoso e solo argiloso, as relações das propriedades térmicas com a umidade, textura, massa específica e tamanho dos grãos influenciam na condutividade e difusividade térmica, sendo que, quanto maior o tamanho das partículas e dispersão do material, maiores são a condutividade e a difusividade térmica.

Normalmente, os métodos para cálculo de difusividade térmica não consideram aspectos não lineares como a transferência de água e vapor por fluxo de massa quando se aplica um gradiente térmico no solo. Caso esses fatores fossem considerados, seria possível obter a difusividade térmica real. A difusividade térmica comumente obtida é a difusividade térmica aparente (CLIVATI, 1991).

Segundo Clivati (1991), em condições de campo é praticamente impossível determinar a influência da transferência de calor por fluxo de massa, o que torna importante a determinação de valores de difusividade térmica aparente em laboratório, de modo a permitir a integração de resultados.

Carbonera *et al.* (2003) utilizaram três métodos para determinação da difusividade térmica em uma massa de tomate comercial contendo 18% de sólidos. Dois métodos foram baseados na determinação experimental de temperaturas transientes em posições fixas no interior da amostra e um método baseado na definição de difusividade térmica, exigindo o conhecimento da condutividade térmica, da massa específica e do calor específico da amostra. Os resultados obtidos nos três experimentos foram $1,30 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $1,63 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,52 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente.

O estudo apresentado por Tres *et al.* (2011) teve como objetivo a montagem de um aparato experimental para determinação da difusividade térmica em alimentos. Os resultados de difusividade encontrados para doce de uva com 47,5% de umidade foram $6,48 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $7,25 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ a $47 \text{ }^\circ\text{C}$ e para o doce de uva com 41% de umidade foram $6,43 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e $6,80 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ a $47 \text{ }^\circ\text{C}$. Neste trabalho também foi avaliado óleo de soja e suco de laranja com várias concentrações e a difusividade térmica foi determinada para diversas temperaturas. Os autores concluíram nesse estudo que a difusividade térmica aumenta com o aumento da temperatura.

O estudo realizado por Luk'yashchenko *et al.* (2012) determinou a difusividade térmica dos horizontes superiores AP, A1 e A1B dos solos utilizados para cultivo de trigo e girassol. Os resultados obtidos para o horizonte AP foram de $1,20 - 4,11 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; para o horizonte A1 de $1,21 - 3,85 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e; para o horizonte A1B de $1,35 - 3,73 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Os autores propuseram um modelo de regressão considerando a quantidade de água no solo e concluíram que a difusividade térmica dos solos aumentou em mais de duas vezes com o aumento do teor de água.

Arias-Penas *et al.* (2015) apresentaram resultados preliminares de um método para determinar a difusividade térmica usando temperaturas em diferentes profundidades do solo. O método foi baseado no fluxo regular de calor por meio da superfície e envolveu a medição de temperaturas com sensores colocados dentro de um furo de sondagem geotérmica. Os autores concluíram que o método sugerido é simples, barato e de confiança para determinar a difusividade térmica e os resultados encontrados foram razoáveis para o tipo de solo analisado.

O método proposto por Chung e Jackson (1954) e adaptado por Clivati (1991) para obtenção da difusividade térmica em materiais de baixa condutividade, como lodos e escumas, considera a temperatura em função do tempo de aquecimento em banho térmico. A difusividade térmica é calculada conforme a equação 8:

$$D = \frac{2,303 \cdot b \cdot r_m^2}{x^2} \quad (8)$$

em que:

D é a difusividade térmica ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$);

r_m é o raio do cilindro (cm);

x é a constante de valor 2,405; e,

$-b$ é a inclinação da curva $\log Y-t$ (s).

em que:

Y é a taxa da diferença de temperatura $(T_B - T(t)) \cdot (T_B - T_0)^{-1}$ (adimensional);

T_B é a temperatura da água contida no reservatório do banho térmico ($^{\circ}\text{C}$);

T_0 é a temperatura inicial da amostra sob investigação ($^{\circ}\text{C}$); e,

$T(t)$ é a temperatura da amostra sob investigação durante o processo de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$), no instante de tempo t (s).

A dedução matemática da equação 8 para a difusividade térmica em materiais de baixa condutividade encontra-se no anexo 1.

Segundo Clivati (1991), esse método mostrou-se acurado, rápido e simples para obtenção da difusividade térmica em sólidos de baixa condutividade térmica, podendo ainda ser adaptado a materiais pastosos ou porosos.

Esse método foi aplicado para solos franco-siltoso e as temperaturas obtidas chegaram a um equilíbrio em torno de 4 a 6 minutos após o início do experimento para amostras secas e de 2 a 3 minutos para amostras úmidas. Segundo Parikh *et al.* (1979) apud Clivati (1991) essa variação de tempo foi suficiente para atender ao modelo matemático e não permitir a redistribuição da água na amostra.

Silva *et al.* (2001) utilizaram a metodologia proposta por Chung e Jackson (1954) e adaptada por Clivati (1991) para avaliar diferentes concentrações de lodos, variando de 0,5 a 20% de sólidos totais, provenientes de duas ETEs, sendo uma ETE composta por um reator anaeróbio do tipo manta de lodo (UASB) e biofiltros aerados submersos com recirculação de lodo e uma ETE composta por um reator anaeróbio UASB. A TABELA 1 apresenta os resultados de difusividade térmica encontrados no estudo.

TABELA 1 - RESULTADOS DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA LODO UASB + FILTRO E LODO UASB

Concentração do lodo	Difusividade térmica ($10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	
	Lodo UASB + biofiltro	Lodo UASB
0,5	1,27	1,98
1,0	1,50	1,92
2,0	1,40	1,60
3,0	1,34	1,51
5,0	1,27	1,31
10	1,28	1,50
15	1,30	1,43
20	1,32	1,46

FONTE: SILVA *et al.* (2001)

No estudo realizado por Telles *et al.* (2000) foi determinado a difusividade térmica de lodo de esgoto digerido anaerobicamente da ETE Guaraituba e ETE Atuba Sul, localizadas em Colombo e Curitiba, respectivamente. Nesse estudo foi utilizada a metodologia proposta por Chung e Jackson e adaptado por Clivati (1991) com leituras a cada 15 segundos e tempo de ensaio de 180 segundos. Realizaram-se análises para o lodo da ETE Guaraituba contendo 5 % de teor de sólidos totais e lodo da ETE Atuba Sul contendo 0,15 % de sólidos totais. Os resultados encontrados pelos autores foram de $5,45 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo da ETE Guaraituba e $32,7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo da ETE Atuba Sul.

Segundo Silva *et al.* (2001) a difusividade térmica diminui com o aumento do teor de sólidos totais presentes na composição dos lodos. Os lodos contendo sólidos totais inferior a 5%, a difusividade térmica é basicamente controlada pela água que é um bom condutor de calor, no entanto para lodos contendo sólidos acima de 5% a difusividade térmica é influenciada por características próprias do lodo, como a quantidade de sólidos voláteis, sólidos fixos e quantidades de metais presentes no lodo.

Apesar dos trabalhos realizados com lodos sugerirem que existe uma relação entre a difusividade térmica e o teor de sólidos totais do lodo, esses trabalhos contemplaram uma pequena faixa de concentrações de sólidos totais, sendo a maior concentração de 20%, e os resultados reportados não acompanharam uma faixa de incerteza, restringindo assim a utilização para auxiliar no dimensionamento de sistemas de tratamento térmicos para lodos e escumas.

Assim, os dados de difusividade térmica para lodos de ETE, lodo de ETA e escumas são pouco reportados na literatura. Para o adequado dimensionamento de sistemas de tratamento térmico há necessidade de geração de dados referentes à difusividade térmica de lodos e escumas em diversas concentrações, abrangendo uma ampla faixa de sólidos totais. Esses dados são importantes para auxiliar na determinação dos parâmetros de dimensionamento de sistemas de secagem.

4 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os procedimentos para coleta e preparação das amostras de lodos e espuma, bem como serão descritos em detalhes os métodos para determinação das curvas de secagem e das difusividades térmicas dos materiais sanitários sob investigação.

4.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMA

Inicialmente, coletaram-se amostras dos seguintes materiais: lodo proveniente dos reatores anaeróbios de uma ETE, lodo proveniente dos decantadores secundários de uma ETE que opera com rota aeróbia, espuma proveniente da superfície de um reator anaeróbio e lodo proveniente da centrífuga de uma ETA após a adição de polímero. As ETEs e ETA situam-se no município de Curitiba – Paraná. A TABELA 2 apresenta as denominações das amostras que serão utilizadas ao longo do trabalho, suas origens, locais de amostragem e volumes coletados.

TABELA 2 - DENOMINAÇÕES, ORIGENS, LOCAL DE AMOSTRAGEM E VOLUME COLETADO DE LODOS E ESCUMAS

Denominação	Origem	Local de amostragem	Volume coletado
Lodo A	Lodo anaeróbio proveniente de ETE	Descarte de lodo do reator anaeróbio	10 litros
Lodo B	Lodo aeróbio proveniente de ETE	Descarte de lodo dos decantadores secundários	12 litros
Lodo C	Lodo proveniente de ETA	Centrífuga após a adição de polímero	10 litros
Escuma	Escuma anaeróbia proveniente de ETE	Superfície do reator anaeróbio	10 litros

Após, determinaram-se os teores de sólidos totais, fixos e voláteis, segundo o Standart Methods (2012), para as amostras de lodos e escumas com o auxílio de uma estufa de secagem (marca Quimis, modelo Q317-52) operando a 103 °C e de uma mufla (marca Quimis modelo Q1000) operando a 550 °C. Colocaram-se aproximadamente 40 gramas de lodos e escumas em cápsulas de porcelanas,

previamente secas em mufla, e encaminhadas para a estufa por um período de 24 horas. Após esse período, as cápsulas foram retiradas em um dessecador e ao atingirem a temperatura ambiente foram medidas as massas residuais das amostras para se obter o teor de sólidos totais. A equação 9 apresenta o cálculo para determinação do teor de sólidos totais das amostras:

$$ST = \frac{P3 - P1}{P2} \cdot 100 \quad (9)$$

em que:

ST são os sólidos totais (%);

P1 é a massa da cápsula vazia (g);

P2 é a massa da amostra úmida (g); e,

P3 é a massa cápsula vazia + massa amostra seca (g).

Em seguida as cápsulas de porcelanas contendo as amostras secas foram colocadas em uma mufla a 550 °C por período de uma hora. Após esse período, as amostras foram retiradas em um dessecador e assim que atingiram a temperatura ambiente foram medidas as massas residuais para se obter o teor de sólidos fixos e voláteis. A equação 10 apresenta a expressão matemática para determinação do teor de sólidos fixos:

$$SF = \frac{P4 - P1}{P2} \cdot 100 \quad (10)$$

em que:

SF são os sólidos fixos (%);

P1 é a massa da cápsula vazia (g);

P2 é a massa da amostra úmida (g); e,

P4 é a massa cápsula vazia + massa amostra seca calcinada (g).

A equação 11, por sua vez, apresenta a expressão para cálculo do teor de sólidos voláteis:

$$SV = ST - SF \quad (11)$$

em que:

SV são os sólidos voláteis (%);

ST são os sólidos totais (%); e,

SF são os sólidos fixos (%).

Os resultados de sólidos totais, fixos e voláteis foram utilizados para a comparação entre os lodos e escumas.

Para se obter diversas concentrações das amostras, em ambiente laboratorial, fracionou-se o volume total de lodos e escumas em recipientes de vidro contendo 500 mL de amostra cada. Os recipientes contendo os lodos e escumas foram inseridos na estufa de secagem a 103 °C. Esse procedimento foi realizado com o intuito de remover, parcialmente e em condições controladas, a água contida nos lodos e escumas de forma a proporcionar amostras com diferentes teores de sólidos totais. Para tanto, os recipientes foram mantidos no interior da estufa em distintos intervalos de tempo, sendo que o tempo máximo de permanência foi de 48 horas.

Com o procedimento descrito foi possível obter cinco concentrações de amostras de lodo A, lodo B, espuma e lodo C, conforme demonstra a TABELA 3.

TABELA 3 - CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS NAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMA

Teor de sólidos totais (%)			
Lodo A	Lodo B	Escuma	Lodo C
5,3 ± 0,23	1,5 ± 0,17	18,4 ± 0,62	13,2 ± 0,80
17,4 ± 0,28	10,8 ± 0,26	26,5 ± 0,43	24,6 ± 0,64
41,5 ± 0,15	33,8 ± 0,25	41,1 ± 0,35	38,1 ± 0,38
55,0 ± 0,21	48,0 ± 0,22	64,0 ± 0,23	55,8 ± 0,31
90,0 ± 0,13	90,0 ± 0,10	80,9 ± 0,18	84,9 ± 0,16

As diversas concentrações de lodos e escumas foram utilizadas para a determinação da difusividade térmica, com o intuito de verificar a relação entre sólidos totais e a difusividade térmica.

4.2 DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM

A FIGURA 4 apresenta o fluxograma das etapas seguidas para a determinação das curvas de secagem dos lodos e escumas.



FIGURA 4 - FLUXOGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DAS CURVAS DE SECAGEM

Para a determinação das curvas de secagem das amostras de lodos e escumas foram utilizadas as amostras coletadas nos pontos mencionados no item 4.1 com o teor de sólidos das amostras sem tratamento, sendo a amostra de lodo A contendo 5,3% de sólidos totais, amostra do lodo B contendo 1,5% de sólidos totais, amostra de espuma contendo 18,4% de sólidos totais e amostra de lodo C contendo 13,2% de sólidos totais. Determinaram-se os teores de sólidos totais em função do tempo de secagem das amostras, utilizando o medidor de umidade termogravimétrico (marca Sartorius, modelo MA35) com resolução de 1 mg (FIGURA 5). O medidor termogravimétrico é uma balança para determinação de umidade com aquecimento infravermelho promovido por um elemento metálico. Para avaliar a influência da temperatura na curva de secagem dos lodos, definiram-se duas temperaturas para análise: 103 °C e 140 °C. A temperatura de 103 °C foi definida por ser a temperatura recomendada no Standart Methods (2012) para determinação de sólidos totais. A temperatura de 140 °C foi escolhida por ser a temperatura do limite máximo de análise no medidor termogravimétrico e também por não permitir perda de material volátil.

Inicialmente, a balança foi zerada utilizando o prato metálico previamente seco na estufa de secagem a 103 °C com a finalidade de remoção de toda a umidade eventualmente nele depositada. Em seguida, colocou-se aproximadamente 12 g de amostra no prato metálico e encaminhou-se para a balança até resultado

constante, ou seja, por um período suficiente para a retirada da umidade na amostra, restando apenas os sólidos totais.

Verificou-se a cada dois minutos o teor de umidade da amostra para 103 e 140 °C. O resultado foi dado diretamente no indicador visual da balança e expresso em teor de umidade. A curva de secagem foi utilizada para mensurar a fração de massa residual dos materiais sob análise, quando submetidos a processo de secagem em diferentes temperaturas.



FIGURA 5 - FOTO DO MEDIDOR DE UMIDADE TERMOGRAVIMÉTRICO
FONTE: O autor (2015)

Os resultados foram apresentados em gráficos, os quais mostram a curva dos lodos e escumas ao longo do processo de secagem nas temperaturas distintas. O eixo “y” foi expresso em fração de massa (x), ou seja, refere-se às quantidades de água que as massas de lodos e espuma perderam ao longo do processo de aquecimento e o eixo “x” representa o tempo de secagem (t) em minutos. A umidade dos sólidos refere-se à quantidade de água associada ao sólido, seja na forma ligada ou livre. Ao final do experimento, ou seja, até a massa constante, o lodo, isento de umidade, possui apenas sólidos totais em sua composição.

Para avaliação dos resultados, foi considerado o tempo (t) para a secagem até a redução de 50% da fração de massa (x), redução de 80% da fração de massa e o tempo até que a massa residual apresentasse massa constante. A FIGURA 6 ilustra o diagrama esquemático para avaliação da curva de secagem para os lodos e escumas.

