

**AIRTON CHECONI DAVID**

**SECAGEM TÉRMICA DE LODOS DE ESGOTO.  
DETERMINAÇÃO DA UMIDADE DE  
EQUILÍBRIO**

**Dissertação apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo  
para obtenção do título de Mestre em  
Engenharia.**

**São Paulo  
2002**

# SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

1.	INTRODUÇÃO .....	1
2.	OBJETIVOS .....	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Geração e tratamento de lodos de ETEs.....	5
3.1.1	Generalidades.....	5
3.1.2	Fontes de lodos de esgotos.....	6
3.1.3	Produção de lodos em ETEs .....	7
3.1.4	Tratamento de lodos .....	9
3.1.5	Estabilização de lodos de ETEs .....	11
3.1.6	Condicionamento de lodo .....	13
3.1.7	Desidratação de lodo .....	13
3.1.8	Produção de biogás em digestores anaeróbios.....	19
3.1.9	Características de lodos desidratados .....	20
3.2	Fundamentos de secagem térmica.....	23
3.2.1	Generalidades .....	23
3.2.2	Terminologia .....	23
3.2.3	Umidade de um sólido.....	25
3.2.4	Condição de equilíbrio de um sólido úmido com o meio de secagem.....	26
3.2.5	Determinação da umidade de equilíbrio .....	31
3.2.6	Secagem sob condições constantes do meio de seca.....	35
3.2.7	Período de velocidade de secagem constante .....	38
3.2.8	Período de velocidade de secagem decrescente.....	40
3.2.9	Secagem sob condições variáveis.....	41
3.3	Métodos de secagem térmica de lodos/biossólidos.....	43
3.3.1	Generalidades.....	43
3.3.2	Associação água-sólidos no lodo .....	44
3.3.3	Sistemas de secagem.....	45
3.3.4	Consumo de energia .....	47
3.3.5	Métodos de transferência de calor.....	48
3.3.6	Classificação de secadores.....	50
3.3.7	Tipos de secadores.....	53
3.3.8	Controle de emissões.....	61

3.4	Utilização na agricultura de biossólidos submetidos a processos de secagem térmica .....	63
3.4.1	Generalidades .....	63
3.4.2	Normatização para uso na agricultura .....	64
3.4.3	Biossólido na indústria de fertilizante .....	69
3.4.4	Benefício agrônômico dos biossólidos .....	71
3.4.5	Importância da matéria orgânica dos biossólidos .....	73
3.4.6	Importância dos macro e micronutrientes para as plantas .....	74
3.4.7	Qualidade dos biossólidos submetidos a secagem térmica .....	76
3.4.8	Formas de utilização de biossólidos secos na agricultura .....	79
3.4.9	Propriedades físicas dos fertilizantes granulados .....	79
4.	SECADOR DE LODOS DA ETE SÃO MIGUEL NA RMSP .....	84
4.1	Generalidades .....	84
4.2	Descrição do processo de secagem térmica .....	85
4.3	Descrição do secador de lodos .....	88
4.4	Tratamento de vapor .....	91
4.5	Sistema de óleo térmico .....	91
4.6	Qualidade dos biossólidos granulados .....	92
4.7	Aspectos de segurança operacional .....	93
4.8	Parâmetros de secagem de lodos na ETE São Miguel .....	94
5.	MATERIAIS E MÉTODOS .....	96
5.1	Levantamento da curva de umidade de equilíbrio .....	96
5.2	Materiais utilizados nos experimentos .....	97
5.3	Preparação das câmaras com umidades controladas .....	97
5.3.1	Sais utilizados .....	97
5.3.2	Preparação das soluções .....	99
5.4	Preparação das cápsulas .....	100
5.5	Coleta e preparação das amostras .....	100
5.6	Secagem das amostras .....	101
5.7	Acompanhamento da absorção de umidade .....	103
5.8	Curva de dessorção de umidade .....	103
6.	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	105
6.1	Experiência com sorção de umidade .....	106
6.2	Experiência com dessorção de umidade .....	109
6.3	Levantamento da curva de umidade de equilíbrio .....	111
6.4	Apresentação da curva de umidade de equilíbrio .....	113
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	116
	ANEXO A Resultados dos experimentos com sorção de umidade .....	119
	ANEXO B Resultados dos experimentos com dessorção de umidade .....	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	147

## **RESUMO**

O estudo apresenta os principais aspectos da operação de secagem térmica de lodos gerados em estações de tratamento de esgotos, os tipos de equipamentos disponíveis no mercado que podem ser utilizados para esse fim e o comportamento da sorção de umidade pelo material seco quando em contato com o ar ambiente.

A operação de secagem térmica é uma alternativa para a diminuição do peso e volume de lodos, com conseqüente diminuição dos custos de transporte e disposição final. É considerada, também, um processo de melhoria da qualidade do lodo, pois elimina os microrganismos patogênicos e, ao mesmo tempo, preserva a matéria orgânica presente no lodo, aspectos de importância fundamental quando o lodo/biossólido seco vai ser utilizado na agricultura.

Os equipamentos para secagem térmica podem ser diretos ou indiretos. Os principais tipos são: secador rotativo, de soleiras múltiplas, de leito fluidizado, por transporte pneumático e transportadores de esteira. Cada tipo possui vantagens e desvantagens em relação aos demais. A eficiência do processo de secagem térmica é influenciada por uma série de fatores, como: consumo específico de energia, tipo de equipamento utilizado e teores de umidade inicial e final do material.

Nos ensaios de laboratório, mediu-se os teores de umidade de equilíbrio do lodo produzido na ETE Baureri, localizada na Região Metropolitana de São Paulo, sob diferentes condições de umidade relativa do ar ambiente. Com esses valores, obteve-se a curva de umidade de equilíbrio do material. Como resultado dessa experiência conclui-se que para cada umidade relativa do ar ambiente há um teor de umidade de equilíbrio do lodo.

## ABSTRACT

The study presents the main aspects of a thermal drying operation of the sludge produced by wastewater treatment plants, the types of equipment likely to be used for this purpose and the sorption behavior of the water contents by the dry material when in contact with the air.

The thermal drying operation is an alternative to reduce the weight and volume of the sludge production with a resulting decrease in transportation and final disposal costs. It is also deemed to be a process that improves the sludge quality because includes the elimination of pathogenic microorganisms while preserving the existing organic matter of the sludge, which are aspects of the utmost importance whenever the dry biosolid will be used as fertilizer in agriculture.

The thermal drying equipment can be direct or indirect. The main types are: rotary dryers, multi-tray dryers, fluid bed dryers, flash dryers, and conveyor dryers. Each type presents advantages and disadvantages when compared to one another. The efficiency of the thermal drying process is affected by several aspects, such as specific consumption of energy, type of equipment used, and initial and final water contents of the material.

The laboratory tests measured the equilibrium moisture contents of the sludge produced by Barueri Wastewater Treatment Plant, located in the São Paulo Metropolitan Region, under different conditions of environment relative humidity. Based on these measurements, an equilibrium moisture curve of the material was obtained. The major conclusion of the experiment was that to each environment relative humidity there is a corresponding equilibrium moisture of the sludge.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título.....</b>	<b>página</b>
3.1	Fluxograma de processo de tratamento de lodos .....	10
3.2	Centrífuga para desidratação de lodos.....	15
3.3	Esquema típico de um filtro prensa de esteira .....	16
3.4	Esquema de funcionamento do filtro prensa de placas.....	17
3.5	Filtro prensa de placas .....	18
3.6	Curva de umidade de equilíbrio .....	28
3.7	Curvas de umidade de equilíbrio de vários materiais.....	30
3.8	Curvas de sorção e dessorção de umidade.....	32
3.9	Secagem sob condições constantes do meio de seca.....	35
3.10	Curva do teor de umidade em função do tempo de secagem.....	36
3.11	Curva de velocidade de secagem em função do tempo .....	37
3.12	Curva típica de velocidade de secagem em função da umidade do sólido ...	38
3.13	Esquema de um sistema de secagem.....	46
3.14	Secagem direta .....	51
3.15	Secagem indireta .....	52
3.16	Secador rotativo.....	54
3.17	Secador transportador de esteira .....	55
3.18	Secador a transporte pneumático “flash dryer”.....	56
3.19	Secador de soleiras múltiplas .....	57
3.20	Secador de soleiras múltiplas Seghers.....	58
3.21	Secador pulverizador “spray dryer” .....	59
3.22	Esquema de um secador por leito fluidizado .....	60
3.23	Biossólido seco e granulado para aplicação na agricultura .....	78
4.1	Esquema da secagem térmica de lodos da ETE São Miguel .....	85
4.2	Grânulo de lodo em processo de formação.....	86
4.3	Vista interna do secador de lodos da ETE São Miguel .....	87
4.4	Corpo do secador de lodos da ETE São Miguel em fase de montagem.....	89
4.5	Bandejas de secagem e raspadores de lodo do secador de lodos da ETE São Miguel.....	90
4.6	Caldeira de óleo térmico do secador de lodos da ETE São Miguel .....	92
5.1	Sais utilizados nas experiências nas embalagens originais.....	98
5.2	Preparação de solução saturada de sal.....	100
5.3	Preparação das amostras de lodo para secagem.....	101
5.4	Amostras de lodo na estufa de secagem .....	102

5.5	Pesagem e acondicionamento das amostras de lodo nos dessecadores.....	102
6.1	Evolução do teor de sólidos das amostras de lodo em processo de sorção de umidade.....	105
6.2	Evolução do teor de sólidos das amostras de lodo em processo de dessorção de umidade.....	106
6.3	Curvas de evolução da sorção de umidade ao longo do tempo.....	107
6.4	Curvas de evolução da dessorção de umidade ao longo do tempo.....	110
6.5	Curva da umidade de equilíbrio do lodo seco.....	113
6.6	Curvas de umidade de equilíbrio do lodo nos processos de sorção e dessorção.....	114
6.7	Curva da umidade de equilíbrio do lodo seco em teores de sólidos.....	114
6.8	Umidade de equilíbrio do lodo comparada com outros materiais.....	115
A-1	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.....	120
A-2	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.....	122
A-3	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.....	124
A-4	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.....	126
A-5	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.....	128
A-6	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.....	130
A-7	Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.....	132
B-1	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.....	134
B-2	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.....	136
B-3	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.....	138
B-4	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.....	140
B-5	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.....	142
B-6	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.....	144
B-7	Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.....	146