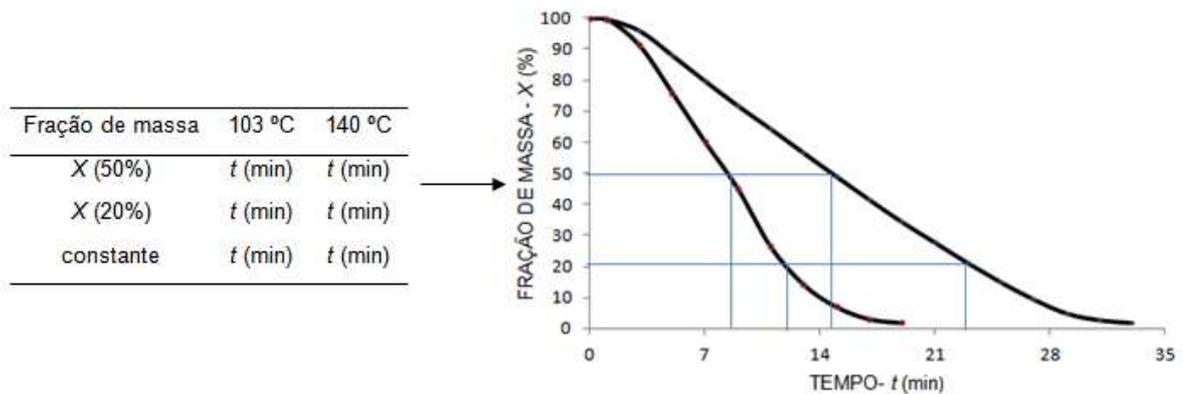


FIGURA 6 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO PARA AVALIAÇÃO DA CURVA DE SECAGEM

Para a comparação entre as amostras de lodos e escumas foram elaborados gráficos que apresentam o acréscimo dos sólidos totais ao longo do tempo (t) em minutos, bem como o decréscimo da umidade ao longo do experimento. Calcularam-se as taxas de variação do teor de sólidos totais ao longo do tempo por meio de derivadas numéricas ($dST \cdot dt^{-1}$).

Os procedimentos experimentais para determinação da curva de secagem no medidor de umidade termogravimétrico para as amostras de lodos e espuma foram realizados em triplicata, sob condições de reprodutibilidade. Os dados obtidos experimentalmente foram tratados no programa OriginPro[®], versão 8.0, a partir do qual foram gerados gráficos e calculadas a média e a incerteza expandida para um nível de confiança de 95% para todas as curvas de secagem obtidas. Os dados apresentados nos gráficos representam a média dos resultados obtidos com os experimentos.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS DIFUSIVIDADES TÉRMICAS

A FIGURA 7 apresenta o fluxograma das etapas seguidas para o estudo das difusividades térmicas dos lodos e escumas.

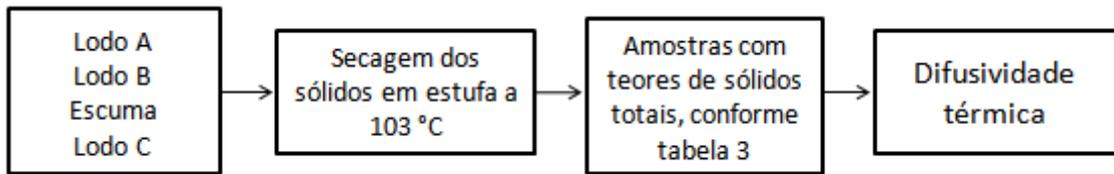


FIGURA 7 - FLUXOGRAMA PARA OS ESTUDOS DAS DIFUSIVIDADES TÉRMICAS DAS AMOSTRAS

As difusividades térmicas das amostras de lodos e escumas foram determinadas de acordo com o método proposto por Chung e Jackson (1954) e adaptado por Clivati (1991), considerando-as como meios porosos com baixa condutividade térmica.

Para tanto, alíquotas das amostras de lodos e escumas foram individualmente introduzidas em um tubo de alumínio com $(15,20 \pm 0,01)$ cm de comprimento, $(1,90 \pm 0,01)$ cm de diâmetro interno e $(0,16 \pm 0,01)$ cm de espessura. A base desse tubo foi vedada com uma borracha de silicone. Um termopar do tipo J (marca Termopa) foi também inserido no tubo com o intuito de mensurar a temperatura das amostras, com resolução de $0,1$ °C. Os terminais desse termopar foram acoplados a um aquisitor de dados (FIGURA 8) (marca Novus, FieldLogger), o qual foi configurado para registrar as medições de temperatura a cada 5 segundos.

O tubo de alumínio foi acoplado a uma haste metálica por meio de uma presilha e de uma garra, de tal forma que fosse possível deslocá-lo verticalmente. Em um primeiro momento, manteve-se o conjunto suspenso e em contato apenas com o ar a $(28,66 \pm 0,45)$ °C e com $(57,24 \pm 3,61)\%$ de umidade relativa. A temperatura da amostra foi mensurada nessa condição ao longo de 60 segundos. Em seguida promoveu-se o aquecimento do tubo de alumínio, e, por consequência, das amostras do lodo e da espuma contido em seu interior, por meio de sua imersão no reservatório de água de um banho térmico (marca Nova Ética, modelo 521/4D) programado para operar a $(45,4 \pm 0,2)$ °C.



FIGURA 8 - AQUISITOR DE DADOS
FONTE: O autor (2015)

Ao longo de 200 segundos, monitoraram-se os aumentos da temperatura das amostras de lodos e da espuma. Além disso, simultaneamente, mensurou-se a temperatura da água contida no reservatório do banho térmico com o auxílio de um termopar semelhante aquele descrito anteriormente. A FIGURA 9 mostra uma foto do arranjo experimental montado para avaliar as amostras de lodos e de espuma.

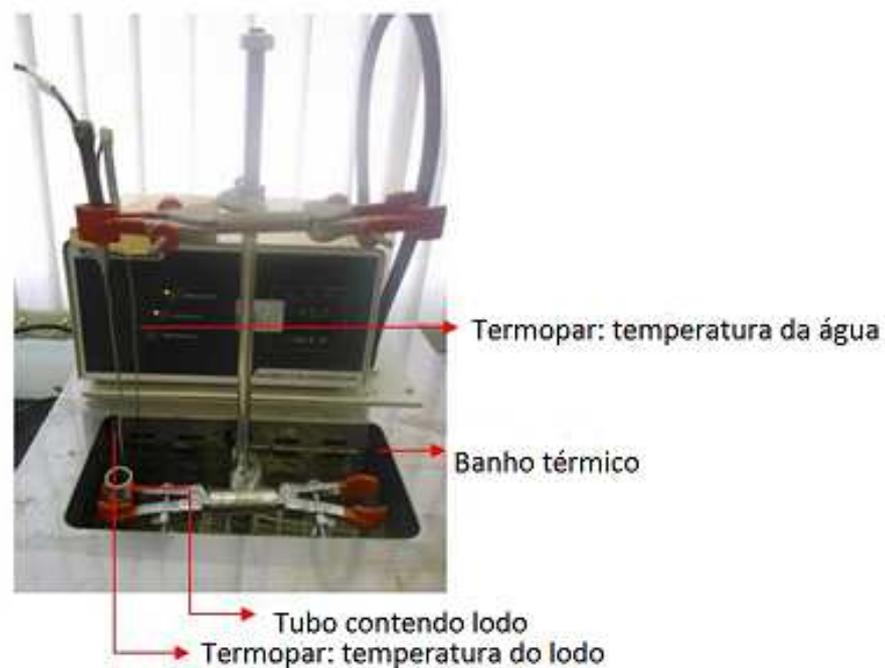


FIGURA 9 - ARRANJO EXPERIMENTAL COM TUBO DE ENSAIO CONTENDO A AMOSTRA E IMERSA NO BANHO TÉRMICO
FONTE: O autor (2015)

As difusividades térmicas (D) das amostras foram calculadas por meio da seguinte equação 12 (CLIVATI, 1991):

$$D = \frac{2,303.b.r^2}{\chi^2} \quad (12)$$

em que:

D é a difusividade térmica ($\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$);

b é o coeficiente angular da reta ajustada ao logaritmo, na base 10, conforme a equação 13;

r é o raio do tubo de alumínio (cm); e,

χ é uma constante com valor igual a 2,405.

$$Y(t) = \frac{T_B - T(t)}{T_B - T_0} = A.10^{-bt} \quad (13)$$

$$\log Y = \log A - bt \quad (14)$$

em que:

A é uma constante;

T_B é a temperatura da água contida no reservatório do banho térmico ($^{\circ}\text{C}$);

T_0 é a temperatura inicial da amostra de lodo ($^{\circ}\text{C}$);

$T(t)$ é a temperatura da amostra do lodo durante o processo de aquecimento ($^{\circ}\text{C}$), no instante de tempo t (s); e,

$\log(A)$ é o coeficiente linear da reta ajustada aos resultados da operação $\log Y$.

Para que as leituras da temperatura fossem realizadas corretamente, o termopar foi posicionado no centro do tubo, com o intuito de garantir a correta obtenção da temperatura das amostras, pois um desvio na posição do termopar poderia ocasionar leituras errôneas.

Os procedimentos experimentais para a determinação das difusividades térmicas das amostras de lodos e escumas em diferentes teores de sólidos totais

foram realizados em triplicata, sob condições de reprodutibilidade. Os dados obtidos experimentalmente foram tratados no programa OriginPro[®], versão 8.0, a partir do qual foram gerados gráficos, linearizações e regressões, assim como foram calculadas a média e a incerteza expandida para um nível de confiança de 95% para as difusividades térmicas obtidas para cada amostra de lodo e escuma sob investigação. Os dados dos gráficos e tabelas representam a média dos resultados obtidos no experimento.

A FIGURA 10 ilustra um diagrama do procedimento matemático de determinação da difusividade térmica das amostras de lodo, a partir de medições de temperatura.

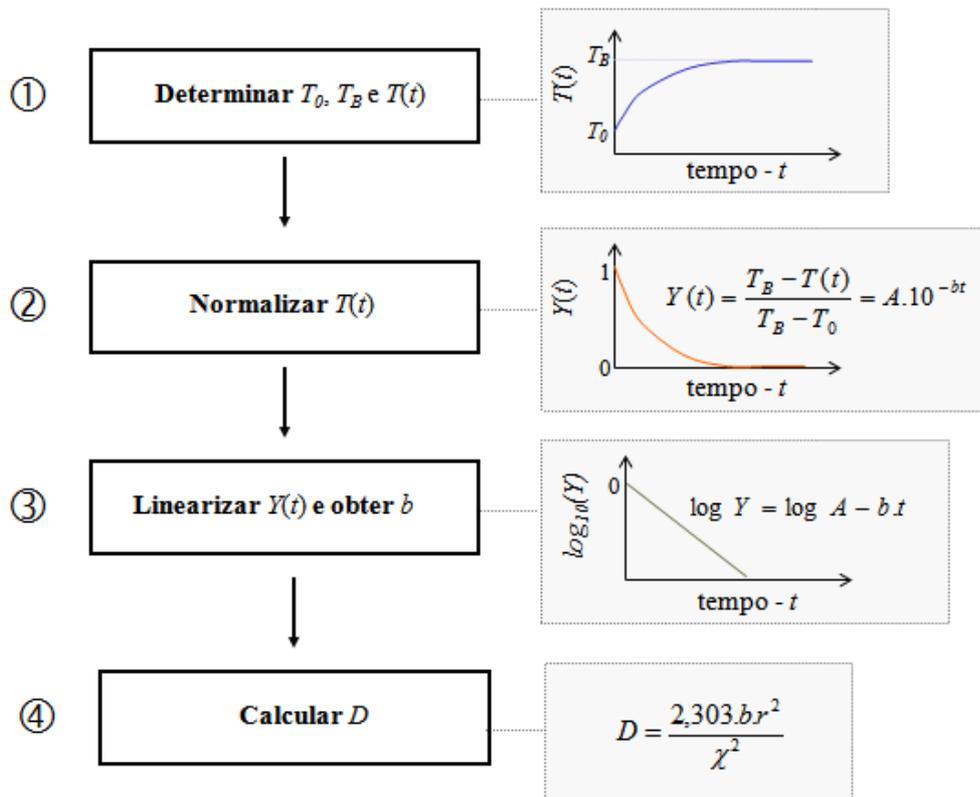


FIGURA 10 - DIAGRAMA DO PROCEDIMENTO MATEMÁTICO PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA
 FONTE: O autor (2015)

De acordo com o diagrama do procedimento matemático, na etapa 1 mediram-se a temperatura do banho térmico, a temperatura inicial da amostra de lodos e escumas e a temperatura da amostra ao longo do processo de aquecimento. Em seguida os resultados obtidos no experimento foram normalizados, conforme

mostra a etapa 2 e, posteriormente, os comportamentos foram linearizados com o auxílio da função logaritmo na base 10 (etapa 3). Após a obtenção do coeficiente angular da reta (b), a difusividade térmica foi calculada, conforme a etapa 4 do diagrama do procedimento matemático.

Para o estudo da difusividade térmica em função dos sólidos totais foram elaborados gráficos e definidas equações matemáticas não linear para o lodo A, lodo B e espuma e equação matemática linear para o lodo C. Elaborou-se uma tabela, onde consta os valores de difusividade térmica para uma ampla faixa de concentrações de sólidos totais utilizando as equações matemáticas definidas no presente trabalho.

Para a comparação dos resultados de difusividade térmica entre as amostras de lodos e espumas foram utilizados os resultados das análises de sólidos totais, fixos e voláteis, bem como a porcentagem de sólido voláteis e fixos em relação aos sólidos totais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CURVA DE SECAGEM DE LODOS E ESCUMAS

5.1.1 Lodo anaeróbio

A TABELA 4 apresenta os resultados dos teores de sólidos totais nas diferentes temperaturas para o lodo anaeróbio (lodo A). A 103 °C o lodo apresentou $(5,38 \pm 0,23)\%$ de sólidos totais, sendo o tempo de secagem completo igual a (41 ± 3) minutos. Por sua vez, para a temperatura de 140 °C o resultado obtido foi de $(5,45 \pm 0,10)\%$ de sólidos totais, com tempo de secagem completo igual a (24 ± 2) minutos. Considerando a faixa de incerteza das medições, os resultados dos sólidos totais para as temperaturas de 103 e 140 °C foram iguais, demonstrando que houve perda somente da umidade do lodo A e não houve perda de matéria orgânica durante o processo de secagem.

TABELA 4 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO A 103 °C E A 140 °C

Lodo	Temperatura (°C)	Sólidos totais (%)	Tempo de secagem (min)
Anaeróbio	103	$5,38 \pm 0,23$	41 ± 3
Anaeróbio	140	$5,45 \pm 0,10$	24 ± 2

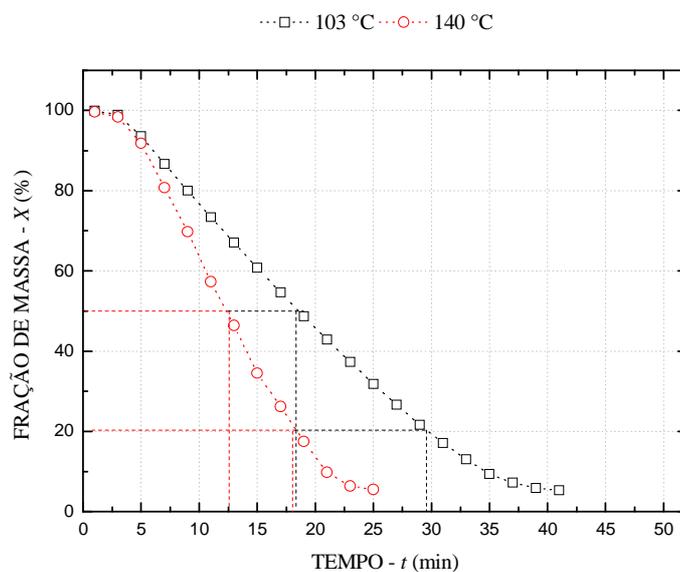


GRÁFICO 1 - CURVA DE SECAGEM DO LODO A

Na curva de secagem apresentada no GRÁFICO 1 para o lodo A, verificou-se que a perda da umidade da amostra analisada possui comportamento decrescente, não apresenta período de secagem constante e a curva é não linear em ambas as temperaturas avaliadas.

A TABELA 5 apresenta os tempos em que a fração de massa (x) do lodo A atingiu 50%, 20% e massa constante durante o aquecimento nas temperaturas de 103 °C e 140 °C, bem como a porcentagem de redução do tempo de secagem ao se utilizar a temperatura maior.

TABELA 5 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DO LODO A EM 103 °C E 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA

Fração de massa – X	103 °C (min)	140 °C (min)	Redução do tempo (%)
50%	18 ± 3	12 ± 2	33
20%	30 ± 3	18 ± 1	40
Constante	41 ± 3	24 ± 2	41

Constatou-se que a perda da umidade aconteceu mais rapidamente com aplicação de temperatura mais elevada, pois a 103 °C, o tempo necessário para a massa atingir resultado constante foi de (41 ± 3) minutos, enquanto que a 140 °C foi de (24 ± 2) minutos. Com a elevação de aproximadamente 26% da temperatura, ou seja, de 103 °C para 140°C, o intervalo de tempo para remoção completa de água foi 41% menor que aquele verificado a 103 °C. Isso faz com que seja reduzido significativamente o tempo necessário para a secagem da amostra.

Para a redução de massa de 50% a 103 °C, o tempo necessário foi de (18 ± 3) minutos e representou menos da metade do tempo para a redução de toda a umidade contida na amostra de lodo A, enquanto que a 140 °C foi de (12 ± 2) minutos e apresentou a metade do tempo para atingir a fração de massa constante. Comparando as temperaturas, a maior apresentou tempo de secagem 33% inferior em relação à temperatura menor.

Considerando a fração de massa contendo 20%, foram necessários, a 103 °C, (30 ± 3) minutos para a secagem do lodo, o que significa que o tempo foi aproximadamente 27% menor que o tempo necessário para a fração de massa atingir massa constante. Para 140 °C, o tempo de (18 ± 1) minutos foi o suficiente para a redução de massa até 20% e foi cerca de 25% menor que para atingir a

fração de massa constante. Comparando as duas temperaturas de operação, o tempo médio de redução para a secagem utilizando a maior temperatura foi de 40%.

Observou-se que 18 minutos foram suficientes para reduzir a massa do lodo A até 50% utilizando 103 °C, enquanto que a 140 °C, esse mesmo tempo foi o suficiente para a fração de massa atingir 20%. Com isso foi possível verificar que utilizando a temperatura mais elevada e, independente da fração de massa que se necessita obter, a elevação da temperatura reduz consideravelmente o tempo de secagem do lodo A.

5.1.2 Lodo aeróbio

A TABELA 6 apresenta os resultados dos teores de sólidos totais para o lodo aeróbio (lodo B) nas temperaturas de 103 e 140 °C. O teor de sólidos totais encontrado para a temperatura de 103 °C foi de $(1,99 \pm 0,17)$ % e tempo de secagem de (33 ± 3) minutos. Para 140 °C, o lodo apresentou teor de sólidos totais de $(1,94 \pm 0,09)$ % e tempo de secagem de (19 ± 3) minutos.

TABELA 6 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DO LODO B A 103 °C E 140 °C

Lodo	Temperatura (°C)	Sólidos totais (%)	Tempo de secagem (min)
Aeróbio	103	$1,99 \pm 0,17$	33 ± 3
Aeróbio	140	$1,94 \pm 0,09$	19 ± 3

O GRÁFICO 2 refere-se a curva de secagem para o lodo B. Assim como a curva de secagem para o lodo A, a curva de secagem do lodo aeróbio apresenta comportamento decrescente, ausência de período de secagem constante e a curva é não linear nas temperaturas de 103 °C e 140 °C.

A TABELA 7 apresenta os tempos em que a fração de massa (x) do lodo B atingiu 50%, 20% e massa constante durante o aquecimento nas temperaturas de 103 °C e 140 °C, bem como o cálculo da redução do tempo ao se aplicar a temperatura de 140 °C.

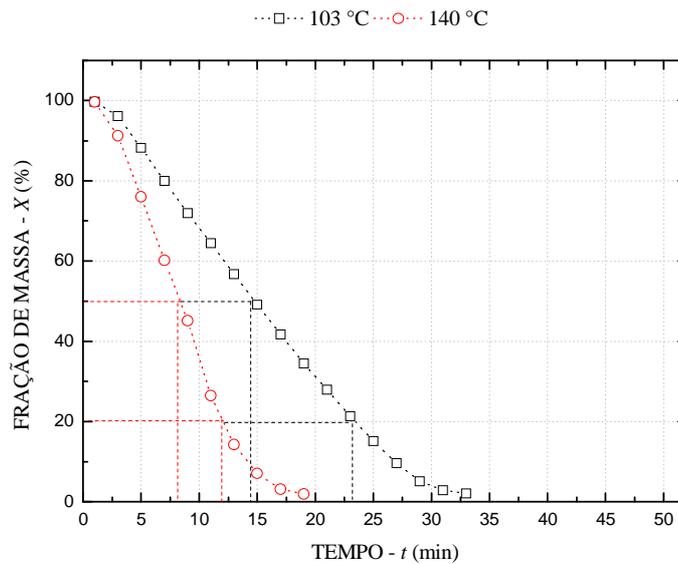


GRÁFICO 2 - CURVA DE SECAGEM DO LODO B

TABELA 7 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DO LODO B A 103 °C E A 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA

Fração de massa - X	103 °C (min)	140 °C (min)	Redução do tempo (%)
50%	15 ± 2	8 ± 2	46
20%	23 ± 4	12 ± 1	47
Constante	33 ± 3	19 ± 3	42

Verificou-se que a perda da umidade ao longo do período de secagem das amostras aconteceu rapidamente a 140 °C, pois o tempo necessário para o lodo B atingir a fração de massa constante foi de (19 ± 3) minutos, enquanto que a 103 °C foi de (33 ± 3) minutos. Para a remoção total da umidade até a massa constante, a 140 °C o intervalo de tempo foi 42% menor que aquele verificado para 103 °C.

A fração de massa contendo 50% a 103 °C necessitou de (15 ± 2) minutos para a secagem e apresentou cerca de 54% a menos que o tempo total para redução até massa constante, enquanto que a 140 °C foram necessários (8 ± 2) minutos, o que representa ser aproximadamente 57% a menos que o tempo total para atingir a fração de massa constante. Comparando as temperaturas, a 140 °C o tempo médio de secagem foi 46% inferior em relação a 103 °C.

Em relação à fração de massa contendo 20%, com (23 ± 4) minutos foi possível a secagem do lodo B a 103 °C, o que representa ser 30% a menos que o tempo necessário para a fração de massa atingir o valor constante. Com 140 °C, o

tempo de (12 ± 1) minutos foi o suficiente para a redução de massa até 20% e foi cerca de 36% menor que para atingir a fração de massa constante. Comparando as temperaturas utilizadas, o tempo de redução para a secagem utilizando a maior temperatura foi de 47%.

Ao ser utilizado $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ para atingir a fração de massa de 20% foram demandados (12 ± 1) minutos de aquecimento, enquanto que a $103\text{ }^{\circ}\text{C}$, (15 ± 2) minutos foram suficientes para a fração de massa atingir 50%. Com os dados apresentados verificou-se que a temperatura maior reduz consideravelmente o tempo médio de secagem do lodo B em todas as frações de massas.

5.1.3 Escuma

A TABELA 8 apresenta os resultados dos teores de sólidos totais para a amostra de escuma à 103 e $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. O teor de sólidos totais encontrado para $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de $(18,38 \pm 0,80)\%$ e tempo de secagem de (44 ± 6) minutos. Para $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, a escuma apresentou teor de sólidos totais de $(17,54 \pm 0,60)\%$ e tempo de secagem de (27 ± 2) minutos.

TABELA 8 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DA ESCUMA A $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ E A $140\text{ }^{\circ}\text{C}$

Escuma	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Sólidos totais (%)	Tempo de secagem (min)
Anaeróbia	103	$18,38 \pm 0,80$	44 ± 6
Anaeróbia	140	$17,54 \pm 0,60$	27 ± 2

Na curva de secagem apresentada no GRÁFICO 3 para a amostra de escuma, foi observado que a perda da umidade da amostra analisada apresenta comportamento decrescente, período de secagem praticamente constante somente no final do experimento e a curva é não linear em ambas as temperaturas analisadas.

A TABELA 9 apresenta os tempos em que a fração de massa (x) da escuma atingiu 50%, 20% e massa constante de sólidos totais durante o aquecimento nas temperaturas de $103\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a porcentagem de redução do tempo de secagem ao se utilizar a temperatura de $140\text{ }^{\circ}\text{C}$.

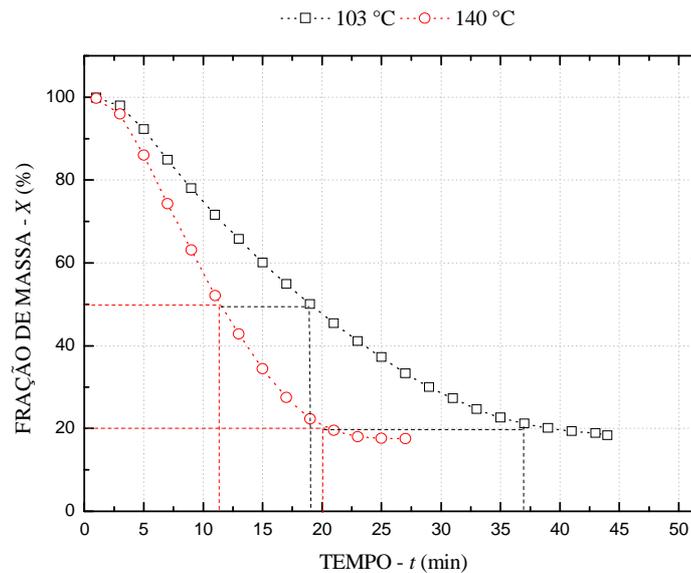


GRÁFICO 3 - CURVA DE SECAGEM DA ESCUMA

TABELA 9 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DA ESCUMA A 103 °C E A 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA

Fração de massa - X	103 °C	140 °C	Redução do tempo (%)
50%	19 ± 4	11 ± 4	42
20%	37 ± 6	20 ± 3	46
Constante	44 ± 6	27 ± 2	38

Verificou-se que (27 ± 2) minutos foi o intervalo de tempo suficiente para a espuma atingir a fração de massa constante a 140 °C, enquanto que a 103 °C o tempo necessário foi de (44 ± 6) minutos. Considerando a maior temperatura, o intervalo de tempo para remoção total da umidade até a massa constante foi aproximadamente 38% menor que o verificado para a temperatura mais baixa.

Para a espuma atingir a fração de massa de 50% a 103 °C foram necessários (19 ± 4) minutos para a secagem, sendo o tempo aproximadamente 56% menor que o necessário para a redução até massa constante. Para a temperatura de 140 °C, (11 ± 4) minutos foram suficientes para a fração de massa atingir 50%, o que representa cerca de 59% a menos que o tempo total de redução até massa constante. Comparando as temperaturas, a 140 °C, o tempo médio de secagem foi 46% inferior em relação a 103 °C.

Em relação a secagem da amostra até a fração de massa contendo 20%, o intervalo de tempo de (37 ± 6) minutos foi o suficiente para a secagem da espuma a

103 °C, o que apresenta ser 16% a menos que o tempo necessário para a fração de massa atingir o valor constante. Elevando-se a temperatura para 140 °C, (20 ± 3) minutos foi o intervalo de tempo necessário para a redução de massa até 20%, sendo que essa redução representa cerca de 26% a menos para atingir a fração de massa constante. Comparando as temperaturas utilizadas, o tempo de redução para a secagem utilizando a maior temperatura foi de 38%.

Observou-se que utilizando a temperatura de 140 °C, (20 ± 3) minutos foram decorridos para a fração de massa atingir 20%. Por outro lado, a 103 °C, demandaram-se (19 ± 4) minutos para a fração de massa atingir 50%. Assim foi possível verificar que ao se elevar a temperatura, o tempo de secagem da amostra de espuma é reduzido em todas as frações de massas.

5.1.4 Lodo de ETA

A TABELA 10 apresenta os resultados dos teores de sólidos totais para o lodo C, a 103 °C e a 140 °C. O teor de sólidos totais encontrado a 103 °C foi de (13,17 ± 0,62)% e tempo de secagem foi de (49 ± 4) minutos. A 140 °C, o lodo apresentou teor de sólidos totais de (13,07 ± 0,55)% e tempo de secagem de (39 ± 2) minutos. Os resultados demonstraram que o processo foi apenas de secagem, pois não houve alteração na quantidade de sólidos totais presente nas amostras de lodo C.

TABELA 10 - TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS DA LODO C A 103 °C E A 140 °C

Lodo	Temperatura (°C)	Sólidos totais (%)	Tempo de secagem (min)
ETA	103	13,17 ± 0,62	49 ± 4
ETA	140	13,07 ± 0,55	39 ± 2

O GRÁFICO 4 representa a curva de secagem para o lodo C, onde verificou-se que a perda da umidade da amostra analisada apresenta comportamento decrescente, período de secagem constante somente no final do experimento e a curva é não linear em ambas as temperaturas utilizadas.

A TABELA 11 apresenta os tempos em que a fração de massa (x) do lodo C atingiu 50%, 20% e massa constante durante o processo de aquecimento nas

temperaturas de 103 °C e 140 °C, bem como a porcentagem de redução do tempo de secagem ao se utilizar a temperatura maior.

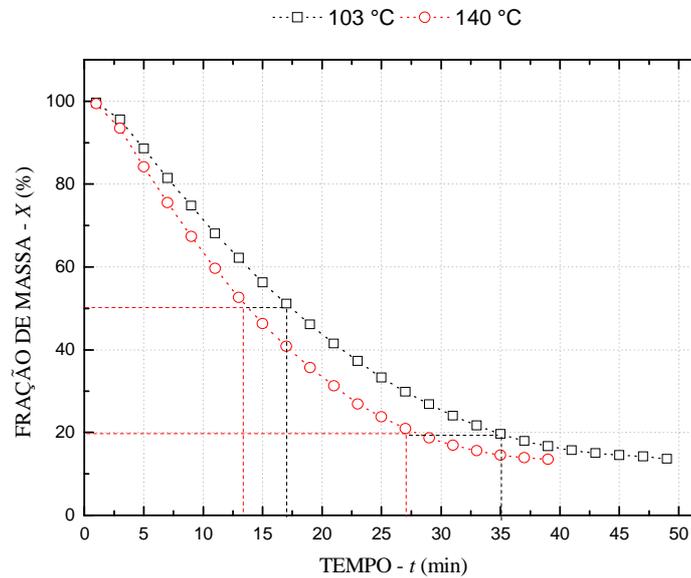


GRÁFICO 4 - CURVA DE SECAGEM DO LODO C

TABELA 11 - FRAÇÃO DE MASSA (X) DO LODO C A 103 °C E 140 °C E REDUÇÃO DO TEMPO DE SECAGEM (%) PROPORCIONADA PELO AUMENTO DA TEMPERATURA

Fração de massa - X	103 °C (min)	140 °C (min)	Redução do tempo (%)
50%	17 ± 4	13 ± 2	23
20%	35 ± 5	27 ± 3	23
Constante	49 ± 4	39 ± 2	20

Observou-se que a perda da umidade ao longo do processo de secagem das amostras de lodo C ocorreu mais acelerada a 140 °C, com o tempo de (39 ± 2) minutos para o lodo atingir a fração de massa constante, sendo que a 103 °C o tempo necessário foi de (49 ± 4) minutos. Para a remoção total da umidade até a massa constante a 140 °C, o intervalo de tempo foi 20% menor que aquele verificado para 103 °C.

Para a fração de massa contendo 50%, a 103 °C, foram necessários (17 ± 4) minutos para a secagem do lodo C, o que representa aproximadamente 65% a menos do que o tempo para a redução até massa constante. Para a temperatura de 140 °C foram necessários (13 ± 2) minutos de secagem e esse tempo foi cerca de 67% menor que o tempo total para atingir a fração de massa constante.

Comparando as temperaturas avaliadas, o tempo de secagem reduziu aproximadamente 20% quando se elevou a temperatura de 103 para 140 °C.

Em relação à fração de massa contendo 20%, (35 ± 5) minutos foram suficientes para a secagem do lodo C a 103 °C, o que apresenta 28% a menos que aquele intervalo de tempo necessário para a fração de massa atingir o valor constante. A 140 °C, o intervalo de tempo de (27 ± 3) minutos foi o suficiente para a redução de massa até 20% e foi cerca de 31% menor que o tempo para atingir a fração de massa constante. Comparando as temperaturas, o tempo de redução para a secagem do lodo C foi 23% quando se aplicou a temperatura mais elevada.

Como o lodo de ETA é de difícil desidratação (RICHTER, 2001) elevando-se a temperatura a 140 °C, o tempo de redução do processo de secagem em comparação a 103 °C foi de aproximadamente 20% para a fração de massa constante. Para o lodo C a maior temperatura reduziu o tempo de secagem em todas as frações de amostras, porém essa redução foi inferior a 25%.

5.1.5 Comparação entre os lodos e escumas

O GRÁFICO 5 apresenta as taxas de variação dos teores de sólidos totais em função do tempo de secagem para as amostras de lodo A, lodo B, espuma e lodo C. Observa-se que a 103 °C (a), a taxa de variação é menor e o período de secagem é mais longo em comparação a 140 °C (b).