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>	<b>Título</b>	<b>página</b>
3.1	Produção típica de lodos para vários processos de tratamento .....	7
3.2	Produção de lodos em ETEs .....	8
3.3	Características do esgoto e produção de lodos nas ETEs da RMSP .....	9
3.4	Composição típica de lodo bruto e digerido .....	21
3.5	Concentração de metais pesados em lodos de ETEs da RMSP .....	22
3.6	Atividade de água de referência para sais a 25°C .....	33
3.7	Preparação de soluções saturadas de sais a 25°C .....	34
3.8	Concentrações de metais em biossólidos para uso agrícola.....	68
3.9	Principais parâmetros de valor agrônômico dos biossólidos produzidos em diversas ETEs do Brasil .....	72
4.1	Produção de lodos nas ETEs da Sabesp na RMSP .....	84
5.1	Sais utilizados nas experiências.....	98
5.2	Preparação das soluções saturadas de sais .....	99
6.1	Resumo dos resultados dos experimentos com sorção de umidade .....	109
6.2	Resumo dos resultados dos experimentos com dessorção de umidade .....	111
6.3	Resultados do processo de sorção de umidade dos lodos após estabilização	112
6.4	Resultados do processo de dessorção de umidade dos lodos após estabilização .....	112
A-1.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $Wr=32,8\%$ ).....	119
A-1.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $Wr=32,8\%$ ) .....	119
A-1.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $Wr$ ) de 32,8% .....	120
A-2.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $Wr=43,2\%$ ).....	121
A-2.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $Wr=43,2\%$ ) .....	121
A-2.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $Wr$ ) de 43,2% .....	122
A-3.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $Wr=57,6\%$ ).....	123
A-3.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $Wr=57,6\%$ ) .....	123
A-3.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $Wr$ ) de 57,6% .....	124
A-4.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $Wr=75,3\%$ ).....	125
A-4.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $Wr=75,3\%$ ) .....	125



A-4.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3% .....	126
A-5.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=84,3\%$ ) .....	127
A-5.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=84,3\%$ ) .....	127
A-5.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3% .....	128
A-6.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=93,6\%$ ) .....	129
A-6.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=93,6\%$ ) .....	129
A-6.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6% .....	130
A-7.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r\sim 100\%$ ) .....	131
A-7.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r\sim 100\%$ ) .....	131
A-7.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100% .....	132
B-1.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=32,8\%$ ) .....	133
B-1.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=32,8\%$ ) .....	133
B-1.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8% .....	134
B-2.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=43,2\%$ ) .....	135
B-2.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=43,2\%$ ) .....	135
B-2.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2% .....	136
B-3.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=57,6\%$ ) .....	137
B-3.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=57,6\%$ ) .....	137
B-3.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6% .....	138
B-4.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=75,3\%$ ) .....	139
B-4.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=75,3\%$ ) .....	139
B-4.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3% .....	140
B-5.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=84,3\%$ ) .....	141
B-5.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=84,3\%$ ) .....	141

B-5.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3% .....	142
B-6.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r=93,6\%$ ) .....	143
B-6.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r=93,6\%$ ) .....	143
B-6.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6% .....	144
B-7.1	Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo ( $W_r\sim 100\%$ ) .....	144
B-7.2	Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade ( $W_r\sim 100\%$ ) .....	145
B-7.3	Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100% .....	146

## LISTA DE SÍMBOLOS

W	Umidade livre
Wr	Umidade relativa do ar
Wd	Umidade de um sólido na base seca
Wde	Umidade de equilíbrio de um sólido
Ww	Umidade de um sólido na base úmida
N	Velocidade de secagem
Ma	Massa de água
Md	Massa de sólido isento de água
SST	Sólidos suspensos totais
SSV	Sólidos suspensos voláteis
ST	Sólidos totais
T	Temperatura, Temperatura de bulbo seco
Tu	Temperatura de bulbo úmido
P	Pressão
Po	Pressão de vapor
A	Área
V	Velocidade
Aw	Atividade de água
TS	Teor de sólidos

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
RMSP	Região Metropolitana de São Paulo
EPA	Environment Protection Agency
USEPA	United States Environment Protection Agency
WEF	Water Environment Federation
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
PFRP	Processo de Redução Adicional de Patógenos
PSRP	Processo de Redução de Patógenos
NMP	Número Mais Provável
UFP	Unidade Formadora de Placa
CEE	Comunidade Econômica Européia
CEEJ	Consórcio ETEP-ESTÁTICA-JNS
NPK	Nitrogênio-Fosforo-Potássio
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
PA	Para Análise

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de lodos em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs), que vem crescendo, principalmente nos últimos anos, tem se tornado um grande problema para as companhias de saneamento básico e, de um modo mais abrangente, para toda a sociedade.

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), com um aglomerado urbano de 17 milhões de habitantes, possui um potencial de produção diária de lodos de aproximadamente 750 toneladas, em base seca. Isso constitui um problema de dimensões consideráveis, que demanda a busca de soluções ambientalmente sustentáveis.

A alternativa de destinação final, que tem sido praticada, é a utilização de aterros sanitários. Entretanto, para a RMSP, essa alternativa ficará comprometida devido às grandes quantidades de lodos a serem gerados nos próximos anos e à falta de áreas próprias para instalação de aterros sanitários exclusivos na região.

O Plano Diretor de Uso/Disposição dos Lodos das ETEs da RMSP, desenvolvido para a Sabesp pelo consórcio ETEP-ESTÁTICA-JNS (CEEJ), em 1998, apresentou estudos de várias alternativas de disposição final para esses lodos, entre elas: a disposição em aterro sanitário exclusivo de tortas desidratadas e secas, a incineração e a aplicação agrícola das tortas e lodos secos.

A alternativa do Plano, denominada: Aproveitamento dos lodos – Uso Agrícola, recomenda a utilização de centrais de secagem térmica e aterro sanitário exclusivo como solução de custo otimizado, frente à alternativa de destinação final apenas para aterro sanitário. Dessa forma, os lodos que se enquadram dentro dos padrões de qualidade necessários são destinados à agricultura e apenas os lodos que não atingem os padrões de qualidade são encaminhados para aterro sanitário exclusivo.

A utilização do lodo na agricultura é uma prática já adotada na Europa, Estados Unidos e Canadá há vários anos. No Brasil a aplicação agrícola é recente e tem se mostrado uma alternativa apropriada do ponto de vista econômico e ambiental. Para atingir os padrões de qualidade necessários para aplicação na agricultura, os lodos

precisam ser tratados por processos de estabilização e beneficiamento, tornando-se, assim, um bio sólido. A secagem térmica é um processo de tratamento para melhoria da qualidade dos lodos indicado para produção do bio sólido Classe A, que pode ser utilizado na agricultura sem restrições.

A secagem térmica promove a redução da umidade através da evaporação da água e a destruição dos organismos patogênicos. Apenas a água é removida, os sólidos totais são mantidos praticamente inalterados. A preservação da matéria orgânica, associada à eliminação dos organismos patogênicos, constitui-se em um aspecto de importância fundamental quando o bio sólido vai ser utilizado como fertilizante na agricultura.

O custo operacional da secagem térmica é bastante alto quando comparado com outras operações de tratamento de esgotos. O fator de maior relevância é o consumo de combustível para a geração de calor. A busca de eficiência torna-se obrigatória para otimização dos custos operacionais.

Um fator muito importante na busca de eficiência operacional de secagem é o conhecimento da umidade de equilíbrio do material. Trata-se da umidade contida no sólido que está em equilíbrio com a umidade do ar ambiente. Um material muito seco, com teor de sólidos superior àquele correspondente à sua umidade de equilíbrio, ao ser exposto às condições ambientais, pode absorver a umidade do ar, tornando a operação ineficiente.

A umidade de equilíbrio é uma propriedade do material. O conhecimento do seu valor é muito importante, pois determina a condição final do processo de secagem. Ela estabelece o valor limite para o teor de sólidos do material submetido à secagem térmica, além do qual não adianta prosseguir, pois há comprometimento da eficiência operacional.

## 2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é o estudo da secagem térmica de lodos gerados em Estações de Tratamento de Esgoto, que utilizam o processo de lodo ativado convencional. Para atingir esse objetivo, foram realizados os seguintes estudos:

- Revisão bibliográfica referente às operações de secagem térmica de lodos gerados em ETEs.
- Levantamento, junto ao mercado, dos tipos e características principais dos equipamentos para a secagem térmica de lodos.
- Ensaio em laboratório do comportamento da umidade contida nos lodos secos em relação à umidade do ar ambiente e determinação da curva de umidade de equilíbrio do lodo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A apresentação desta revisão bibliográfica está dividida em quatro partes. A primeira apresenta a geração e o tratamento do lodo em uma ETE por processo de lodo ativado convencional. A segunda trata dos fundamentos e conceitos principais da secagem térmica. A terceira apresenta os tipos e características principais dos secadores utilizados para secagem térmica de lodos e os processos de secagem mais usuais aplicados para esse tratamento. Finalmente, a quarta parte trata das características finais dos biossólidos submetidos a processos de secagem térmica para utilização como fertilizante na agricultura.

O termo biossólido ficou definido, pela norma P 4.230 da CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, válida para o Estado de São Paulo, como o lodo proveniente das estações de tratamento de esgotos sanitários, processados de modo a permitir o seu manuseio de forma segura na utilização agrícola (TSUTIYA, 2001).