Verificou-se também que, a 103 °C, durante os primeiros sete minutos de secagem, a taxa de variação de sólidos totais foi elevada, sendo que a taxa $(dS . dt^{-1})$ variou de -4,06 a -3,39 $\% \cdot \text{min}^{-1}$, ou seja, nesse período a umidade contida nas amostras foi removida rapidamente. Após os sete minutos iniciais até os 25 minutos, as amostras apresentaram um período levemente decrescente, sendo as taxas variando de -3,39 a -2,67 $\% \cdot \text{min}^{-1}$ para o lodo A, -3,86 a -2,92 $\% \cdot \text{min}^{-1}$ para o lodo B, -3,33 a -1,95 $\% \cdot \text{min}^{-1}$ para a espuma e -3,34 a -1,85 $\% \cdot \text{min}^{-1}$ para o lodo C, demonstrando que a umidade contida nas amostras estava sendo removida com mais dificuldade. Após esse período, as amostras passaram por uma nova etapa decrescente até a remoção total da umidade, apresentando taxas de variação de -2,55 a -0,24 $\% \cdot \text{min}^{-1}$, -2,50 a -0,43 $\% \cdot \text{min}^{-1}$, -1,80 a -0,46 $\% \cdot \text{min}^{-1}$ e -1,61 a -0,16 $\% \cdot \text{min}^{-1}$ para o lodo A, lodo B, espuma e lodo C, respectivamente. Já a 140 °C, nos primeiros cinco minutos a umidade foi ligeiramente retirada das amostras,

principalmente para a amostra de lodo B, pois ocorreu a maior taxa de secagem entre as demais amostras analisadas, sendo a taxa de $-7,76 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$. Entre os cinco e treze minutos de secagem, observa-se um período de taxa levemente decrescente, ou seja, um período em que a remoção da umidade ocorreu lentamente, com taxas variando de $-5,70$ a $-5,52 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$ para o lodo A, $-7,72$ a $-5,09 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$ para o lodo B, $-5,73$ a $-4,42 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$ para a espuma e $-4,20$ a $-3,34 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$ para o lodo C. A partir dos treze minutos ocorreu um período de decréscimo acentuado até a remoção total da umidade, caracterizando assim o final do experimento, sendo as taxas de variação de $-5,04$ a $-0,77 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$, $-2,94$ a $-0,26 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$, $-3,85$ a $-0,04 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$ e $-2,95$ a $-0,14 \text{ \%}.\text{min}^{-1}$ para o lodo A, lodo B, espuma e lodo C, respectivamente.

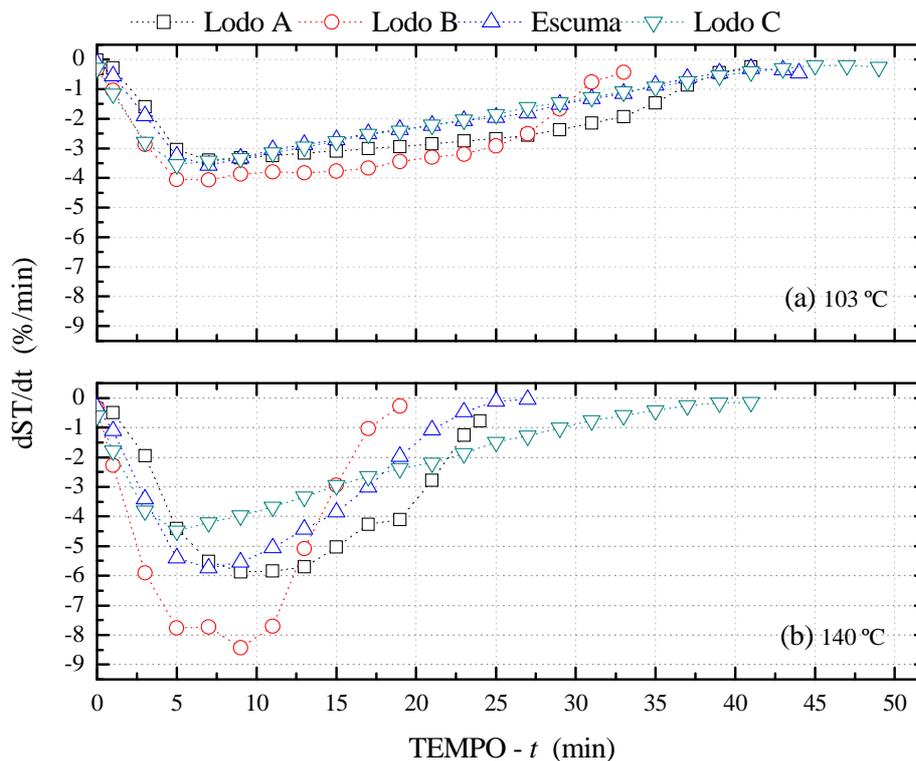


GRÁFICO 5 - DERIVADAS NUMÉRICAS DAS TAXAS DE VARIAÇÃO DE ST EM RELAÇÃO AO TEMPO PARA AS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMAS (a) 103 °C (b) 140 °C

De modo geral, para ambas as temperaturas e amostras analisadas verificaram-se três períodos, ou seja, primeira etapa de decréscimo acentuado, segunda etapa de taxa levemente decrescente e terceira etapa de taxa com

decréscimo acentuado, variando-se o tempo final de experimento para cada amostra. O lodo C apresentou a maior dificuldade de desidratação, pois a taxa de variação foi de $-3,54 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a $103 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-4,49 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a $140 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto que o lodo B demonstrou ter a maior facilidade de desidratação, com taxas de $-4,06 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a $103 \text{ }^\circ\text{C}$ e $-8,43 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a $140 \text{ }^\circ\text{C}$.

Assim, pode-se deduzir que na primeira etapa de decréscimo acentuado a água livre, que é a água de fácil remoção, foi retirada dos materiais. Já na segunda etapa, no período levemente decrescente, a água intersticial, ou seja a água presa nas fendas e nos espaços intersticiais dos flocos, pode ter sido removida, enquanto que na terceira etapa com decréscimo acentuado, a água superficial, ou seja, a água aderida a superfície das amostras, pode ter sido retirada dos materiais.

O GRÁFICO 6 apresenta o acréscimo do teor de sólidos em função do tempo de secagem, bem como o decréscimo do teor de umidade para as amostras de lodos e escumas a $103 \text{ }^\circ\text{C}$ (a) e a $140 \text{ }^\circ\text{C}$ (b).

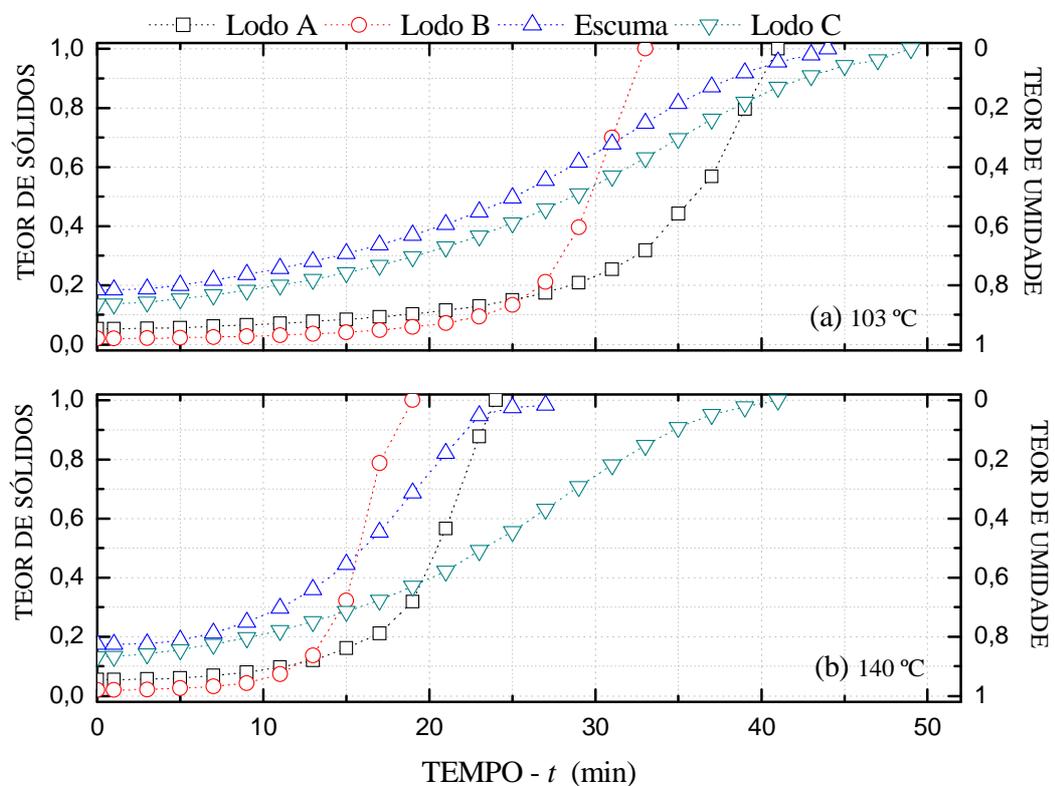


GRÁFICO 6 - VARIAÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS E TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMAS EM FUNÇÃO DO TEMPO : (a) a $103 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) a $140 \text{ }^\circ\text{C}$

Verificou-se que a variação do teor de sólidos totais a 103 °C para as amostras de lodos e escumas seguem um comportamento não linear e crescente. O lodo A e lodo B apresentaram comportamentos parecidos até aproximadamente 27 minutos, porém a secagem para o lodo B foi mais rápida sendo finalizada em (33 ± 3) minutos, enquanto o lodo A em (41 ± 3) minutos. A espuma e o lodo C apresentaram comportamento similar, porém a espuma precisou de (44 ± 6) minutos para atingir o teor de sólidos final enquanto o lodo C demonstrou ser a amostra de mais difícil desidratação, sendo necessários (49 ± 4) minutos.

Observa-se que a variação do teor de sólidos a 140 °C para as amostras de lodos e escumas, assim como a 103 °C, segue comportamento não linear e crescente. O lodo A e B apresentaram curva de teor de sólidos semelhantes até cerca de 12 minutos, porém o lodo B atingiu o teor de sólidos totais constante em (19 ± 3) minutos, enquanto o lodo A em (24 ± 2) minutos. A espuma precisou de (27 ± 2) minutos para chegar ao teor de sólidos totais constante e o lodo C necessitou de (39 ± 2) minutos, demonstrando que mesmo com a elevação da temperatura, o lodo C é de difícil desidratação.

De modo geral, o lodo B demonstrou ter a secagem mais acelerada que as demais amostras de lodos e escumas até o teor de sólidos totais constante, apresentando os tempos de (33 ± 3) e (19 ± 3) minutos para as temperaturas de 103 e 140 °C, respectivamente, enquanto que o lodo C foi a amostra de desidratação mais demorada, necessitando de (49 ± 4) e (39 ± 2) minutos para atingir o teor de sólidos constante a 103 e 140 °C, respectivamente.

A diferença de tempo de secagem entre as amostras de lodos e escumas pode estar associada as características intrínsecas de cada amostra, pois as amostras apresentam teor de sólidos totais diferentes, bem como a relação entre sólidos fixos e voláteis, conforme apresenta a TABELA 12.

TABELA 12 - SÓLIDOS TOTAIS, FIXOS E VOLÁTEIS DAS AMOSTRAS DE LODOS E ESCUMAS E AS RELAÇÕES ENTRE SF/ST E SV/ST

Amostras	Sólidos totais (%)	Sólidos fixos (%)	Sólidos voláteis (%)	Relação SF/ST (%)	Relação SV/ST (%)
Lodo A	$5,38 \pm 0,23$	$2,18 \pm 0,21$	$3,20 \pm 0,21$	40,52	59,48
Lodo B	$1,99 \pm 0,17$	$0,53 \pm 0,15$	$1,46 \pm 0,15$	26,63	73,37
Escuma	$18,38 \pm 0,62$	$6,70 \pm 0,58$	$11,68 \pm 0,58$	36,45	63,55
Lodo C	$13,17 \pm 0,80$	$7,39 \pm 0,75$	$5,78 \pm 0,75$	56,11	43,89

O lodo B apresentou mais umidade que o lodo A e a espuma e também verificou-se que é o lodo que contém a menor relação entre sólidos fixos e sólidos totais, ou seja, relação SF/ST de 26,63%, assim, é provável que possua mais água livre e essa apresenta maior facilidade de evaporação. Já o lodo A e a espuma possuem maior quantidade de sólidos e a relação SF/ST maiores, sendo essa relação de 40,52% e 36,45%, respectivamente. Conseqüentemente, o lodo A e a espuma podem ter mais parcela de água intersticial e superficial em sua composição, cuja a remoção no processo de secagem é mais dificultoso. O lodo C, por ser um lodo químico, ou seja, proveniente de processo que utiliza produtos químicos no tratamento, apresenta relação SF/SV de 56,11% e necessita de um período maior para atingir o teor de sólidos totais constante, o que pode ser, provavelmente, devido a uma maior quantidade de água intersticial e superficial na sua composição. Deve-se considerar também que o teor de sólidos totais são diferentes nas amostras de lodos e espumas, pois o lodo A apresentou $(5,38 \pm 0,23)\%$, o lodo B $(1,99 \pm 0,17)\%$, a espuma $(18,38 \pm 0,62)\%$ e o lodo C $(13,17 \pm 0,80)\%$, devido às suas características, composições e origens diferenciadas.

Na secagem térmica de lodos desidratados avaliados por Luo *et al.* (2013), foi observado que as umidades dos lodos removidas durante o período de taxa constante foi a água livre, no primeiro período de queda foi removida a água intersticial e no segundo período de queda foi retirado a água de superfície. A água intracelular (água ligada) foi parcialmente convertida para água livre, água intersticial e água da superfície e o teor de umidade residual foi considerado como água intracelular.

Para as amostras analisadas de lodos e espumas foi possível observar que ao se aplicar uma temperatura 26% mais elevada, ou seja, aumentando a temperatura de 103 °C para 140 °C, a perda de umidade ocorreu aproximadamente 41% mais rapidamente para os lodos A e B, 38% para a espuma e 20% para o lodo C. Em processos que possuem elevada quantidade de lodos destinados para a secagem térmica, um aumento na temperatura pode ser interessante para reduzir o tempo de secagem e desidratar uma maior quantidade de lodos, no entanto estudos mais detalhados devem ser conduzidos para verificar os gastos energéticos ao se elevar a temperatura no processo de secagem térmica.

5.2 DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE LODOS E ESCUMAS

5.2.1 Lodo anaeróbio

O GRÁFICO 7 apresenta os resultados das medições de temperatura das amostras de lodos A em função do tempo, contendo diferentes teores de sólidos totais, quando submetidas ao processo de aquecimento com auxílio do banho térmico. De modo geral, observou-se que o aquecimento das amostras de lodo foi não linear e que as taxas de aquecimento foram distintas.

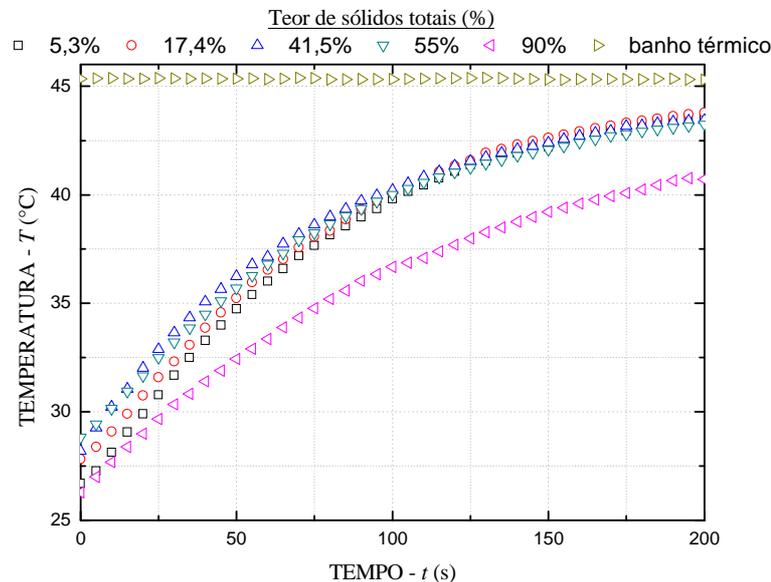


GRÁFICO 7 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO A CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$

As amostras de lodo A contendo até $(55 \pm 0,21)\%$ de sólidos totais atingiram temperaturas próximas à temperatura de equilíbrio (cerca de 45°C) em aproximadamente 200 segundos. Por outro lado, para o lodo contendo $(90 \pm 0,13)\%$ sólidos totais, foi verificado um processo de aquecimento mais demorado em relação às demais amostras analisadas, pois o intervalo de tempo para atingir a temperatura do banho térmico foi superior a 300 segundos. Segundo Clivati (1991) para o método utilizado, as amostras contendo alto teor de sólidos chegam à temperatura de equilíbrio em torno de 240 a 360 segundos, enquanto amostras contendo elevada quantidade de água atingem tal temperatura em torno de 180 a 210 segundos.