Segundo a Water Environment Federation - WEF (1996), o termo biossólido, deve ser utilizado para designar os produtos orgânicos gerados nos processos de tratamento de esgotos, que tratados ou beneficiados por processos de estabilização físicos, químicos e biológicos, podem ser utilizados de forma benéfica. O termo lodo deve ser utilizado para designar os sólidos originados nos processos de tratamento, que não tenham sido apropriadamente processados para reciclo benéfico. O termo resíduo é uma expressão geral, tipicamente utilizada para descrever materiais removidos por processos de tratamento líquido ou sólido. Para a WEF (1996) o biossólido também pode ter outros usos benéficos, além da utilização agrícola.



### **3.1 Geração e tratamento de lodos de ETEs**

#### **3.1.1 Generalidades**

Os esgotos sanitários municipais são constituídos basicamente de uma mistura de água e sólidos orgânicos e minerais. Sua composição média aponta para 99,9% de água e 0,1% de sólidos. Do total de sólidos, aproximadamente 70% são constituídos de materiais orgânicos como: proteínas, carbo-hidratos e gorduras; os 30% restantes são constituídos de materiais inorgânicos como: areia, sais e metais.

O tratamento de esgotos, de uma maneira geral, consiste em separar os materiais sólidos e reduzir a carga de matéria orgânica presente, através de processos físicos, químicos e biológicos. Esse tratamento pode ser dividido em duas fases: a líquida, na qual as matérias orgânicas e minerais suspensas e dissolvidas no meio líquido progressivamente vão sendo removidas; e a sólida, onde esses materiais vão sendo progressivamente estabilizados e concentrados.

Como resultado do tratamento, tem-se no final o efluente líquido e o lodo. O efluente líquido é água com reduzidos teores de materiais poluentes, que pode ser lançado nos corpos d'água, de acordo com a carga remanescente e a classe do corpo receptor. O lodo contendo o material sólido, resultante do processo de tratamento de esgoto, precisa ser ainda tratado para destinação final em aterros sanitários ou na agricultura.

Os lodos resultantes dos processos de tratamento de esgotos são constituídos basicamente de materiais orgânicos (sólidos voláteis) e minerais (sólidos fixos), além de água. Suas características, composição e propriedades podem variar bastante, dependendo da origem do esgoto e do processo de tratamento empregado.

Para cada processo de tratamento adotado na ETE, o lodo pode ser submetido a diferentes tipos de adensamento, estabilização, condicionamento e desidratação, o que resulta em diferentes características físicas e químicas no lodo final. São essas características, que devidamente aproveitadas, conferem ao lodo um valor agrícola que ainda pode ser explorado.

O custo para o tratamento e disposição final dos lodos gerados em uma estação de tratamento de esgotos é muito alto em relação às demais operações. Segundo TSUTIYA (2001a), é da ordem de 20% a 40% do custo operacional de toda a estação. A utilização na agricultura, executada com critérios bem estabelecidos, pode ajudar a reduzir os custos de gerenciamento dos lodos, além de ser uma medida de menor impacto ambiental.

### **3.1.2 Fontes de lodos de esgotos**

Nos processos convencionais de tratamento de esgotos, os lodos gerados são geralmente classificados de acordo com a fase do tratamento em que foram originados. Desta forma, são referidos como lodo primário, secundário ou terciário, podendo ser digeridos ou não.

O lodo primário é aquele originado no decantador primário. A concentração de sólidos situa-se na faixa de 1 a 6 %, sendo comum concentrações em torno de 3%. Nessa fase do processo, o lodo deve ser adensado para diminuir seu volume e, conseqüentemente, facilitar o tratamento nas fases posteriores. O adensamento do lodo primário, por ser de execução relativamente fácil, é normalmente realizado em adensadores por gravidade, onde se atinge concentrações de sólidos na faixa de 4 a 10%. O lodo primário é altamente putrescível, gera maus odores e contém alta concentração de patógenos, que podem causar vários tipos de doenças se houver contato humano.

O lodo secundário é aquele originado nos processos de conversão biológica de tratamentos por lodos ativados e separados nos decantadores secundários. Seu adensamento é mais difícil de ser realizado, por isso, normalmente são utilizados os adensadores por flotação para essa operação, na qual se consegue obter concentrações de sólidos na faixa de 1 a 6%.

Os lodos primário e secundário, também designados como não digeridos ou lodos brutos, após as operações de adensamento, são misturados e encaminhados para a fase de digestão. O lodo digerido é aquele que sofreu a estabilização biológica, que

pode ser aeróbia ou anaeróbia, sendo esta última a mais comum em ETEs convencionais.

### 3.1.3 Produção de lodos em ETEs

A quantidade de lodo produzido em uma ETE pode variar bastante, depende das características iniciais do esgoto a ser tratado e do processo de tratamento empregado.

Em um sistema de tratamento de esgotos por lodos ativados, um valor típico de produção é de 50 gramas por dia para cada habitante. A Tabela 3.1, extraída de METCALF & EDDY (1991), apresenta os valores de produção de lodos para os processos de tratamento mais comuns.

Tabela 3.1 – Produção típica de lodos para vários processos de tratamento.

Processo de tratamento	Densidade do lodo	Sólidos secos (kg/m <sup>3</sup> )	
		Faixa	Valor típico
Decantação primária	1,02	0,106 - 0,165	0,147
Lodo ativado	1,005	0,070 - 0,094	0,082
Filtro biológico	1,025	0,060 - 0,094	0,070
Aeração prolongada	1,015	0,082 - 0,118	0,094
Lagoa aerada	1,01	0,082 - 0,118	0,094

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (1991).

ALEM SOBRINHO (2001a) cita os valores de produção de lodos para diversos processos de tratamento, conforme apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Produção de lodos em ETEs.

<b>Processo de tratamento</b>	<b>Produção de lodo (g SST/habitante.dia )</b>
Lodo ativado convencional	35 - 40
Reator UASB	15 - 20
Lagoa aerada	15 - 25
Filtro biológico	35 - 40
Lodo ativado sem digestão	65 - 70

Fonte: Adaptado de ALEM SOBRINHO (2001).

Este último processo - lodo ativado sem digestão - pode gerar uma produção de 95 gramas de sólidos suspensos totais por dia por habitante, quando utilizada a estabilização do lodo desidratado com cal, segundo ALEM SOBRINHO (2001).

No sistema principal de esgotos da RMSP existem cinco grandes ETEs operadas pela Sabesp: Barueri, Suzano, Parque Novo Mundo, São Miguel e ABC. Todas elas operam pelo processo de lodo ativado convencional, sendo que apenas a ETE Parque Novo Mundo não possui processo de digestão de lodos. As produções de lodos nessas ETEs são bastante distintas, devido às diferentes características dos esgotos brutos recebidos e às diferenças nos processos de tratamento dos lodos e nas dosagens de produtos químicos.

Na ETE Barueri utiliza-se polímero para a desidratação de lodo. Nas ETEs ABC e Suzano utiliza-se cloreto férrico e cal. Nas ETEs Parque Novo Mundo e São Miguel a fase de desidratação está em fase de implantação. Na Tabela 3.3 são apresentadas as características principais dos esgotos brutos e as quantidades de lodos produzidas nas cinco ETEs da RMSP.

Tabela 3.3 – Características do esgoto e produção de lodos nas ETEs da RMSP.

ETE	Vazão m <sup>3</sup> /s	Características do esgoto bruto (mg/L)			Lodo produzido (base seca)	
		SST	DBO	DQO	t/dia	kg/m <sup>3</sup> *
ABC	1,43	163	111	264	14	0,121
Barueri	7,04	192	228	442	52	0,085
PNMundo	1,23	191	184	386	-	-
SMiguel	0,51	314	222	418	-	-
Suzano	0,70	372	396	858	18	0,298

Fonte: Sabesp (valores médios de outubro de 2000 a setembro de 2001).

(\*) kg de lodo em base seca por m<sup>3</sup> de esgoto tratado.

### 3.1.4 Tratamento de lodos

O tratamento de lodos, também chamado de tratamento da fase sólida, corresponde a um conjunto de etapas relativamente complexas e de alto custo em uma ETE. Inicia-se nos decantadores primário e secundário, onde o lodo é retirado e encaminhado para: adensamento, estabilização, condicionamento, e desidratação.

Dentre os processos que constituem a fase sólida do tratamento, os usualmente empregados nas ETEs são os seguintes:

- a) Processos físicos para concentração do teor de sólidos
  - adensamento por gravidade e por flotação;
- b) Processos de estabilização
  - biológico, através de digestão aeróbia e anaeróbia;
  - químico, através da adição de cal;
- c) Processos de condicionamento para a desidratação
  - químico, através de adição de cal, cloreto férrico ou polímeros;
- d) Processos de desidratação
  - desidratação natural em leitos de secagem ou lagoas de lodo;
  - desidratação mecanizada com filtros prensa de placas, centrífugas, e filtros prensa de esteira;

e) Processos térmicos de secagem ou condicionamento

- secagem térmica;
- incineração.

A Figura 3.1 apresenta um fluxograma dos processos de tratamento da fase sólida de uma estação de tratamento de esgotos, que utiliza o processo de lodo ativado com a etapa de secagem térmica.