O GRÁFICO 8 apresenta os dados de medição de temperatura das amostras de lodo A em função do tempo, normalizados de acordo com a equação 14. Um comportamento não linear e decrescente foi observado para todas as amostras de lodo, sendo que as taxas de decaimento ($-b$) foram distintas e dependentes do teor de sólidos totais da amostra de lodo analisada.

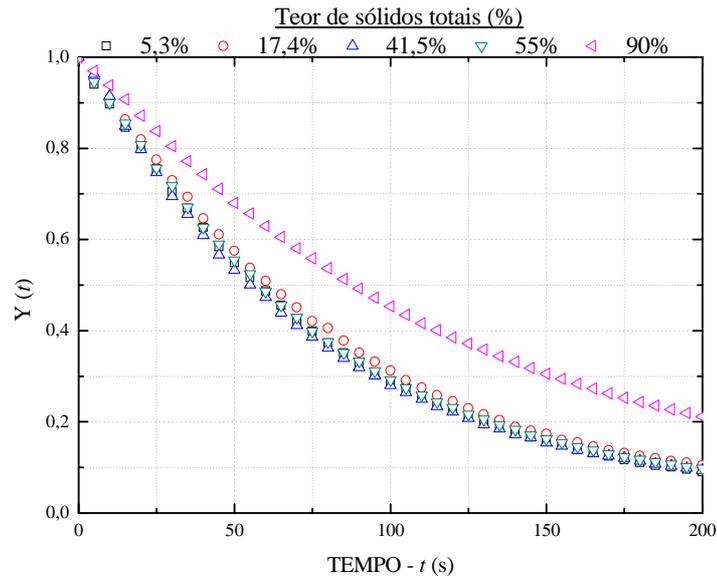


GRÁFICO 8 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LODO A CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14

Esses comportamentos foram linearizados com o auxílio da função logaritmo na base 10, conforme ilustra o GRÁFICO 9.

Aos pontos do GRÁFICO 9 foram ajustadas funções lineares, sendo obtidos coeficientes de correlação maiores que 0,995. Os coeficientes angulares das retas ajustadas representaram os valores absolutos das taxas de decaimento, possibilitando, por conseguinte, a determinação de diferentes valores de difusividade térmica do lodo em função do teor de sólidos presente em sua composição, a partir do uso da equação 14. Esses resultados estão sumarizados na TABELA 13 e no GRÁFICO 10.

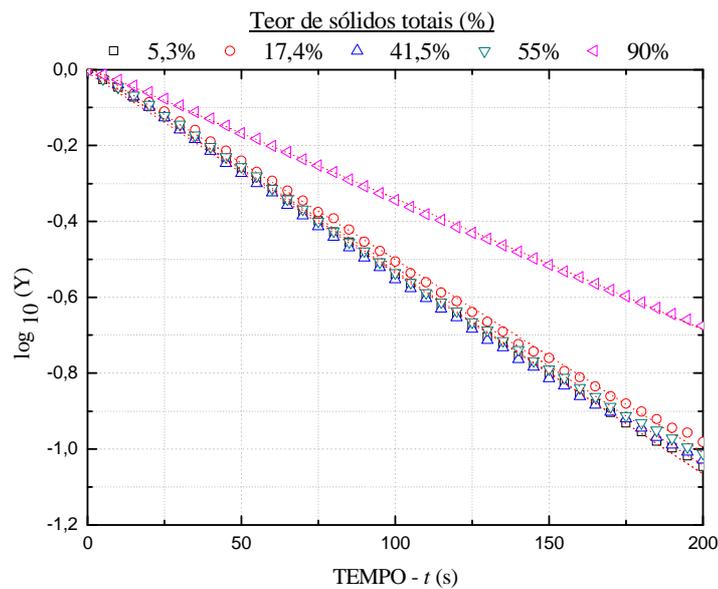


GRÁFICO 9 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO A EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10

TABELA 13 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO LODO A

Sólidos totais	Difusividade térmica ($\text{cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
$0,053 \pm 2,3 \cdot 10^{-3}$	$2,02 \pm 0,05$
$0,174 \pm 2,8 \cdot 10^{-3}$	$1,95 \pm 0,05$
$0,415 \pm 1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,84 \pm 0,06$
$0,550 \pm 2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \pm 0,05$
$0,900 \pm 1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,25 \pm 0,05$

De modo geral, verificou-se que a difusividade térmica do lodo diminui com o aumento do teor de sólidos totais de forma não linear. O teor de sólidos totais de $(90 \pm 0,13)\%$ apresentou a menor difusividade térmica $(1,25 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dentre aquelas obtidas, enquanto a concentração de $(5,3 \pm 0,23)\%$ exibiu a maior difusividade térmica $(2,02 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dentre as amostras avaliadas. Dessa maneira, o valor reportado por Telles *et al.* (2000) para o lodo contendo 5% de sólidos totais é aproximadamente 2,5 vezes maior que o obtido neste estudo. Por sua vez, os valores reportados por Silva *et al.* (2001) para a faixa de concentrações entre 5,0 e 20,0% foram cerca de 1,5 vezes menores.

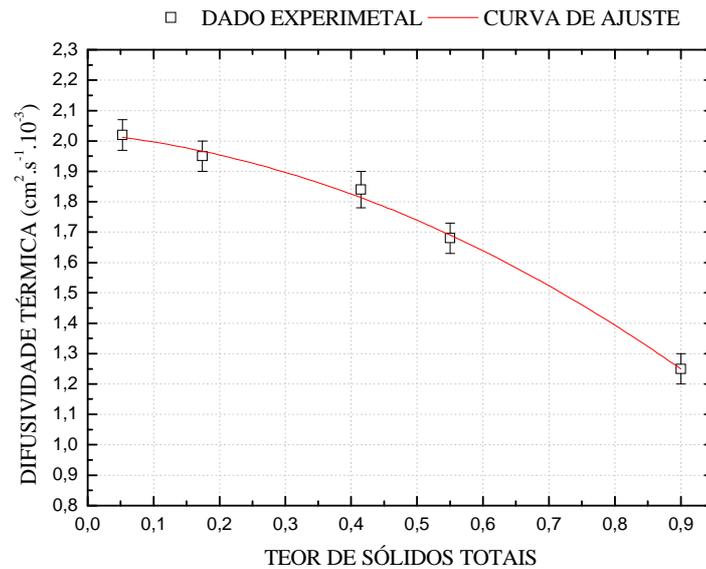


GRÁFICO 10 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODO A EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS

Um polinômio de segunda ordem foi ajustado aos pontos obtidos experimentalmente, revelando um coeficiente de determinação maior que 0,995. Dessa maneira, a difusividade térmica (D) do lodo A avaliado neste trabalho, dada em $10^{-3}\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$, em função do teor de sólidos totais (ST) presentes em sua composição, pode ser descrita pela equação 15 não linear:

$$D = a_0 + a_1.ST + a_2.ST^2 \quad (15)$$

em que:

$$a_0 = (2,025 \pm 0,055) \text{ cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$a_1 = (-0,211 \pm 0,294) \text{ cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}; \text{ e,}$$

$$a_2 = (-0,723 \pm 0,299) \text{ cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Por sua vez, a incerteza para a difusividade térmica do lodo A pode ser calculada por:

$$\sigma_D = \sqrt{3,025 \cdot 10^{-6} + 8,6436 \cdot 10^{-5} \cdot ST^2 + 8,9401 \cdot 10^{-5} \cdot ST^4 + (-0,211 - 1,446 \cdot ST)^2 \cdot \sigma_{ST}^2} \quad (16)$$

5.2.2 Lodo aeróbio

O GRÁFICO 11 apresenta os resultados das medições de temperatura das amostras de lodos B em função do tempo, contendo os diferentes teores de sólidos totais, quando exposto ao processo de aquecimento. Assim como as amostras de lodo anaeróbio, o lodo aeróbio apresentou aquecimento não linear e as taxas de aquecimento foram distintas.

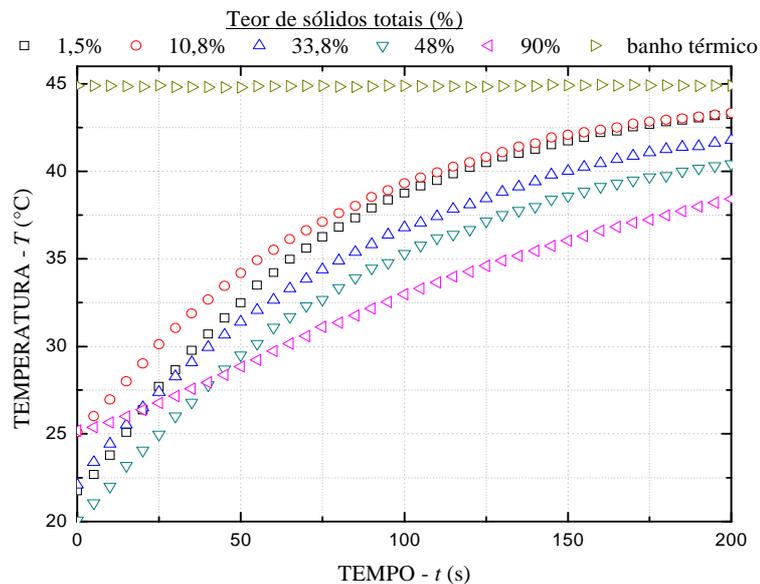


GRÁFICO 11 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO B CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$

A amostra de lodo B contendo teor de sólidos acima de $(48 \pm 0,22)\%$ apresentou um processo de aquecimento mais lento em relação às demais concentrações de amostras analisadas, pois atingiu a temperatura do banho térmico em intervalo de tempo superior a 300 segundos. Entretanto, as concentrações até $(33,8 \pm 0,25)\%$ de sólidos totais atingiram temperaturas próximas a temperatura do banho térmico em aproximadamente 200 segundos.

O GRÁFICO 12 apresenta os resultados de medição de temperatura das amostras de lodo B em função do tempo, onde é possível verificar um comportamento não linear e decrescente para todas as amostras, e taxas de decaimento $(-b)$ diferentes e dependentes das concentrações de sólidos totais contidas na amostra de lodo.

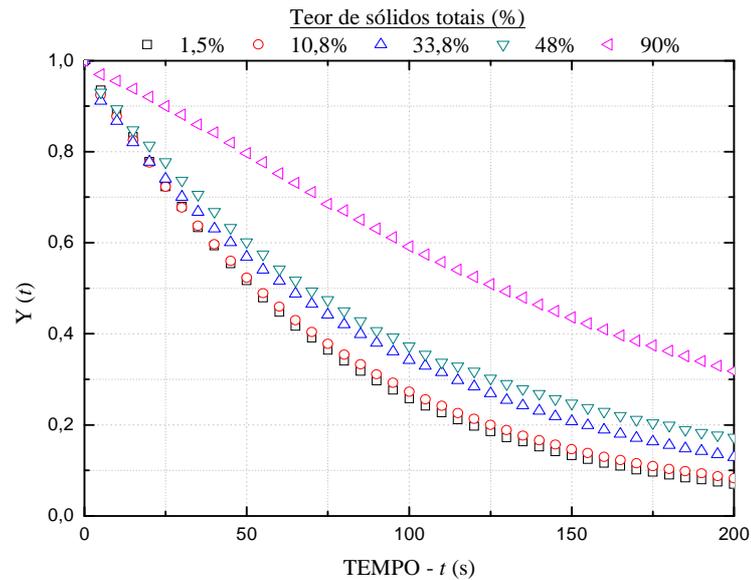


GRÁFICO 12 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LODO B CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14

O GRÁFICO 13 apresenta a linearização dos pontos, cujo coeficientes de correlação foram maiores que 0,99. Os coeficientes angulares das retas ajustadas foram utilizados para determinar os valores de difusividade térmica para o lodo B. Esses resultados estão apresentados na TABELA 14 e no GRÁFICO 14.

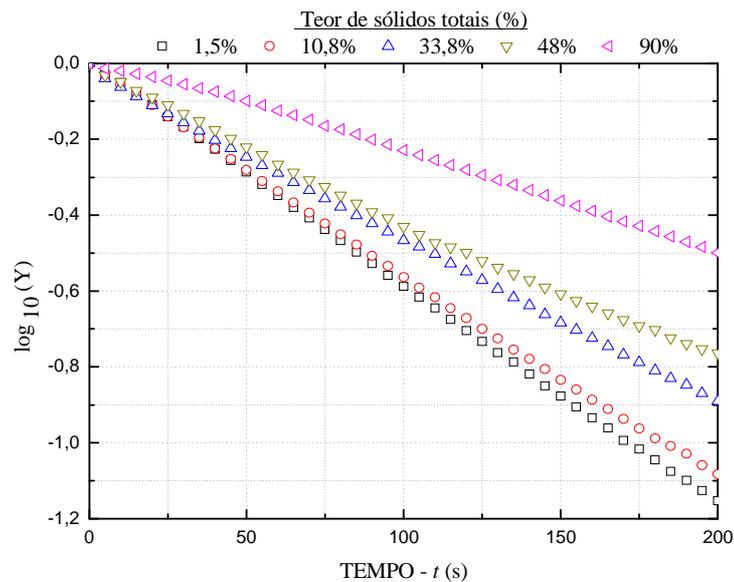


GRÁFICO 13 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO B EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10

TABELA 14 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO LODO B

Sólidos totais	Difusividade térmica ($\text{cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
$0,015 \pm 1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \pm 0,05$
$0,108 \pm 2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \pm 0,13$
$0,338 \pm 2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,58 \pm 0,13$
$0,480 \pm 2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,40 \pm 0,13$
$0,900 \pm 1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,94 \pm 0,12$

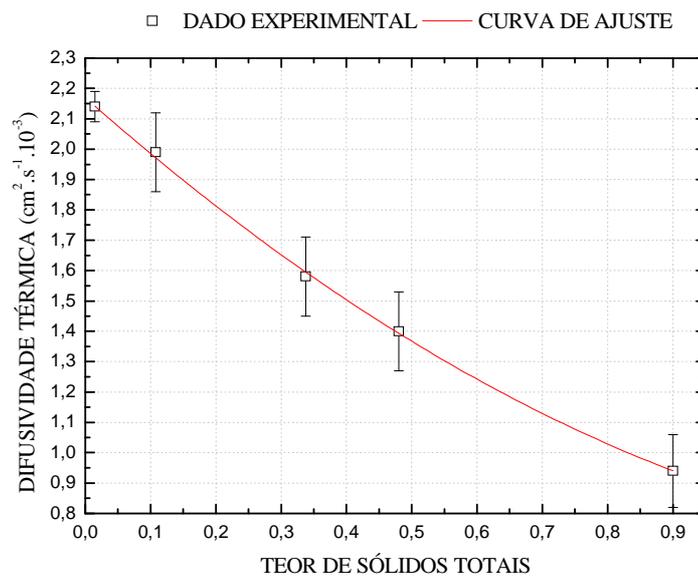


GRÁFICO 14 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODO B EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS

Verificou-se que a difusividade térmica do lodo B diminui com o aumento do teor de sólidos totais e que essa diminuição foi não linear. O teor de $(90,0 \pm 0,10)\%$ de sólidos totais apresentou a menor difusividade térmica $(0,94 \pm 0,12) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dentre os resultados obtidos, enquanto a concentração de $(1,5 \pm 0,17)\%$ exibiu a maior difusividade térmica $(2,14 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Um polinômio de segunda ordem foi ajustado aos pontos obtidos experimentalmente, apresentando um coeficiente de determinação maior que 0,999. Assim, a difusividade térmica (D) do lodo B, expressa em $10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, em função do teor de sólidos totais (ST) presentes em sua composição, pode ser descrita pela equação 17 não linear:

$$D = a_0 + a_1 \cdot ST + a_2 \cdot ST^2 \quad (17)$$

em que:

$$a_0 = (2,17 \pm 0,052) \text{ cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$a_1 = (-1,904 \pm 0,495) \text{ cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}; \text{ e,}$$

$$a_2 = (0,597 \pm 0,573) \text{ cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}.$$

A incerteza para a difusividade térmica do lodo B pode ser calculada por:

$$\sigma_D = \sqrt{2,704 \cdot 10^{-6} + 2,45025 \cdot 10^{-4} \cdot ST^2 + 3,28329 \cdot 10^{-4} \cdot ST^4 + (-1,904 + 1,194 \cdot ST)^2 \cdot \sigma_{ST}^2} \quad (18)$$

5.2.3 Escuma

O GRÁFICO 15 apresenta os resultados das medições de temperatura das amostras de espuma em função do tempo, contendo os diversos teores de sólidos totais. Verificou-se que o aquecimento das amostras de espuma foi não linear e as taxas de aquecimento foram distintas.

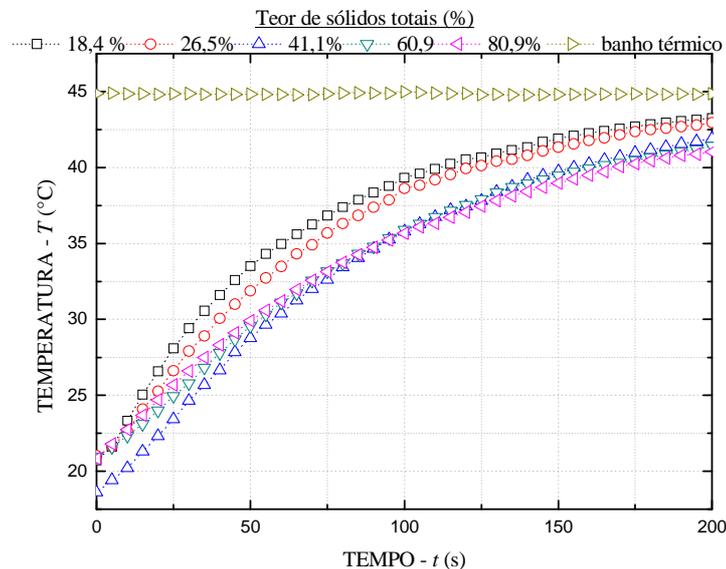


GRÁFICO 15 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE ESCUMA CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$

As amostras de espuma contendo até $(26,5 \pm 0,43)\%$ de sólidos totais atingiram temperaturas próximas à do banho térmico (cerca de 45°C) em

aproximadamente 200 segundos, enquanto que a espuma contendo teor de sólidos acima de $(41,1 \pm 0,35)\%$ foi observado um processo de aquecimento mais lento e o intervalo de tempo para atingir a temperatura do banho térmico foi superior a 300 segundos.

O GRÁFICO 16 apresenta os dados normalizados da medição de temperatura das amostras de espuma em função do tempo. Verificou-se um comportamento não linear e decrescente para todas as amostras de espuma analisadas, sendo que as taxas de decaimento ($-b$) foram diferentes e dependentes do teor de sólidos totais presentes na espuma.

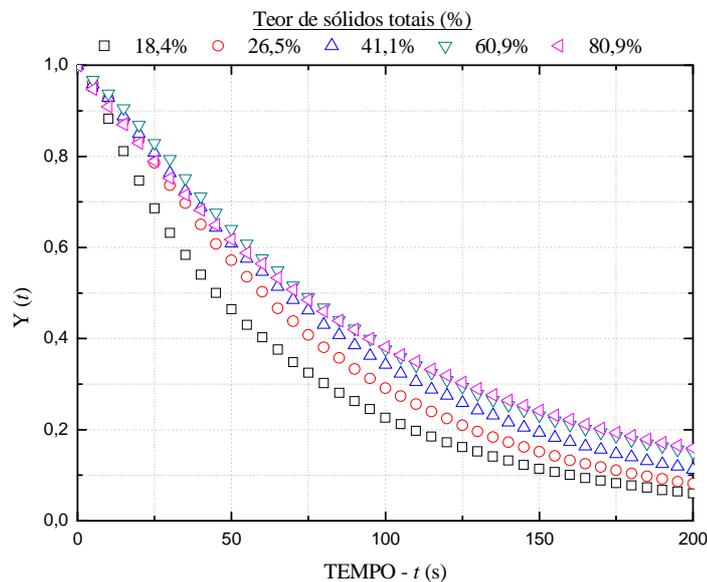


GRÁFICO 16 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE ESCUMA EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14

O GRÁFICO 17 apresenta a linearização dos pontos, cujo coeficientes de correlação foram superiores a 0,99. Os coeficientes angulares das retas ajustadas possibilitaram a determinação de diferentes valores de difusividade térmica para as amostras de espuma em função do teor de sólidos presente na composição. Esses resultados estão sumarizados na TABELA 15 e no GRÁFICO 18.

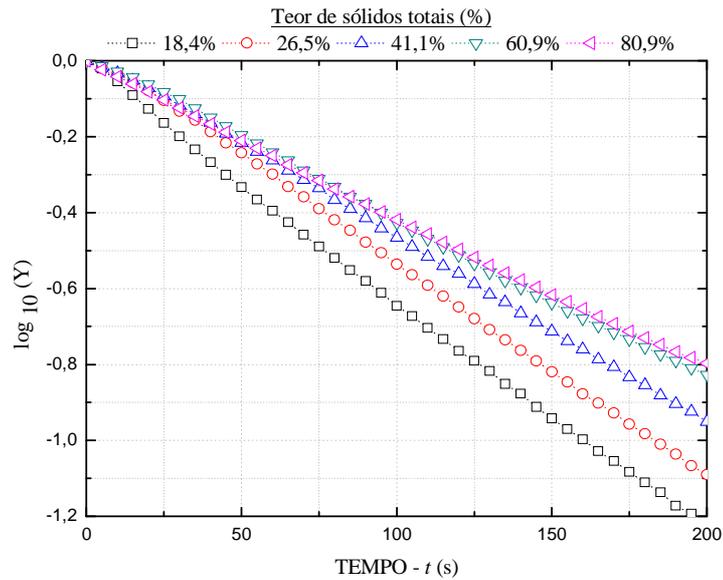


GRÁFICO 17 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE ESCUMA EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10

TABELA 15 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DA ESCUMA

Sólidos totais	Difusividade térmica ($\text{cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
$0,184 \pm 6,2 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \pm 0,05$
$0,265 \pm 4,3 \cdot 10^{-3}$	$2,07 \pm 0,10$
$0,411 \pm 3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \pm 0,05$
$0,640 \pm 2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \pm 0,13$
$0,809 \pm 1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \pm 0,06$

Observou-se que a difusividade térmica da espuma diminuiu com o aumento do teor de sólidos totais e essa diminuição foi não linear. O teor de sólidos totais de $(80,9 \pm 0,18)\%$ apresentou a menor difusividade térmica $(1,47 \pm 0,06) \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dentre as amostras, enquanto que a concentração de $(18,4 \pm 0,62)\%$ apresentou a maior difusividade térmica $(2,24 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dentre as amostras de espuma avaliadas.

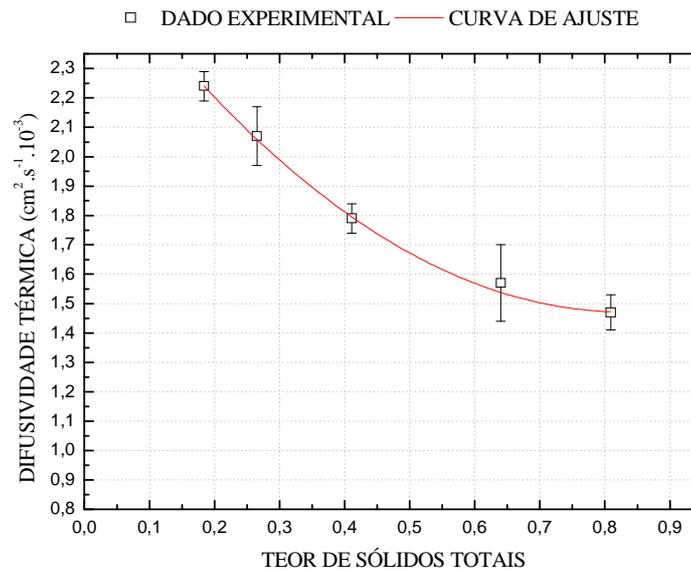


GRÁFICO 18 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE ESCUMA EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS

Um polinômio de segunda ordem foi ajustado aos pontos obtidos experimentalmente, demonstrando um coeficiente de determinação maior que 0,998. Sendo assim, a difusividade térmica (D) da espuma, dada em $10^{-3}\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$, em função do teor de sólidos totais (ST) presentes em sua composição, pode ser descrita pela equação 19 não linear:

$$D = a_0 + a_1.ST + a_2.ST^2 \quad (19)$$

em que:

$$a_0 = (2,74 \pm 0,14) \text{ cm}^2.10^{-3}.\text{s}^{-1};$$

$$a_1 = (-3,054 \pm 0,688) \text{ cm}^2.10^{-3}.\text{s}^{-1}; \text{ e,}$$

$$a_2 = (1,839 \pm 0,679) \text{ cm}^2.10^{-3}.\text{s}^{-1}.$$

A incerteza para a difusividade térmica da espuma pode ser calculada por:

$$\sigma_D = \sqrt{1,96.10^{-5} + 4,73344.10^{-4}.ST^2 + 4,61041.10^{-4}.ST^4 + (-3,054 + 3,678.ST)^2 . \sigma_{ST}^2} \quad (20)$$

5.2.4 Lodo de ETA

O GRÁFICO 19 apresenta os resultados das medições de temperatura das amostras de lodos C em função do tempo, contendo os diferentes teores de sólidos totais. Assim como as demais amostras de lodos e espuma, o lodo C apresentou aquecimento não linear e taxas de aquecimento diferentes.

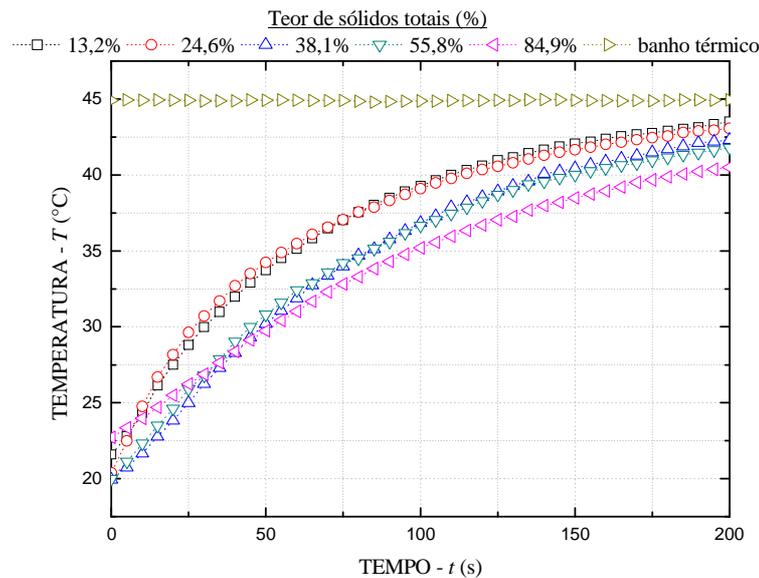


GRÁFICO 19 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO C CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO COM UM BANHO TÉRMICO CONFIGURADO PARA OPERAR A $(45,4 \pm 0,2)^\circ\text{C}$

As amostras de lodo C contendo teores de sólidos abaixo de $(55,8 \pm 0,31)\%$ apresentaram processo de aquecimento mais acelerado em relação à amostra contendo $(84,9 \pm 0,16)\%$, pois atingiram a temperatura do banho térmico em aproximadamente 200 segundos, enquanto que a amostra com o maior teor de sólidos totais precisou de tempo superior a 300 segundos.

O GRÁFICO 20 apresenta os resultados da medição de temperatura normalizadas para as amostras de lodo C em função do tempo. As amostras apresentaram comportamento não linear e as taxas de decaimento (-b) foram diferentes e dependentes das concentrações de sólidos totais contido na amostra de lodo.

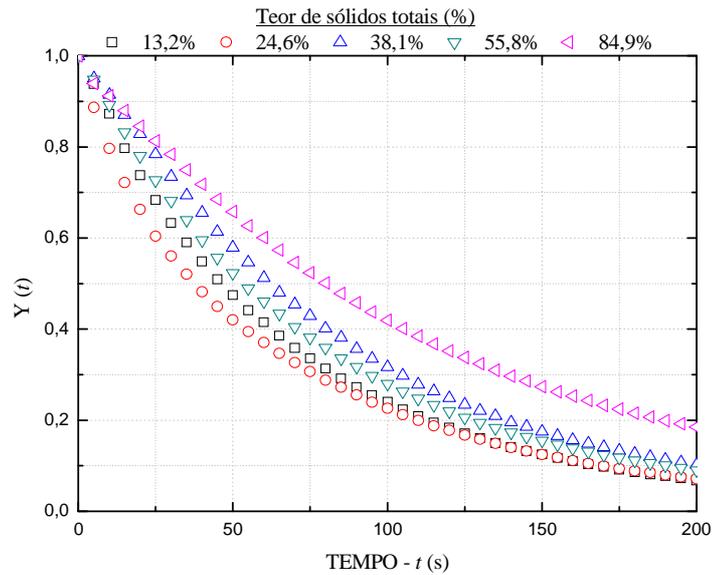


GRÁFICO 20 - TAXA DA DIFERENÇA DE TEMPERATURA DAS AMOSTRAS DE LODO C CONTENDO DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE SÓLIDOS TOTAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14

O GRÁFICO 21 apresenta a linearização dos pontos cujo os coeficientes de correlação foram superior a 0,99. Os coeficientes angulares foram utilizados para determinar os valores de difusividade térmica do lodo C em função do teor de sólidos totais e os resultados estão apresentados na TABELA 16 e no GRÁFICO 22.

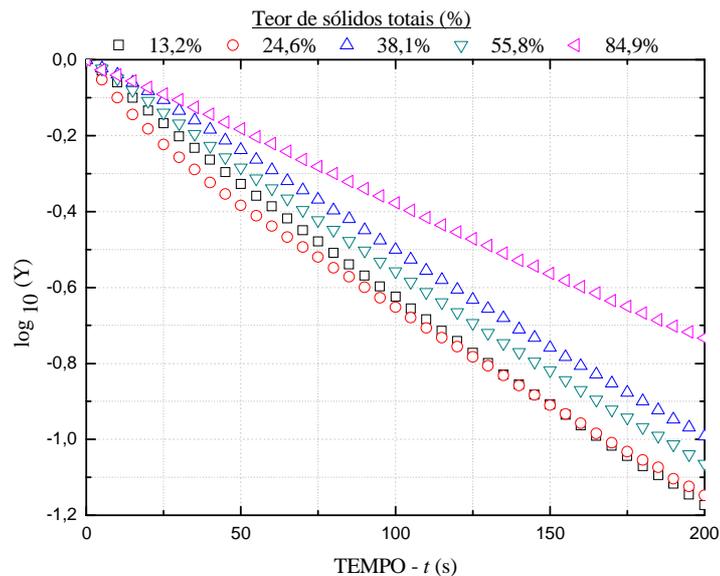


GRÁFICO 21 - TEMPERATURAS DAS AMOSTRAS DE LODO C EM FUNÇÃO DO TEMPO, CONTENDO DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS TOTAIS, NORMALIZADAS DE ACORDO COM A EQUAÇÃO 14 E LINEARIZADAS A PARTIR DA FUNÇÃO LOGARITMO NA BASE 10

TABELA 16 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO LODO C

Sólidos totais	Difusividade térmica ($\text{cm}^2 \cdot 10^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
$0,132 \pm 8,0 \cdot 10^{-3}$	$2,14 \pm 0,13$
$0,246 \pm 6,4 \cdot 10^{-3}$	$1,99 \pm 0,10$
$0,381 \pm 3,8 \cdot 10^{-3}$	$1,86 \pm 0,10$
$0,558 \pm 3,1 \cdot 10^{-3}$	$1,64 \pm 0,10$
$0,849 \pm 1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \pm 0,13$

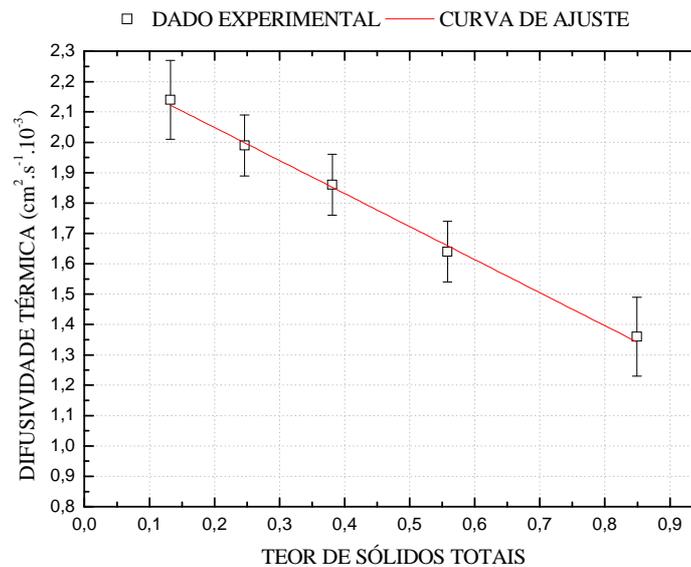


GRÁFICO 22 - DIFUSIVIDADE TÉRMICA DAS AMOSTRAS DE LODO C EM FUNÇÃO DO TEOR DE SÓLIDOS

Verificou-se que a difusividade térmica do lodo C diminui com o aumento do teor de sólidos totais e que essa diminuição foi linear. A amostra contendo $(84,9 \pm 0,16)\%$ de sólidos totais apresentou a menor difusividade térmica $(1,36 \pm 0,13) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ dentre os demais resultados, enquanto que para a concentração de $(13,2 \pm 0,80)\%$ foi observado a maior difusividade térmica $(2,14 \pm 0,13) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Uma reta foi ajustada aos pontos obtidos experimentalmente, apresentando um coeficiente de determinação maior que 0,995. Dessa maneira, a difusividade térmica (D) do lodo C avaliado neste trabalho, expressa em $10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, em função do teor de sólidos totais (ST) presentes em sua composição pode ser descrita pela equação 21:

$$D = a_0 + a_1 \cdot ST \quad (21)$$

em que:

$$a_0 = (2,266 \pm 0,104) \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1};$$

$$a_1 = (-1,088 \pm 0,219) \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

A incerteza para a difusividade térmica para o lodo C pode ser calculada por:

$$\sigma_D = \sqrt{0,010816 \cdot 10^{-3} + 0,047961 \cdot 10^{-3} \cdot ST^2 + 1,183744 \cdot \sigma_{ST}^2} \quad (22)$$

5.2.5 Comparação entre os lodos e escumas

O GRÁFICO 23 apresenta as difusividades térmicas em função dos teores de sólidos totais para o lodo A (anaeróbio), lodo B (aeróbio), espuma e lodo C (lodo de ETA).