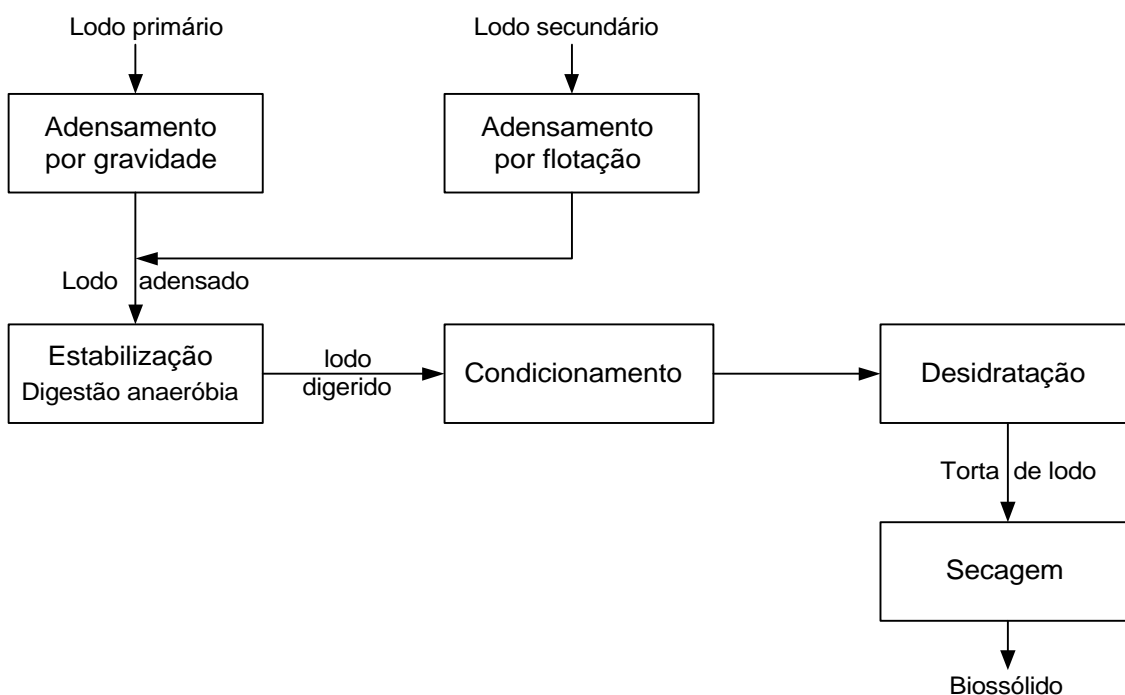


Figura 3.1 - Fluxograma de processo de tratamento de lodos.

Neste fluxograma são mostrados: adensamento por gravidade, para os lodos originados no decantador primário; adensamento por flotação, para os lodos biológicos originados no decantador secundário e; os dois, em conjunto, sendo misturados para entrar na fase de estabilização. Entretanto, esses processos podem ter variações, como por exemplo: a junção dos lodos primário e secundário para, em seguida, se fazer adensamento único, ou até mesmo não se ter a digestão anaeróbia. A etapa de secagem térmica pode ser substituída por: compostagem, incineração ou pode, apenas, não existir. Entretanto, está sendo, aqui, incluída pois é o objeto deste estudo.

### 3.1.5 Estabilização de lodos de ETEs

A estabilização do lodo é feita com o objetivo de reduzir a quantidade de organismos patogênicos presentes; eliminar odores ofensivos e inibir, reduzir ou eliminar o potencial para putrefação do lodo. Consegue-se a estabilização através de: redução biológica do conteúdo volátil, oxidação química do material volátil, adição de produtos químicos ao lodo para torná-lo inadequado para a sobrevivência de microrganismos e aplicação de calor para desinfecção.

Ao se projetar um processo de estabilização, é importante considerar a quantidade de lodo a ser tratada, assim como a integração do processo de estabilização com as outras unidades de tratamento e os objetivos do processo de estabilização, que são freqüentemente afetados por regulamentações existentes. Se o destino do lodo vai ser a utilização na agricultura, a redução de patógenos, por vários métodos de estabilização de lodo, deve ser considerada.

Dentre os métodos para estabilização de lodos, pode-se destacar como mais usuais: a estabilização com cal, a digestão aeróbia e anaeróbia e a compostagem. A oxidação química com cloro é raramente usada.

#### **Estabilização química**

A estabilização química com adição de cal é conseguida pela elevação do pH do lodo até valores iguais ou superiores a 12. Essa condição de pH não permite a sobrevivência de microrganismos. Com isso, inibe-se a putrefação do lodo e a geração de maus odores.

Pode-se utilizar a cal virgem (CaO) ou cal hidratada [Ca(OH)<sub>2</sub>]. Quanto maior a dosagem de cal, maior será o pH atingido. O critério mínimo para assegurar a inativação dos organismos patogênicos, segundo a EPA (1997), é de manter o pH em valores iguais ou superiores a 12 por duas horas de contato.

A estabilização com cal pode ser realizada após a desidratação. Nesse caso, a cal virgem (CaO) é acrescentada e misturada ao lodo através de equipamentos especiais de mistura. O contato da cal virgem com a água do lodo gera uma reação exotérmica,

provocando uma elevação da temperatura a valores acima de 50 °C, o que contribui para reduzir a viabilidade de ovos de helmintos.

### **Estabilização biológica**

De um modo geral, o processo biológico de estabilização é utilizado para redução dos microrganismos patogênicos, inibição ou redução do potencial para putrefação e eliminação de odores ofensivos.

A digestão anaeróbia de lodos é o método mais antigo de estabilização e o mais utilizado em ETEs, que empregam o sistema de lodo ativado. Compreende, em síntese, na degradação de parte da matéria orgânica pela ação de microrganismos na ausência de oxigênio livre. O lodo é colocado em digestores, normalmente tanques de concreto fechados, e a biodegradação anaeróbia leva à conversão da matéria orgânica, propiciando redução substancial da quantidade de sólidos voláteis, do número de organismos patogênicos e proporcionando melhoria no processo de desidratação mecânica. A matéria orgânica convertida dá origem à formação do biogás, composto principalmente de metano (60 a 70%), dióxido de carbono e traços de gás sulfídrico.

No processo anaeróbio, as bactérias metano formadoras apresentam atividade intensa em duas faixas de temperatura bem definidas. A primeira, situada entre 30 e 35°C e denominada mesofílica, é a faixa onde melhor se desenvolvem as bactérias mesófilas. A segunda situa-se entre 50 e 60°C e é denominada termofílica. Nessa faixa, aquelas bactérias são substituídas pelas termófilas, que se adaptam à temperaturas mais elevadas, necessitando de um tempo de retenção de lodos menor para a mesma produção de gás (CEEJ, 1998).

Na digestão aeróbia, o mecanismo de estabilização é a biodegradação de componentes orgânicos pelos microrganismos aeróbios. O processo passa pela oxidação direta da matéria orgânica biodegradável e conseqüente aumento da biomassa bacteriana, com posterior oxidação do material microbiano celular pelos próprios microrganismos. Essa fase final do processo é caracterizada pela respiração endógena, que acontece quando o substrato disponível para a biodegradação é



totalmente consumido, e os microrganismos passam a consumir o próprio protoplasma microbiano para obter energia para suas reações celulares.

### **3.1.6 Condicionamento de lodo**

O condicionamento do lodo é um processo utilizado para melhorar as características de separação das fases sólido-líquida do lodo, por meios físicos ou químicos. Conforme HAUG et al. (1992) apud MIKI (1998), o condicionamento do lodo neutraliza ou desestabiliza as forças químicas ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão, imersos em meio líquido. Esse processo de desestabilização permite que as partículas pequenas se juntem para formar agregados maiores, ou seja, os flocos. Essa formação de flocos vai beneficiar significativamente o processo seguinte, que é a desidratação dos lodos.

Os processos de condicionamento de lodos incluem a adição de produtos químicos orgânicos, inorgânicos ou uma combinação de ambos. Os orgânicos, normalmente utilizados, incluem o extenso grupo de polieletrólitos orgânicos (polímeros) e os inorgânicos, freqüentemente utilizados, são os sais: férricos, ferrosos, de alumínio e óxido ou hidróxido de cálcio.

A utilização desses produtos químicos na etapa de condicionamento dos lodos provoca alteração na composição química e na quantidade do biossólido resultante.

### **3.1.7 Desidratação de lodo**

A desidratação ou desaguamento dos lodos é uma operação física realizada para reduzir o conteúdo de água pelas seguintes razões:

- redução do volume para os tratamentos posteriores;
- diminuição do custo de transporte e de disposição final;
- facilidade de manuseio;
- redução da energia para secagem ou incineração;
- redução da produção de chorume em aterro sanitário.

Existem diversas técnicas para a desidratação dos lodos. Algumas se valem da evaporação e percolação natural, outras da utilização de energia externa através de

dispositivos mecânicos para desidratação mais rápida, dentre elas: a filtração, a compressão, a separação centrífuga e a compactação.

A escolha do dispositivo de desidratação mais apropriado deve ser determinada pelo tipo de lodo a ser desidratado, pelo espaço disponível e pelo destino final que será dado ao lodo. Para pequenas estações, onde a disponibilidade de espaço não é problema, geralmente se utilizam leitos ou lagoas de secagem. Para instalações de grande porte, situadas em lugares com espaço limitado, são melhores aplicáveis os dispositivos de desidratação mecânica. A definição de um equipamento para desidratação mecânica de um determinado lodo requer mais que uma simples escolha em catálogos. Cada sistema possui suas vantagens e desvantagens. É necessário analisar as opções existentes, levando-se em conta as características do lodo em questão, as características desejadas para disposição final ou secagem, as variáveis locais do projeto e, até mesmo, conduzir experimentos em escala piloto ou de bancada.

Os principais equipamentos de desidratação mecânica disponíveis no mercado, aplicáveis à desidratação de lodos de ETEs de médio e grande porte são: as máquinas centrifugadoras, também denominadas centrífugas ou “decanters” centrífugos; os filtros prensa de esteira e os filtros prensa de placas.

### **Centrífugas**

A operação de centrifugação é utilizada para separar duas ou mais fases de densidades diferentes, em particular, para separar sólidos em suspensão de um meio líquido. Envolve a aplicação de uma força centrífuga à mistura, que acelera a separação das frações de diferentes densidades. É um processo similar à decantação por gravidade, com a diferença de se usar, neste caso, uma força centrífuga muitas vezes superior à força da gravidade, que é promovida pela rotação em alta velocidade do conjunto rotativo da máquina. A Figura 3.2 mostra uma centrífuga para desaguamento de lodos.