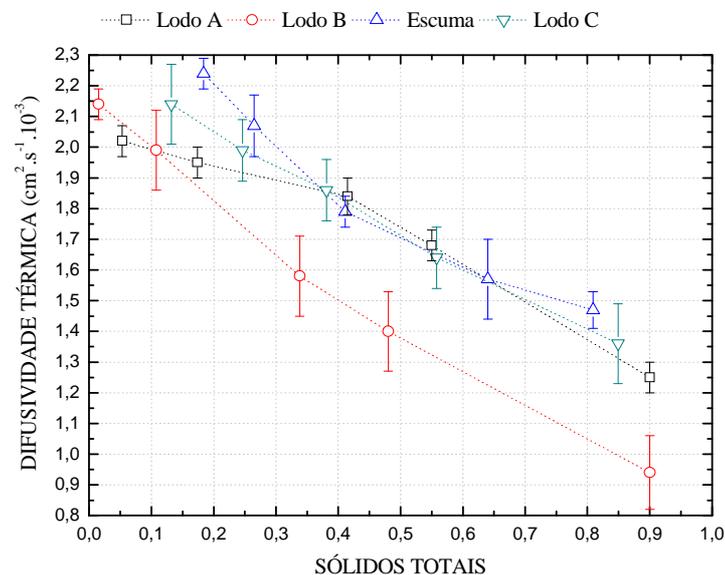


GRÁFICO 23 - DIFUSIVIDADES TÉRMICAS DOS LODOS E ESCUMAS

De modo geral, verificou-se que para as amostras de lodo A, B, C e espuma, a difusividade térmica diminuiu com o aumento do teor de sólidos totais. No entanto, os valores encontrados para a mesma concentração de sólidos para o lodo A e B, ou seja, 90% de sólidos totais, foram diferentes. Enquanto o lodo A apresentou o valor

de difusividade térmica de $(1,25 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, o lodo B obteve o resultado de $(0,94 \pm 0,12) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. As amostras de lodo A e C com as concentrações de aproximadamente 55% de sólidos, apresentou valores de difusividade térmica semelhantes, sendo o resultado de $(1,68 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo A e de $(1,64 \pm 0,10) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo C. Para as concentrações de sólidos entre 38 e 41,5%, os resultados de difusividade foram próximos, apresentando os valores de $(1,84 \pm 0,06) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $(1,79 \pm 0,05) \times 10^{-3} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $(1,86 \pm 0,10) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo A, espuma e lodo C, respectivamente. Observa-se que o lodo A e a espuma apresentaram resultados distintos para a concentração em torno de 18%, sendo a difusividade térmica de $(1,95 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo A e de $(2,24 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a espuma. Em relação à concentração entre 24,6 e 26,5% encontradas no lodo C e na espuma, respectivamente, os resultados se apresentaram próximos, sendo os valores dos ensaios de $(1,99 \pm 0,10) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o lodo C e de $(2,07 \pm 0,10) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para a espuma.

A diminuição da difusividade térmica dos lodos e escumas com o aumento do teor de sólidos totais presentes em sua composição indica que os sólidos totais separados por vazios preenchidos com ar dificultam o fluxo de calor pelo material e que a água atua como um agente facilitador desse fluxo, pois maximiza a área de contato entre as partículas sólidas, como afirmado por Clivati (1991). Isso ocorre porque a condutividade térmica do ar ($0,06 \times 10^{-3} \text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) é cerca de 30 vezes menor que aquela da água ($1,40 \times 10^{-3} \text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) (CLIVATI, 1991). Assim, em lodos contendo “baixas” concentrações de sólidos totais a difusividade térmica é basicamente controlada pela água que é um bom condutor de calor (SILVA *et al.*, 2001). No entanto, para lodos com “altas” concentrações de sólidos totais, a difusividade térmica passa a ser influenciada por características como as quantidades de sólidos voláteis, de sólidos fixos e de metais (SILVA *et al.*, 2001).

A diferença da difusividade térmica entre os lodos e a espuma pode ser explicada pelas características distintas de cada material. O lodo A, B e a espuma, ou seja provenientes de processos biológicos de tratamento de esgoto, apresentaram comportamento não linear, enquanto que o lodo C, proveniente de processo químico do tratamento da água, apresentou comportamento linear.

O lodo B apresentou a menor difusividade térmica em relação às demais amostras analisadas, porém verifica-se que é o lodo que possui a menor relação entre sólidos fixos e sólidos totais, ou seja, relação SF/ST de 26,63%, conforme

apresenta a TABELA 12. O lodo A e a espuma, mesmo sendo provenientes de processo anaeróbio de tratamento, apresentaram resultados e comportamentos distintos, enquanto a relação SF/ST foram próximas, sendo os valores de 40,52% para o lodo A e 36,45 para a espuma. Observa-se que a espuma, dentre as amostras analisadas, foi a que apresentou os maiores valores de difusividade térmica, variando entre $(1,47 \pm 0,06) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $(2,24 \pm 0,05) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. O lodo C, proveniente do tratamento de água e com características de um lodo químico devido à adição de produto químico durante o processo, apresentou a maior relação SF/ST, com o valor de 56,11%, e os resultados de difusividade térmica demonstraram um comportamento linear, ou seja, o aumento do teor de sólidos foi proporcional ao aumento da difusividade térmica e esse valores variaram entre $(1,36 \pm 0,13) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $(2,14 \pm 0,13) \times 10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Segundo Possetti (2013), o lodo anaeróbio apresenta em sua composição 44,94% de cinzas, 48,79% de matéria volátil, 6,27% de carbono fixo e 30,76% de carbono elementar, enquanto o lodo aeróbio possui em sua composição 33,63% de cinzas, 55,58% de matéria volátil, 10,79% de carbono fixo e 38,39% de carbono elementar, ou seja os lodos apresentam composições diferenciadas.

Assim, utilizando as equações matemáticas definidas no presente trabalho, elaborou-se a TABELA 17 onde consta os valores de difusividade térmica para uma ampla faixa de concentrações de sólidos totais para o lodo A, lodo B, espuma e lodo C.

TABELA 17 - VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA UMA AMPLA FAIXA DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS UTILIZANDO AS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS

continua

ST	Difusividade térmica ($10^{-3} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)			
	Lodo anaeróbio	Lodo aeróbio	Escuma	Lodo de ETA
0,05	2,013	2,076	2,592	2,212
0,10	1,997	1,986	2,453	2,157
0,15	1,977	1,898	2,323	2,103
0,20	1,954	1,813	2,203	2,048
0,25	1,927	1,731	2,091	1,994
0,30	1,897	1,653	1,989	1,940
0,35	1,863	1,577	1,896	1,885
0,40	1,825	1,504	1,813	1,831

TABELA 18 - VALORES DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA PARA UMA AMPLA FAIXA DE CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS TOTAIS UTILIZANDO AS EQUAÇÕES MATEMÁTICAS
conclusão

ST	Difusividade térmica ($10^{-3}\text{cm}^2.\text{s}^{-1}$)			
	Lodo anaeróbio	Lodo aeróbio	Escuma	Lodo de ETA
0,45	1,784	1,434	1,738	1,776
0,50	1,739	1,367	1,673	1,722
0,55	1,690	1,303	1,617	1,668
0,65	1,582	1,185	1,532	1,559
0,70	1,523	1,130	1,503	1,504
0,75	1,460	1,078	1,484	1,450
0,80	1,393	1,029	1,474	1,396
0,85	1,323	0,983	1,473	1,341
0,90	1,249	0,940	1,481	1,287
0,95	1,172	0,900	1,498	1,232
1,00	1,091	0,863	1,525	1,178

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que as diferentes composições dos materiais analisados fornecem valores de difusividade térmica distintos e essas diferentes composições também influenciam na secagem dos lodos e escumas, conforme foi apresentado na seção 5.1. Sendo assim, faz-se necessário desenvolver relações matemáticas distintas para cada material a ser analisado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

As análises experimentais da curva de secagem para lodos e escumas mostraram que o lodo proveniente do processo aeróbio possui a secagem mais acelerada em relação ao lodo do processo anaeróbio, espuma e lodo de ETA, apresentando os tempos de (33 ± 3) e (19 ± 3) minutos para as temperaturas de 103 e 140 °C, respectivamente, enquanto que o lodo de ETA é a amostra de maior dificuldade de desidratação, necessitando de (49 ± 4) e (39 ± 2) minutos para atingir o teor de sólidos final a 103 e 140 °C, respectivamente.

Observa-se que ao se elevar a temperatura de 103 °C para 140 °C, a perda de umidade ocorreu aproximadamente 41% mais rapidamente para o lodo anaeróbio e aeróbio, 38% para a espuma e 20% para o lodo de ETA até as amostras atingirem massa constante. Em processos de secagem térmica, o aumento da temperatura pode reduzir o tempo de secagem e desidratar uma maior quantidade de lodos e espuma, porém estudos mais detalhados devem ser conduzidos para avaliar os gastos energéticos ao se elevar a temperatura no processo de secagem térmica.

Verifica-se que para os lodos e a espuma analisadas, a curva de secagem apresenta comportamento decrescente, ausência de período de secagem constante e a curva é não linear nas temperaturas de 103 e 140 °C.

Para as taxas de variação do teor de sólidos em função do tempo de secagem para as amostras de lodo anaeróbio, lodo aeróbio, espuma e lodo de ETA, a temperatura de 103 e 140 °C, verifica-se três períodos, ou seja, primeira etapa de decréscimo acentuado, segunda etapa de taxa levemente decrescente e terceira etapa de taxa com decréscimo acentuado, variando-se o tempo final de experimento para cada amostra. O lodo de ETA apresentou maior dificuldade de desidratação, pois a taxa de variação foi de $-3,54 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a 103 °C e $-4,49 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a 140 °C e pode ser pelo fato de ser um lodo químico proveniente da aplicação de produto químico durante o processo do tratamento da água. O lodo aeróbio apresentou a maior facilidade de secagem, e possivelmente pode conter maior quantidade de água livre em sua composição e essa possui maior facilidade de evaporação, pois a taxa de variação foi de $-4,06 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a 103 °C e $-8,43 \text{ \%} \cdot \text{min}^{-1}$ a 140 °C.

Deduz-se que na primeira etapa, de decréscimo acentuado, a água livre foi retirada dos materiais, na segunda etapa, levemente decrescente, a água intersticial foi removida, e por fim, na terceira etapa, de decréscimo acentuado, a água superficial, foi retirada dos lodos e escumas.

Por meio das curvas de secagem dos lodos e espuma foi possível concluir que o tempo de secagem é dependente da temperatura e a 140 °C a secagem apresentou ser mais rápida que a 103 °C, ou seja, ao se elevar a temperatura em 26%, o tempo de secagem foi reduzido, porém deve-se considerar que cada lodo e espuma possui uma composição, a qual influencia o processo de secagem.

Em relação a difusividade térmica, foi possível avaliar amostras de lodos e espuma para uma ampla faixa de concentrações de sólidos totais e os resultados demonstraram que o lodo aeróbio possui a menor difusividade térmica em relação às demais amostras analisadas, enquanto que a espuma apresentou os maiores valores.

Verificou-se a variação da temperatura ao longo do tempo e que o aumento do teor de sólidos presentes nos lodos e escumas dificulta o fluxo de calor pelo material e assim, conseqüentemente, a difusividade térmica das amostras diminui. As diferentes composições inerentes a cada material analisados pode influenciar nos valores de difusividade térmica.

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram descrever a variação da difusividade térmica dos lodos e escumas em função dos teores de sólidos totais presentes em sua composição, para diferentes concentrações de sólidos totais. Observou-se que essa relação pode ser não linear ou linear. Nesse trabalho encontraram-se relações não lineares para o lodo anaeróbio, lodo aeróbio e espuma e relação linear para o lodo de ETA.

Os dados de difusividade térmica em função dos teores de sólidos totais permitiram a obtenção de equações matemáticas distintas que poderão ser utilizadas para a simulação e o dimensionamento de sistemas que utilizem a temperatura como agente para promover a secagem e higienização de lodos e escumas sanitários.

Utilizando as equações matemáticas definidas no presente trabalho, elaborou-se a Tabela 17 onde consta os valores de difusividade térmica para uma ampla faixa de concentrações de sólidos totais.

É importante ressaltar que o presente trabalho foi desenvolvido experimentalmente e que todos os ensaios foram realizados em triplicata sob condições de reprodutibilidade e calculada a incerteza expandida para um nível de confiança de 95%.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se para o estudo da curva de secagem, a avaliação dos gastos de energia ao se elevar a temperatura de 103 °C para 140 °C em um processo de secagem térmica, bem como realizar avaliações utilizando outras temperaturas de secagem.

Indica-se avaliações da curva de secagem de lodos e escumas provenientes de outras estações de tratamento de água e esgoto a fim de se comparar com os resultados obtidos nesse trabalho e realizar avaliações de lodos e escumas utilizando intervalos de coletas maiores e considerando a sazonalidade.

Sugere-se realizar análise termogravimétricas (ATG) e térmica diferencial (ATD) para identificar em qual temperatura os lodos e a espuma perdem água livre, água intersticial, água superficial e água intracelular.

Recomenda-se a determinação da difusividade térmica para lodos e escumas, considerando amostragem composta e a sazonalidade, proveniente de outras estações de tratamento de água e esgoto.

Sugere-se, além da determinação do parâmetro de difusividade térmica, avaliar experimentalmente a condutividade térmica e o calor específico em diversas concentrações de lodos e escumas, para assim obter parâmetros mais acurados para auxiliar no dimensionamento de sistemas térmicos de secagem.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; SILVA, F. L. H. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. **Revista de Biologia e Ciências da terra**. V. 6. p. 145 – 151. 2006.
- ANDRADE NETO, Cícero O.; CAMPOS, José R. Introdução. In: CAMPOS, José R.(coord.) **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: Prosab,1999.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C.; TELES, C. R.; CARNEIRO, C.; FERNANDES, F. Higienização do lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V (coord) **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, ABES, p. 87 – 117. 2001.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERUBIN, C.; FRANÇA, M. Desinfecção e secagem térmica de lodo de esgoto anaeróbio pelo uso de biogás. **XXXIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – AIDIS**. 2002.
- ANDREOLI, C. V.; TOMANINI, C. R.; HOLSBACH, B.; PEGORINI, E.S.; NEVES, P. S. Uso de lodo de esgoto na produção de substrato vegetal. In: **Biossólidos - alternativas de uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro. Editora ABES, p. 235 – 281. 2006.
- ANDREOLI, C. V.; MOTTA, A. C. V.; FERNANDES, C. V. S.; PEGORINI, E. S.; SOCCOL, V. T. Disposição final de lodos de estações de tratamento de água. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Lodo de estações de tratamento de água- Gestão e perspectivas tecnológicas**. Curitiba: SANEPAR Editora Thinks Creative, p. 67 – 130. 2013.
- ARIAS-PENAS, D.; CASTRO-GARCÍA, M. P.; REY-RONCO, M. A.; ALONSO-SÁNCHEZ, T. Determining the thermal diffusivity of the ground based on subsoil temperatures. Preliminary results of an experimental geothermal borehole study Q-Thermie – Uniovi. **Geothermics**. V. 54. p. 35 – 42. 2015.
- BI, C. H.; MIN, M.; NIE, Y.; XIE, Q.L.; LU, Q.; DENG, X. Y.; ANDERSON, E.; LI, D.; CHEN, P.; RUAN, R. Process development for scum to biodiesel conversion. **Bioresource Technology**, p. 185 – 193. 2015.
- BITTENCOURT, S.; SERRAT, B. M.; AISSE, M. M.; ANDREOLI, C. V. Destinação agrícola de lodo de esgoto: Estudo de caso do estado do Paraná, Brasil. In: **XXXIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Monterrey, 2014.
- BIDONE, F.; SILVA, A. P.; MARQUES, D. M. Lodos produzidos nas estações de tratamento de água (ETAs): Desidratação em leitos de secagem e codisposição em aterros sanitários. In: ANDREOLI, C. V (coord) **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, ABES, p. 215 – 244. 2001.

CARBONERA, L.; CARCIOFI, B. M.; HUBER, E.; LAURINDO, J. B. Determinação experimental da difusividade térmica de uma massa de tomate comercial. **Brazilian Journal of food technology**. v.6, n.2, p. 285-290, jul./dez., 2003.

CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. **Lodo de estações de tratamento de água – Gestão e perspectivas tecnológicas**. Curitiba: SANEPAR, Editora Thinks Creative. 2013.

CARNEIRO, C.; WEBER, P. S.; ROSS, B. Z. L.; GERVASONI, R.; SIMON, P. L.; MORO, B. G.; MOTTA, A. C. V. Caracterização do Lodo de ETA gerado no Estado do Paraná. In: CARNEIRO, C.; ANDREOLI, C. V. (Coord.). **Lodo de estações de tratamento de água – Gestão e perspectivas tecnológicas**. Curitiba: SANEPAR, Editora Thinks Creative, p.131-178. 2013.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. 4ª ed., Editora AMGH, p. 902. 2012.

CHEN, G.; YUE, P.L.; MUJUMDAR, A.S. Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. In: MUJUMDAR, A.S. **Handbook of Industrial Drying**. 3ª ed., CRC Press. p. 887-904. 2006.

CHUNG, P. K; JACKSON, M. L. **Thermal diffusivity of low conductivity materials**. Industrial and Engineering Chemistry, v. 46, n.12, p. 2563-2566, 1954.

CLIVATI, A. A.; **Método proposto para determinação da difusividade térmica de meios porosos**. 1991. 92 f. Dissertação (Pós-graduação em Agronomia na área de Concentração de Ciências do solo) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

CORRÊA, R. S.; FONSECA, Y. M. F.; CORRÊA, A. S. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.11, n.4, p.420–426. 2007.

DAVID A. C. **Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio**. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

DEMATTOS, M.; COSTA, G. J.; FONSECA, D. A.; BRAGA, J. P. C.; JANZEN, W. **Redução do volume de lodo gerado em ETAs – A proposta de Recuperação do Coagulante pelo processo de acidificação no sistema Rio Manso**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, 2001.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. **Seleção de tecnologias de tratamento de água**. São Paulo: Editora LDIBE LTDA, 2008.

FENANDES, F.; LOPES, D. D.; ANDREOLI, C. V.; SILVA, S. M. C. P. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Coord.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte. Editora Segrac, p. 299-317. 2001.

FERNANDES F.; SOUZA S.G. Estabilização de lodo de esgoto. In: ANDREOLI, C. V (coord) **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, ABES, p. 29 – 56. 2001.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; VON SPERLING, M. Remoção da umidade de lodos de esgoto. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Coord.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte. Editora Segrac. 2001a.

GONÇALVES, R. F.; LUDUVICE, M.; LIMA, M. R. P.; RAMALDES, D. L. C.; FERREIRA, A. C.; TELES, C. R.; ANDREOLI, C. V. Desidratação de lodos de esgotos. In: ANDREOLI, C. V (coord) **Resíduos sólidos do saneamento: Processamento, reciclagem e disposição final**. Rio de Janeiro: Rima, ABES, p. 57 – 86. 2001b.

GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; FARIAS, E. S.; SILVA, M. M.; CHAVES, M. C. V.; REIS, L.S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais. Campina Grande**. N. 1, p. 65-68, 2003.

GRANDIN, S. R.; ALEM SOBRINHO, P.; GARCIA JR., A. D. **Desidratação de lodos produzidos em estações de tratamento de água**. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 17, 1993, Natal: ABES, v. 2, p. 324-341. 1993.

INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de Transferência de calor e de massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 657 p. 2008.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 5. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

KELESSIDIS, A.; STASINAKIS; A. S. Comparative study of the methods used for treatment and disposal of sewage sludge in European countries. **Waste management**. p. 1186-1195. 2012.

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte de lodo. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Coord.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte. Editora Segrac. p. 399-423. 2001.

LUK'YASHCHENKO, K. I.; ARKHANGEL'SKAYA, T. A.; UMAROVA, A. B. Thermal diffusivity of plowed leached meadow-chernozemic soils in the Adygeya Republic. **Eurasian Soil Science**. V. 45. N°4. p. 404–407. 2012

LUO, F.; DONG, B.; DAI, L.; HE, Q.; DAI, X. Change of thermal drying characteristics for dewatered sewage sludge based on anaerobic digestion. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. V. 114. p. 307–312. 2013.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Plano Nacional de Saneamento Básico – Plansab** - Brasília, 2011.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: diagnóstico dos serviços de água e esgotos – 2013**. Brasília, 2014.

MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification, and Selection of Dryers. In: _____. **Handbook of Industrial Drying**. 3ª ed., CRC Press. p. 4 - 31 2006.

NAKSHABANDI, G.A.; KOHNKE, H. Thermal conductivity and diffusivity of soils as related to moisture tension and other physical properties. *Agricultural Meteorology* Amsterdam, V. 2, p. 271-279, 1965.

PEDROSO, L. R. M.; VASCONCELOS, L. C.; FIGUEIREDO, E. S.; WISNIEWSKI JR, A.; MARQUES; L. G. C.; OLIVEIRA, L. G. Aproveitamento energético de passivos ambientais de estação de tratamento de esgoto – ETE – Produção de biodiesel à partir de gordura de esgoto da ETE – Alegria. **5º Congresso de Rede Brasileira de Tecnologia de Biodiesel; 8º Congresso Brasileiro de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel**. 2012.

POSSETTI, G. R. C., JASINSKI, V. P., ANDREOLI, C. V., BITTENCOURT, S., CARNEIRO, C. Sistema térmico de higienização de lodo de esgoto movido a biogás para ETEs de médio e pequeno porte. **XV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Belo Horizonte, 2012.

POSSETTI, G. R. C. **Propriedades físicas, químicas e calorimétricas de lodos oriundos do processo de tratamento de esgoto doméstico na Sanepar**. Informe técnico. Curitiba: SANEPAR. 2013.

RICHTER, C. A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blucher. 2001.

ROSS, B. Z. L.; CARNEIRO, C.; AISSE, M. M.; FROEHNER, S. Caracterização da espuma produzida em reatores anaeróbios de manta de lodo, estado Paraná. **27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES**. 2013.

ROSS, B. Z. L.; MARQUES, C. J.; CARNEIRO, C.; COSTA, F. J. O. G.; FROEHNER, S.; AISSE, M. M. Avaliação do impacto da incorporação de espuma em lodo de esgoto destinado a uso agrícola. **XXXIV Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Monterrey, 2014.

SANTOS, W. N. Métodos transientes de troca de calor na determinação das propriedades térmicas de materiais cerâmicos: II - o método do fio quente. **Revista Cerâmica**. vol 51, 2005.

SANTOS, J. C.; SOUZA, D. C. L.; SANTANA, M. M.; CASTRO, A. A.; SILVA, G. F. Estudo da cinética de secagem de batata-doce (*Ipomoea batatas*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande. V.14. nº 4. p. 323–328, 2012.

SINGH, R.P. Thermal diffusivity in food processing. In: **Food Technology**. p. 87-91, 1982.

SILVA JR., A. P.; ISAAC, R. L. Adensamento por gravidade de lodo de ETA gerado em decantador convencional e decantador laminar. In: **XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Cancún. 2002.

SILVA, A. L. B.; PASSAMANI, F. R. F.; SPAVIER, L. C.; CRIBARI, B. S.; GONÇALVES, R. F. **Influência da difusividade térmica na eficiência da Pateurização de lodos de esgoto**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001.

SOUZA, C. L.; AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Production and characterization of scum and its role in odour control in UASB reactors treating domestic waste water. **Water Science & Technology**. v. 54, p. 201-208, 2006.

SONG, H. W.; PARK, K. J.; HAN, S. K.; JUNG, H. S. Thermal conductivity characteristics of dewatered sewage sludge by thermal hydrolysis reaction. **Journal of the Air & Waste Management Association**. 64:12, 1384-1389, 2014.

STANDARD METHODS For the Examination of Water and Wastewater. 22 ºedição. 2012.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; SOUZA, N. R. de; ALÉSSIO, P.; SANTOS, G. T. A. Efeito da adição de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades de material cerâmico estrutural. **Revista Cerâmica**. vol 52, 2006.

TELLES, C. R.; ANDREOLI, C. V. E; BERNERT, P. M. Difusividade Térmica do lodo de esgoto. In: **Operacionalização das alternativas de secagem e higienização do lodo de esgoto**. Prosab 2 Tema 4, SANEPAR, Curitiba – PR – 2000.

TRES, M. V.; BORGES, G. R.; CORAZZA, M. L.; ZAKRZEVSKI, C. A. Determinação da difusividade térmica de alimentos: medidas experimentais e simulação numérica. **Perspectiva**, Erechim. v.35, n.131, p. 43-56. 2011.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. **Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa, 2001.

VAXELAIRE, J.; CÉZAC, P. Moisture distribution in activated sludges: a review. **Water Research**. V 38, p. 2215–2230. 2004.

VILLELA, F. A.; SILVA, W. R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. **Scientia Agricola**, Piracicaba. p. 145-153, 1992.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª edição, V. 1, Belo Horizonte: SEGRAC, 2005.

VON SPERLING, M.; GONÇALVES, R. F. Lodos de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. (Coord.) **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte. Editora Segrac 2001.

ZUMA, L.; VELKUSHANOVA, K.; BUCKLEY, C. Chemical and thermal properties of VIP latrine sludge. **Water SA (online)**. Volume 41. n. 4, p. 534-540, 2015.

WEF – Water Environment Federation; ASCE – **American Society of Civil Engineers. Design of municipal wastewater treatment plants**. Volume II, WEF Manual of practice n.8, Alexandria, 1992.

APÊNDICE 1

PUBLICAÇÕES ASSOCIADOS COM ESTA DISSERTAÇÃO

KRIGUEL, K.; POSSETTI, G. R. C.; MACHADO, J. M.; CARNEIRO, C.; AMARAL, K. J. **Determinação da difusividade térmica do lodo proveniente do tratamento anaeróbio de esgoto doméstico.** In: Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Rio de Janeiro. 2015.

PUBLICAÇÕES ASSOCIADOS COM OUTROS TEMAS

KRIGUEL, K.; POSSETTI, G. R. C.; AMARAL, K. J. **Autonomia energética: Potencial de estações de tratamento de esgoto.** Ciclo MAUI de palestras – Avaliação, Planejamento e Tecnologias aplicadas ao meio ambiente. UFPR. 2015.

COSTA, F. J. O. G.; LEITE, B. Z.; CARNEIRO, C.; KRIGUEL, K.; LISBOA, A. M. **Estudo do efeito da aplicação de nitrato de cálcio em diferentes concentrações na redução de sulfetos no tratamento de esgoto sanitário em reatores UASB piloto.** In: Anais do 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Rio de Janeiro. 2015.

ANEXO 1

DEDUÇÃO MATEMÁTICA DA FÓRMULA PARA DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE MATERIAS DE BAIXA CONDUTIVIDADE

O método proposto por Chung e Jackson (1954) e adaptado por Clivati (1991) para obtenção da difusividade térmica em materiais de baixa condutividade, considera a temperatura em função do tempo de aquecimento em banho maria. Os autores partiram da equação 23 para fluxo unidimensional na direção x :

$$c \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = K \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (23)$$

A variação da temperatura com o tempo pode ser expressa pela equação 24, onde a relação condutividade térmica (K) pelo calor específico volumétrico (c) é considerada a difusividade térmica (D) em $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (24)$$

A equação 24 indica que a taxa de variação da temperatura com o tempo é função da difusividade térmica e da taxa da variação espacial do gradiente de temperatura. Nessa equação foi assumido que a condutividade térmica e o calor específico volumétrico são independentes do tempo e da posição, isto é, a umidade é constante.

A equação 25 escrita em coordenadas cilíndricas:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = D \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (25)$$

Em que, r = coordenada de posição radial, sujeita às seguintes condições iniciais e de contorno:

$$T = T_0 \quad \text{quando } t = 0 \quad (26)$$

$$\lim_{r \rightarrow rm} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{-h}{k} (T_a - T) \quad (27)$$

em que:

$T(t)$ é a temperatura no ponto r e tempo t ($^{\circ}\text{C}$);

T_0 é a temperatura inicial da amostra ($^{\circ}\text{C}$);

T_B é a temperatura constante do banho Maria ($^{\circ}\text{C}$);

t é o tempo de aquecimento (s);

h é o coeficiente de transferência de calor na superfície ($\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}$);

k é a condutividade térmica ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$); e,

r_m é o raio do cilindro (cm).

Segundo Chung & Jackson (1954), a equação 25 sob as condições das equações 26 e 27, conduz à solução particular apresentada na equação 28:

$$\frac{T_B - T(t)}{T_B - T_0} = \sum_{v=1}^{v=\infty} \frac{2 J_1(Xv)}{Xv [J_0^2(Xv) + J_1^2(Xv)]} \left[\exp - \left(Xv^2 \frac{Dt}{r^2 m} \right) \right] \left[J_0 \left(Xv \frac{r}{rm} \right) \right] \quad (28)$$

em que:

$J_0(x)$ é a função de Bessel de 1 $^{\circ}$ tipo e ordem zero de x ;

$J_1(x)$ é a função de Bessel de 1 $^{\circ}$ tipo e 1 $^{\circ}$ ordem de x ;

t é o tempo de aquecimento (s); e,

Xv é a raiz positiva de $XJ_1(x) = (hr_m/k)J_0(x)$.

A equação 28 é uma série altamente convergente, que se reduz a uma equação do tipo:

$$Y = A \cdot 10^{-bt} \quad (29)$$

$$A = \frac{2 J_1(X_1)}{x_1 [J_0^2(x_1) + J_1^2(x_1)]} \left[J_0 \left(X_1 \frac{r}{rm} \right) \right] \quad (30)$$

$$b = \frac{x_1 D}{2,303 r_m^2} \quad (31)$$

em que:

Y é a taxa da diferença de temperatura $(T_B - T(t)) \cdot (T_B - T_0)^{-1}$ (adimensional);

A é uma constante; e,

$-b$ é inclinação da curva $\log Y-t$ (s).

Sendo assim, é possível calcular a difusividade térmica através do coeficiente angular b que se obtém da função $(T_B - T(t)) \cdot (T_B - T_0)^{-1}$ versus o tempo, ou seja, por meio da equação 32:

$$D = \frac{2,303 \cdot b \cdot r_m^2}{x^2} \quad (32)$$

em que:

x é a constante de valor 2,405;

$-b$ é a inclinação da curva $\log Y-t$ (s); e,

r_m é o raio do cilindro (cm).