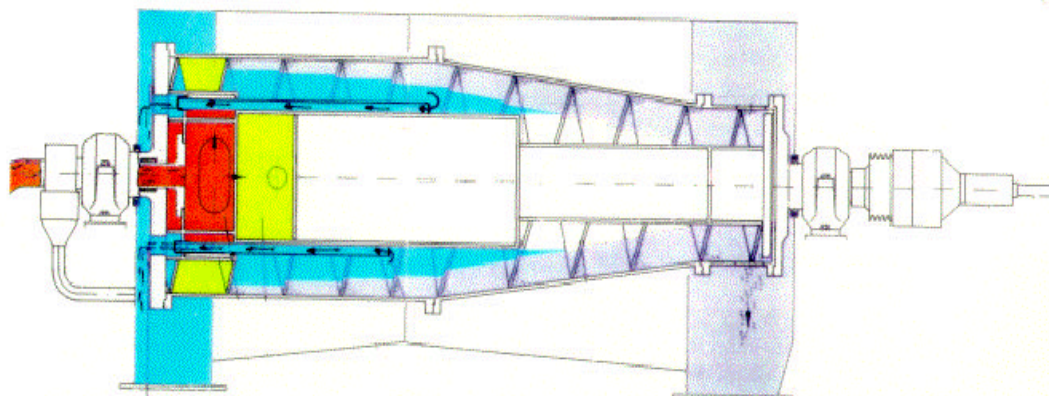


Figura 3.2 - Centrífuga para desidratação de lodos. Fonte: Catálogo da Alfa Laval.

A separação entre os sólidos e líquidos é feita dentro de um tambor rotativo cilíndrico, em cujas paredes internas a fase sólida é concentrada e removida continuamente por um raspador na forma de rosca. A parte sólida é recolhida em uma caixa e transferida para uma esteira transportadora. A parte líquida é recirculada no processo de tratamento de esgotos.

Para melhorar a eficiência da separação entre as fases, pode-se adicionar um polímero que facilite a agregação e, conseqüentemente, a sedimentação das partículas sólidas. Esse polímero deve ser devidamente selecionado pelo seu tipo e características específicas.

A concentração de sólidos, conseguida com a operação de centrifugação, pode variar bastante. Essa concentração depende das características iniciais do lodo, do tipo e dosagem do polímero utilizado e, também, das características do equipamento utilizado. Segundo a WEF (1992), concentrações de sólidos da ordem de 30 a 35% têm sido alcançadas com a utilização de centrífugas. Entretanto, na prática, tem sido observado concentrações da ordem de 20 a 25% de sólidos para lodos originários de ETEs.

### **Filtro prensa de esteira**

O filtro prensa de esteira é um dispositivo para desidratação mecânica de lodos de operação contínua, que combina a drenagem por gravidade com compressão mecânica. Foi introduzido nos Estados Unidos no início dos anos 70 para

desidratação de lodos e tornou-se um dos dispositivos predominantes nesse campo, devido à sua eficácia para a maioria dos tipos de lodos de esgotos.

A desidratação do lodo no filtro prensa de esteira pode ser dividida em três processos básicos: o condicionamento químico do lodo de alimentação, a drenagem por ação da gravidade até uma consistência não fluida e a compactação mecânica. A Figura 3.3 apresenta um esquema simplificado de um filtro prensa de esteira.

O condicionamento químico é feito por adição de um polímero para floculação do lodo antes da alimentação da máquina. Em seguida, o lodo é distribuído sobre a superfície da esteira, onde ocorre a drenagem de uma grande parte da água livre. Uma possível sofisticação para essa parte do processo é a introdução de um vácuo na drenagem, provocando uma sucção da água livre, aumentando assim a eficiência do processo.

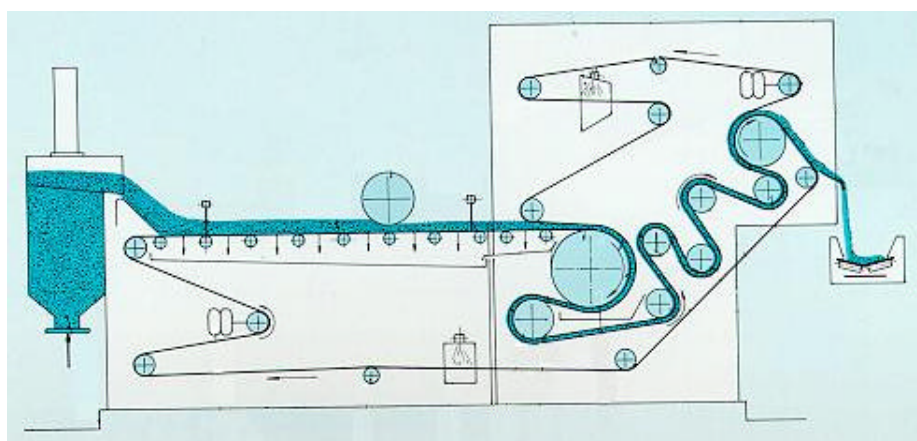


Figura 3.3 - Esquema típico de um filtro prensa de esteira.

Fonte: Catálogo da Degremont (1995).

Na fase seguinte, a da compressão, o lodo adensado é introduzido entre duas esteiras porosas, que se movimentam através de uma série de rolos, entre os quais é prensado. A torta de lodo desidratada final é removida das esteiras por pás raspadoras.

Um sistema típico de filtro prensa de esteira consiste de: bombas de alimentação de lodo, equipamento de alimentação de polímero, tanque de condicionamento de lodo (floculador), esteira de filtro prensa, transportador de torta de lodo e unidades de apoio (bombas de água de lavagem e compressor de ar).

O desempenho do filtro prensa de esteira pode ser afetado por diversos fatores como: características do lodo; método e tipo de condicionamento químico; pressões desenvolvidas e configurações da máquina, tais como a porosidade, a velocidade e a largura da esteira. Grandes variações nas características do lodo provocam sensível redução na eficiência do processo. Em instalações onde o lodo está sujeito a variações de características, deve ser incluída uma operação de mistura de lodo antes do condicionamento. Embora existam variações de desempenho devido às características do lodo, afetando a capacidade de desidratação, os filtros prensa de esteira podem produzir tortas desidratadas com teor de sólidos de 20 a 30%, com eficiência de separação de sólidos de 80 a 95% (WEF, 1992).

### **Filtro prensa de placas**

O filtro prensa de placas consiste de uma série de placas retangulares, com cavidades em ambos os lados que, ao serem juntadas, deixam um espaço entre duas placas consecutivas, formando uma câmara para alojar as telas de filtragem, onde o lodo é introduzido e prensado. A Figura 3.4 mostra esquematicamente a parte interna de um filtro prensa de placas.

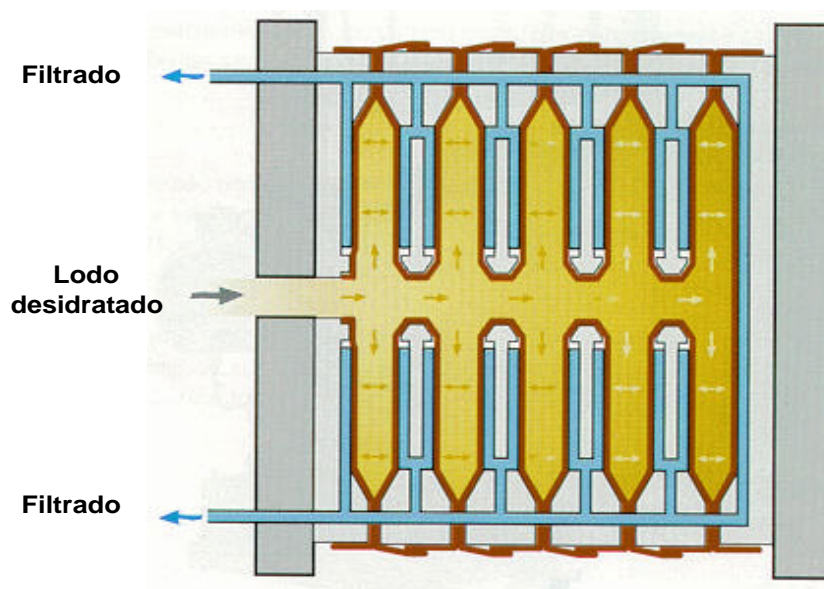


Figura 3.4 – Esquema de funcionamento do filtro prensa de placas.

Fonte: Catálogo da Netzsch (1999).

O lodo, previamente condicionado, é bombeado através dos orifícios de alimentação para dentro das câmaras, que estão alojadas entre as placas ao longo de todo o conjunto.

A suspensão sob pressão flui contra os elementos filtrantes permeáveis, que só permitem a passagem dos líquidos, retendo os sólidos. À medida que o interior da câmara vai sendo preenchido, a pressão vai sendo gradualmente aumentada e a torta vai sendo formada a partir da superfície de contato com a tela. Nessa filtração, os sólidos retidos formam continuamente uma torta sobre os elementos filtrantes. A fase líquida da suspensão continua fluindo através das placas e será extraída como filtrado isento de sólidos. Os elementos filtrantes e a torta formam uma resistência contra o fluxo. À medida que aumenta a espessura da torta em formação, a resistência ao fluxo aumenta ainda mais, havendo necessidade de mais pressão para vencer a resistência adicional, gerada com o acúmulo dos sólidos. A Figura 3.5 mostra esquematicamente um filtro prensa de placas.

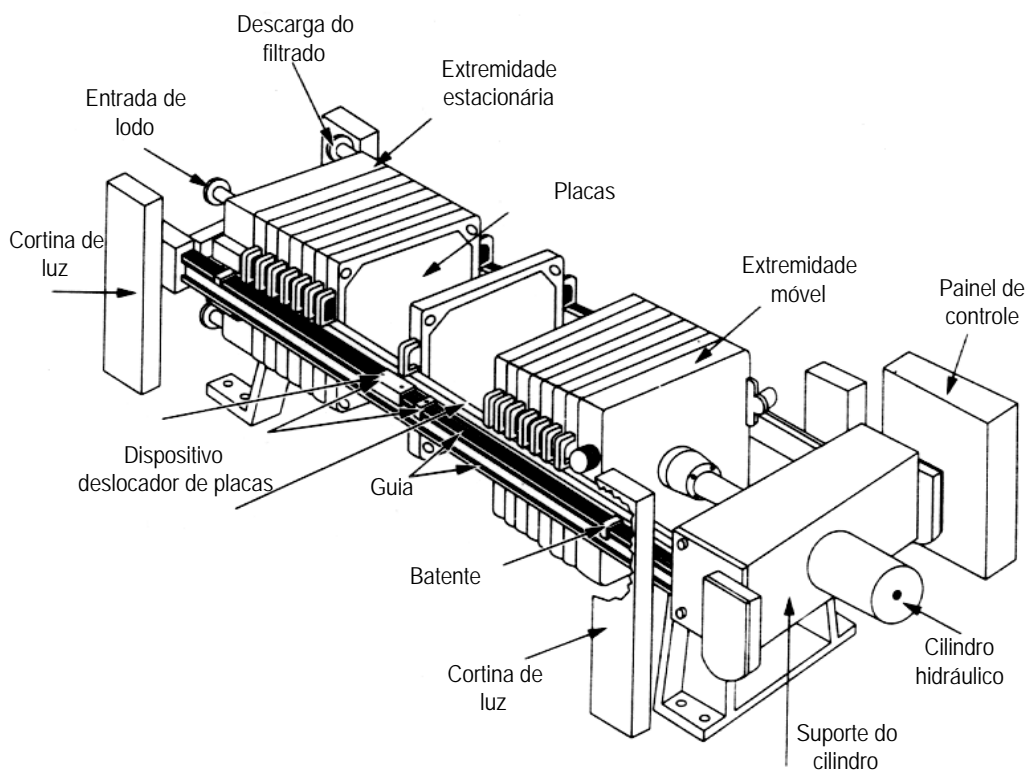


Figura 3.5 - Filtro prensa de placas. Fonte: METCALF & EDDY (1991).

O líquido filtrado escorre sobre as superfícies das placas até os canais de filtragem. Destes, é recolhido em tubulações e recirculado no processo. As tortas formadas são removidas com a abertura das placas no final do ciclo de trabalho, quebradas em partes menores ao caírem sobre lâminas e descarregadas em esteiras transportadoras.

A espessura da torta de lodo é de cerca de 25 a 40 mm e o teor de umidade varia de 48 a 70 %. O tempo do ciclo de filtração varia de 2 a 5 horas e inclui o tempo necessário para encher as câmaras, mantê-las sob pressão, abri-las e retirar as tortas, lavar as câmaras e fechar novamente as placas.

### **3.1.8 Produção de biogás em digestores anaeróbios**

A geração de biogás nos digestores é um resultado direto da destruição dos sólidos voláteis pelos microrganismos metanogênicos. Devido a essa estrita relação entre a produção de gás e a destruição de sólidos, a produção de gás é melhor expressa em termos de volume de gás produzido por unidade de sólidos destruído. Esse parâmetro, chamado produção específica de gás, é comumente expresso em metros cúbicos de gás produzido por quilograma de sólidos voláteis destruído. Para o processo de digestão anaeróbia, a produção específica de biogás é normalmente da ordem de 1 metro cúbico de gás nas condições normais de pressão e temperatura por quilograma de sólido suspenso volátil destruído. Segundo METCALF & EDDY (1991), a produção de biogás é de 0,75 a 1,12 m<sup>3</sup>/kgSSV destruído. Nesse processo, a destruição de SSV é da ordem de 30 a 50%.

Em termos genéricos, uma amostra de 100 kg de lodo bruto contendo 70 kg de sólidos voláteis e 30 kg de sólidos fixos, após a digestão anaeróbia, será transformada em aproximadamente 30 kg de biogás, 40 kg de sólidos voláteis e 30 kg de sólidos fixos que não sofrem nenhuma alteração.

O biogás produzido em uma ETE é constituído basicamente de metano, em torno de 60 a 70%; gás carbônico, 25 a 30%; e pequenas quantidades de hidrogênio, nitrogênio e gás sulfídrico. O poder calorífico do biogás situa-se entre 21000 e 25000 kJ/m<sup>3</sup>, conforme QASIN (1985), o que o torna de grande interesse para

aproveitamento em processos que necessitam o uso de energia como aquecimento de digestores ou secagem térmica.

### **3.1.9 Características de lodos desidratados**

As características físicas, químicas e biológicas dos lodos gerados em ETEs podem ser muito variadas. Dependem do tipo de esgoto afluente, dos processos de tratamento empregados e dos produtos químicos utilizados. Na fase de definição dos processos de tratamento e de disposição final, é importante considerar os fatores que serão constituintes do biossólido final. Dentre esses fatores pode-se destacar:

- quantidade de matéria orgânica;
- teor de nutrientes;
- quantidade de organismos patogênicos;
- teor de metais pesados.

A concentração de matéria orgânica pode variar bastante, dependendo do processo de tratamento do biossólido. TSUTIYA (2001) apresenta dados de várias estações de tratamento de esgotos da Sabesp, nas quais a concentração de matéria orgânica varia de 41 a 71%.

O lodo de esgotos contém os macronutrientes: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Contém, também, os micronutrientes: cobre, ferro, zinco, manganês, boro, molibdênio e cloro. A quantidade de nutrientes do lodo é, normalmente, menor que a encontrada em fertilizantes comerciais, mesmo assim, essa quantidade ainda tem um valor agrícola significativo.

O lodo gerado no processo de tratamento de esgoto contém bactérias, vírus, protozoários e outros microrganismos patogênicos. O lodo bruto, não digerido, não é adequado para fins agrícolas. Para utilização agrícola, o lodo deve ser estabilizado química ou biologicamente e, de preferência, seco termicamente. Recomenda-se que o lodo bruto, não digerido, não seja utilizado para fins agrícolas.

A presença de metais pesados está, em geral, associada à presença de despejos industriais no esgoto. Os metais pesados em grandes concentrações, principalmente: arsênio, cádmio, chumbo, cobre, mercúrio, molibdênio, níquel, selênio e zinco, são



componentes perigosos do lodo, pois inibem o tratamento biológico e são tóxicos às plantas, aos animais e ao homem. Entretanto, em baixas concentrações, a presença de alguns deles, como: cobre, molibdênio e zinco, pode ser favorável, servindo como micronutrientes para as plantas. Uma composição típica do lodo bruto e digerido, conforme METCALF & EDDY (1991), é apresentada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Composição típica de lodo bruto e digerido.

Parâmetro	Lodo Bruto		Lodo Digerido	
	variação	valor típico	variação	valor típico
Sólidos secos totais - ST,(%)	2 - 8	5	6 - 12	10
Sólidos voláteis (% do ST)	60 - 80	65	30 - 60	40
Graxas e gorduras solúveis (% do ST)	6 - 30	-	5 - 20	18
Proteínas (% do ST)	20 - 30	25	15 - 20	18
Nitrogênio - N, (% do ST)	1,5 - 4,0	2,5	1,6 - 6,0	3,0
Fósforo - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (% do ST)	0,8 - 2,8	1,6	1,5 - 4,0	2,5
Potássio - K <sub>2</sub> O, (% do ST)	0,0 - 1,0	0,4	0,0 - 3,0	1,0
Celulose (% do ST)	8 - 15	10	8 - 15	10
Sílica - SiO <sub>2</sub> (% do ST)	15 - 20	-	10 - 20	-
pH	5,0 - 8,0	6,0	6,5 - 7,5	7,0

Fonte: Adaptado de METCALF & EDDY (1991).

As medidas de pH, alcalinidade e ácidos orgânicos são importantes no controle de processo da digestão anaeróbia. Os teores de metais pesados, pesticidas e hidrocarbonetos têm sido determinados quando se considera os processos de incineração e aplicação no solo (TSUTIYA, 1999a).

Nas ETEs operadas pela Sabesp, na RMSp, têm-se observado valores diferentes daqueles apresentados por METCALF & EDDY (1991), principalmente quanto aos

teores de sólidos, cujos valores situam-se em torno de 4% para lodo bruto e 3% para lodo digerido.

As concentrações de metais pesados nos lodos produzidos nas ETEs da RMSP variam pouco de uma para outra. O motivo pode ser atribuído às diferenças nas características dos esgotos. A Tabela 3.5 apresenta as concentrações de metais pesados nos lodos das ETEs Barueri, Suzano e ABC, cujos valores referem-se à média das análises efetuadas pelos laboratórios das próprias ETEs, no período compreendido entre outubro de 2000 e setembro de 2001.

Tabela 3.5 – Concentração de metais pesados em lodos de ETEs da RMSP.

Metal	Concentração (mg/kg lodo em base seca)		
	ETE Barueri	ETE Suzano	ETE ABC
Cádmio	11	47	11
Chumbo	181	367	272
Cobre	654	879	907
Níquel	345	271	213
Zinco	2287	4706	3320
Cromo	557	436	489

Fonte: SABESP (Valores médios de outubro de 2000 a setembro de 2001)

O condicionamento químico do lodo na ETE Barueri é feito com utilização de polímero e nas ETEs Suzano e ABC com utilização de cal e cloreto férrico. Os componentes: arsênio, mercúrio, molibdênio e selênio, que também são parâmetros de controle das normas CETESB P 4.230 e EPA 503, não são rotineiramente medidos nos laboratórios das ETEs da RMSP, entretanto, estes laboratórios estão se adaptando, também, para essas análises.

## 3.2 Fundamentos de secagem térmica

### 3.2.1 Generalidades

Secagem térmica é a operação destinada à remoção de um líquido agregado a um sólido, para um meio gasoso insaturado através da vaporização térmica. Nesse processo, a vaporização ocorre em uma temperatura inferior àquela de ebulição do líquido na pressão do sistema.

O meio gasoso, também chamado meio de secagem ou meio de seca, que pode ser: ar, vapor, gases de combustão, ou uma composição destes, deve ser insaturado para poder absorver a umidade contida no sólido na forma de vapor.

O material submetido ao processo de secagem pode ser um sólido com forma definida, uma pasta, ou ainda, uma suspensão de sólidos. Em qualquer situação, o produto final será um sólido com alguma umidade.

Os métodos mecânicos de separação entre um sólido e um líquido, como prensagem, filtração ou centrifugação, devem ser considerados como desaguamento, reservando-se o termo secagem para os processos que envolvem a separação do líquido de um sólido por evaporação.

### 3.2.2 Terminologia

Os termos e definições mais comuns, normalmente empregados em secagem, conforme PERRY (1973), FOUST (1980) e MCCABE (1985) são os seguintes:

Umidade absoluta (W): é a massa de vapor de água contida no ar associada à massa de ar seco. Em outras palavras, pode-se dizer que é a massa de água contida em uma quantidade de ar, medido em base seca. Usualmente, a umidade absoluta é dada em gramas de água por quilograma de ar seco.

Umidade relativa (Wr): é a razão entre a pressão parcial de vapor de água contida no ar e a pressão de vapor da água à temperatura do ar.

Ponto de orvalho (Po): também chamado de temperatura de saturação, é a temperatura na qual uma dada mistura de vapor de água e ar se torna saturada. Em outras palavras, é a temperatura na qual a água exerce uma pressão de vapor igual à pressão parcial do vapor de água na mistura.

Temperatura de bulbo úmido (Tu): é a temperatura de equilíbrio dinâmico que uma superfície de água atinge, quando a taxa de transferência de calor para a superfície, por convecção, iguala-se ao consumo de calor, por transferência de massa, da superfície para o ambiente.

Temperatura de bulbo seco (T): é a temperatura da mistura de ar e vapor.

Água ligada: é a água associada ao sólido, cuja pressão de vapor é menor que a da água pura na mesma temperatura.

Água não ligada: é a água associada ao sólido, cuja pressão de vapor é maior que a da água pura na mesma temperatura.

Umidade livre: é a umidade que pode ser retirada do sólido na condição de umidade relativa do ambiente onde se encontra o sólido.

Difusão interna: é o movimento de líquido ou de vapor através de um sólido, em consequência de diferenças de concentração.

Escoamento capilar: é o escoamento de um líquido através dos interstícios de um sólido ou sobre a sua superfície, provocado por atração molecular entre o líquido e o sólido.

Estado funicular: é o estado durante a secagem de um sólido poroso, em que a sucção capilar leva à penetração de ar nos poros.

Estado pendular: é o estado de um líquido num sólido poroso, quando não existe mais uma película líquida em torno das partículas ou entre elas, de modo a não mais ocorrer o escoamento capilar. Este estado sucede o estado funicular.

Teor de umidade crítico: é o teor de umidade médio de um sólido ao término do período de secagem à velocidade constante.

Substância higroscópica: é a substância que pode conter umidade ligada.

Substância não higroscópica: é a substância que não pode conter umidade ligada.

Atividade de água: é a razão entre a pressão parcial de vapor de água contida no material sólido úmido e a pressão de vapor da água pura, à mesma temperatura.

### 3.2.3 Umidade de um sólido

A umidade de um sólido refere-se à quantidade de água a ele associada, seja na forma ligada ou livre. Pode ser expressa em termos de quantidade total (base úmida) ou apenas em termos de sólido seco (base seca).

Define-se umidade de um sólido na base seca ( $W_d$ ) como o quociente entre a massa de água nele contida ( $Ma$ ) e a massa do sólido isento dessa água ( $Md$ ).

$$W_d = \frac{Ma}{Md} \quad (3.1)$$

$W_d$  pode ser expresso em kg de água por kg de sólido seco.

Define-se umidade de um sólido na base úmida ( $W_w$ ) como o quociente entre a massa de água nele contida ( $Ma$ ) e a massa de sólido úmido ( $Ma + Md$ ).

$$W_w = \frac{Ma}{Ma + Md} \quad (3.2)$$

$W_w$  pode ser expresso em kg de água por kg de sólido úmido.

Inversamente à umidade, pode-se definir o teor de sólidos (TS) como sendo a relação entre a massa de sólido seco ( $Md$ ) e a massa do sólido úmido ( $Ma + Md$ ).

$$TS = \frac{Md}{Ma + Md} \quad (3.3)$$

Ao se expressar um valor para a umidade de um sólido, é importante deixar claro se o número refere-se à base seca ou úmida. A negligência dessa informação pode levar a um erro muito grande.

A transformação da umidade de uma base para a outra pode ser feita pelas seguintes equações:

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (3.4)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (3.5)$$

$$W_d = \frac{1}{TS} - 1 \quad (3.6)$$

$$W_w = 1 - TS \quad (3.7)$$

As grandezas  $W_w$  e  $TS$ , conforme apresentadas nas equações 3.2 e 3.3, podem assumir valores entre 0 e 1. Todos podem, também, ser representados em porcentagem, bastando para isso, multiplicá-los por 100.

#### 3.2.4 Condição de equilíbrio de um sólido úmido com o meio de secagem

Um sólido, com uma certa umidade ( $W_d$ ), colocado no interior de um meio de secagem composto por um gás em condições constantes de temperatura ( $T$ ), pressão ( $p$ ) e umidade relativa ( $W_r$ ), evoluirá, ao longo do tempo, para uma condição de equilíbrio térmico com o meio, apresentando uma umidade ( $W_{de}$ ), que pode ser maior ou menor que a umidade inicial. Essa umidade é denominada umidade de equilíbrio do sólido para as condições do meio de secagem.

Para PERRY (1973), a umidade em equilíbrio pode estar adsorvida como uma película superficial ou condensada nos capilares finos do sólido à pressão reduzida e sua concentração será dependente da temperatura e umidade do ar ambiente. No

entanto, em temperaturas baixas, na faixa de 15 a 50°C, os valores assumidos pela umidade de equilíbrio contra a umidade relativa são essencialmente independentes da temperatura.

O teor de umidade no equilíbrio depende essencialmente da natureza do sólido. No caso de sólidos não porosos, ou de sólidos não higroscópicos, o teor de umidade no equilíbrio é praticamente igual a zero em todas as temperaturas e umidades. No caso de materiais orgânicos como a madeira, o papel e o sabão, o teor de umidade no equilíbrio varia regularmente numa ampla faixa à medida que a temperatura e a umidade variam.

Nas operações de secagem térmica é muito importante conhecer a umidade de equilíbrio, pois esta constitui o teor de umidade limite em dadas condições de temperatura e umidade do ar ambiente. Se o sólido em processo de secagem deixar o secador com uma umidade abaixo de sua umidade de equilíbrio com o local onde será armazenado, acabará por incorporar a umidade do ambiente durante sua permanência, até atingir a umidade de equilíbrio nas condições do ar do ambiente de armazenagem, a menos que se tome precauções especiais. Neste caso, pode-se dizer que teria sido gasto na operação de secagem mais energia e tempo de permanência do que o necessário, o que significa maiores custos e menores capacidades de produção.

O teor de umidade de equilíbrio ( $W_{de}$ ) é definido como a umidade que o material atinge, quando submetido, por tempo suficientemente longo, à determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição, a pressão de vapor da água na superfície do sólido é igual à pressão de vapor da água contida no ar (PACHECO, 1995).

Mantendo-se a temperatura do sistema e variando-se a umidade relativa do ar, obtêm-se valores diferentes para a umidade de equilíbrio. O conjunto de pontos de umidade de equilíbrio em diferentes umidades relativas do ar é denominado de isoterma de equilíbrio. A Figura 3.6 representa de forma esquemática uma isoterma de equilíbrio. Na ordenada, são colocados os valores de umidade do sólido ( $W_d$ ) e, na abscissa, os valores de umidade relativa do ar ambiente que envolve o sólido. Da

curva isoterma de equilíbrio, pode-se extrair alguns conceitos importantes para a secagem térmica, conforme FOUST (1980), que são apresentados a seguir.

Considerando-se um processo de secagem de um sólido com umidade inicial  $Wd(A)$ , em um meio de secagem com umidade relativa constante, ao atingir o ponto de equilíbrio, sua umidade será  $Wd(C)$ . À medida que o sólido for perdendo água, seu teor de umidade vai se aproximando daquela do ponto B. Nesse trecho AB, a vaporização ocorre como se o sólido não existisse, mas sim um corpo formado apenas por água. A pressão de vapor da água contida no sólido nesse trecho é igual àquela da água pura. A umidade correspondente a esse trecho é denominada Água Não Ligada (PACHECO, 1995).

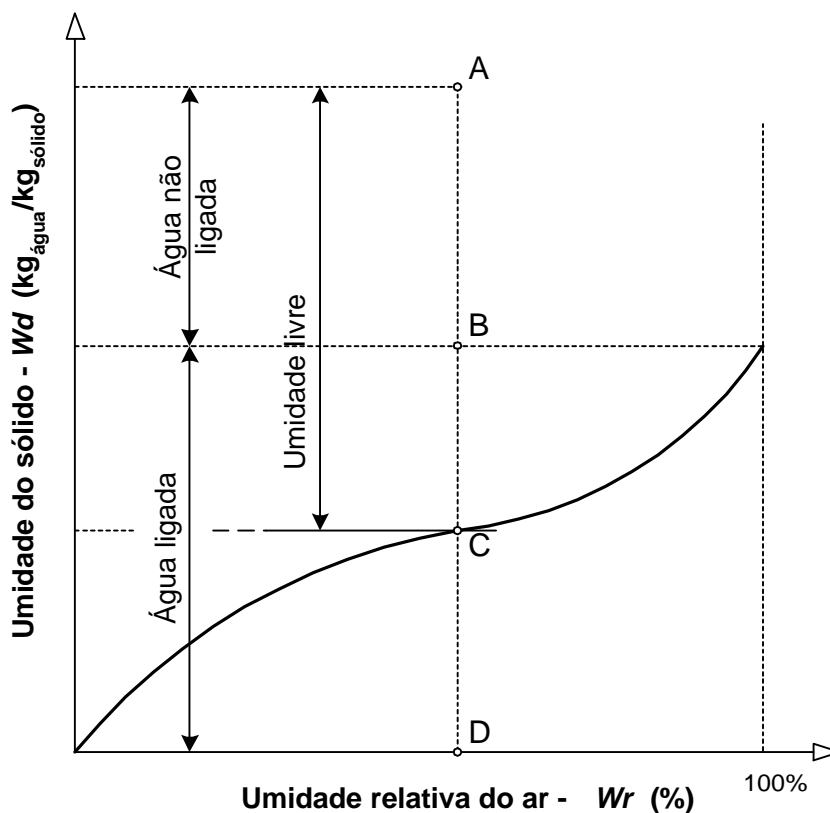


Figura 3.6 – Curva de umidade de equilíbrio.

Fonte: PACHECO (1995).

No ponto B, a umidade é igual àquela de equilíbrio do sólido com ar saturado e, é a menor umidade que o sólido pode conter exercendo uma pressão de vapor igual àquela da água pura. Abaixo do ponto B e até o ponto D, a umidade exerce diferentes



pressões de vapor, todas menores do que a pressão de vapor da água pura para a temperatura do sistema. Essa umidade é denominada de Água Ligada.

Muitos motivos, ligados à natureza e forma do material sólido, podem levar uma porção de água a tornar-se ligada ou não. Dependendo deles, a água pode ficar retida em pequenos capilares, sujeitos a fortes efeitos de tensão superficial, ser constituinte de uma solução celular ou fazer parte de uma solução homogênea através de todo o sólido ou, mesmo, pertencer a uma parede fibrosa.

Desta forma, o processo de secagem, considerado na Figura 3.6, deve ser interrompido no ponto C, que representa a umidade de equilíbrio ( $Wde$ ) para a condição considerada. A umidade que pode ser retirada de um sólido na condição apresentada é denominada Umidade Livre  $W$  (equação 3.8) e pode ser composta por água ligada e não ligada (FOUST, 1980).

$$W = Wd - Wde \quad (3.8)$$

Fica evidenciada, portanto, a importância de se definir no processo de secagem quais são os limites de umidade em que o material seca. Se o ponto final da secagem puder ocorrer com o sólido ainda contendo apenas água não ligada, esta secagem gastará menos tempo do que outra que, embora venha retirar a mesma quantidade de água, se processa em uma faixa de umidade com água ligada (PACHECO, 1995).

A quantidade de água retida em um sólido, em equilíbrio com o meio que o envolve, depende da estrutura do sólido, da temperatura do ambiente e da umidade relativa do ar. Cada material possui características próprias quanto ao equilíbrio de umidade. A Figura 3.7, extraída de FOUST (1980), apresenta as curvas típicas de umidade de equilíbrio dos materiais nela relacionados, cujos dados são válidos para o equilíbrio entre a umidade retida nos sólidos em contato com ar úmido.

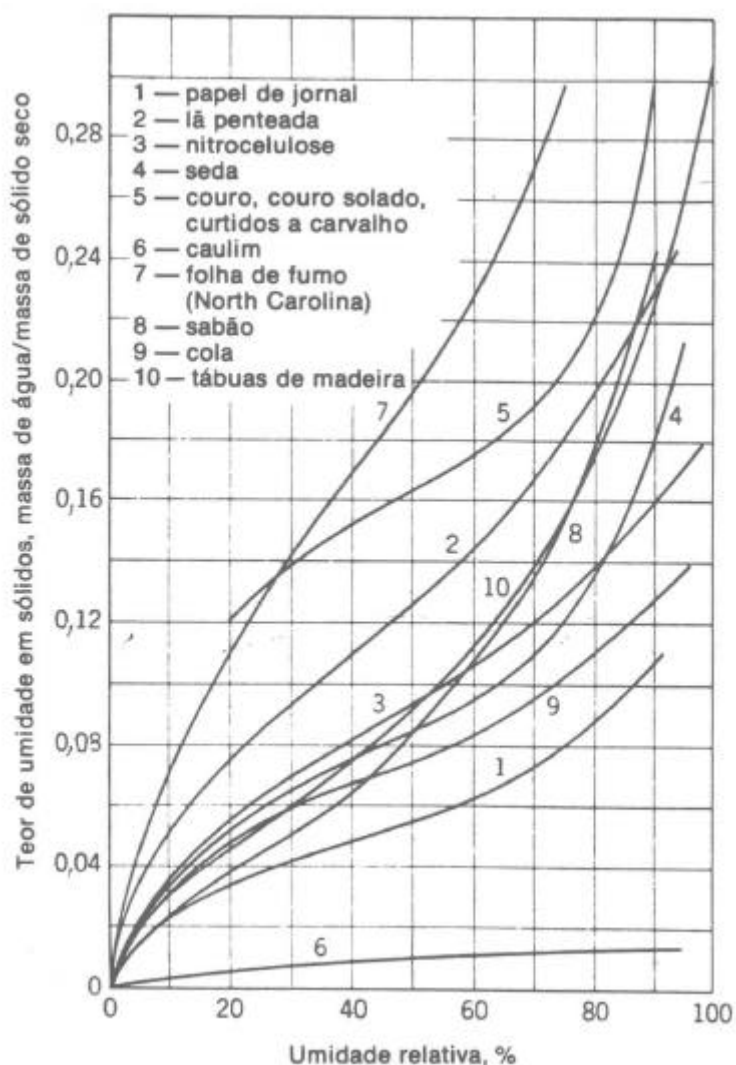


Figura 3.7 – Curvas de umidade de equilíbrio de vários materiais.

Fonte: FOUST (1980).

Outro fator de importância fundamental na questão da secagem é quanto ao material ser poroso ou não. Um sólido higroscópico e poroso é constituído por uma rede de capilares de pequenos diâmetros, nos quais, os efeitos de tensão superficial são bastante pronunciados. A secagem desses materiais é bastante complexa. Alguns exemplos dessa categoria são a madeira, o papel e a alumina (PACHECO, 1995).

Um sólido higroscópico não poroso apresenta a umidade distribuída em seu interior, com possibilidade de movimentação através de mecanismos de difusão, originados por diferenças de concentração de umidade no seu interior. A secagem é complexa,

porém com certo entendimento do fenômeno. Alguns exemplos dessa categoria de materiais são a argila, o sabão e a cola.

Um sólido não higroscópico e poroso é constituído por uma rede de capilares de diâmetros tais que, apesar da movimentação ocorrer por capilaridade, a pressão de vapor é praticamente a da água pura. Uma camada de areia ou de caulim em leito são exemplos típicos destes materiais.

Finalmente, um material não higroscópico e não poroso é aquele que apresenta apenas umidade na superfície, não sendo importantes para estudos de secagem, pois é como evaporar água pura (PACHECO, 1995).

### **3.2.5 Determinação da umidade de equilíbrio**

Para ROSSI (1980), a determinação da umidade de equilíbrio pode ser realizada pelos seguintes métodos:

- a) soluções aquosas saturadas de vários sais;
- b) soluções aquosas de diferentes concentrações de ácidos;
- c) métodos mecânicos.

Nos dois primeiros métodos (a e b), utiliza-se vários recipientes herméticos contendo soluções saturadas de sais ou ácidos em certas concentrações, para se obter determinados valores de umidades relativas do ar no recipiente. A temperatura ambiente deve ser mantida constante pois há variações, embora pequenas, nas isotermas de uma temperatura para outra.

O terceiro método (c), consiste em movimentar o ar em condições de umidade e temperatura controladas através do produto até que se atinja o equilíbrio. As condições de umidade e temperatura são obtidas por meio de aquecimento por resistências elétricas, injeção de vapor e pulverização de água.

Nos três métodos citados, quando a pressão de vapor da água contida no ar for maior que a pressão de vapor da água contida no produto, este último retira água do ar até ocorrer o equilíbrio das pressões de vapor. Este processo é denominado sorção. Em

caso contrário, quando a pressão de vapor da água contida no ar for menor que a do produto, este cede água ao ar. Este processo é denominado desorção.

As curvas de umidade de equilíbrio para os processos de sorção e desorção de umidade são em geral ligeiramente diferentes, devido a um efeito de histerese. O formato dessa curva está apresentado na Figura 3.8, onde  $Wd$  representa o teor de umidade do sólido em massa de água por massa de sólido seco e  $Wr$  representa a umidade relativa do ar ambiente em porcentagem.

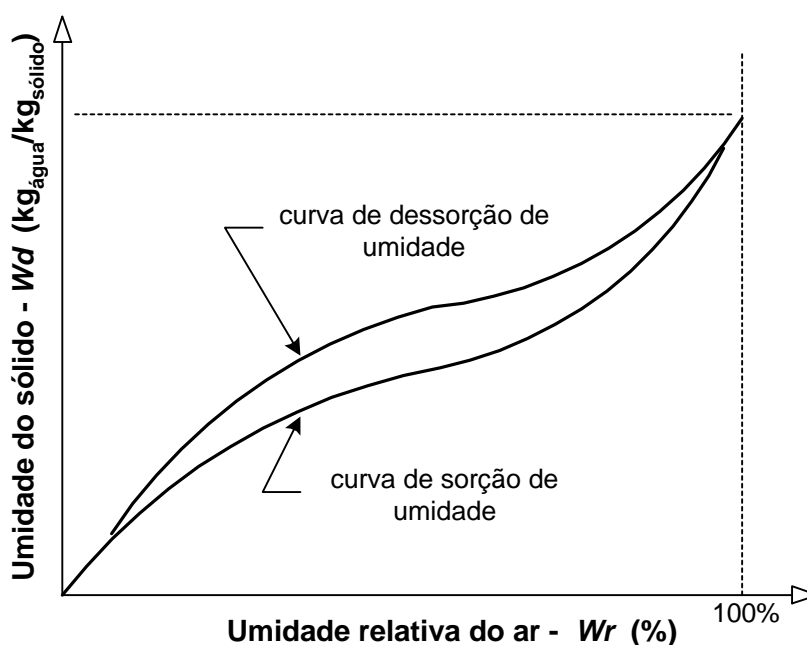


Figura 3.8 – Curvas de sorção e dessorção de umidade.

Fonte: Adaptado de FOUST (1980).

Os métodos (a) e (b), mencionados anteriormente, são as formas mais simples de se construir uma curva isoterma de sorção (umidade de equilíbrio). Consiste em colocar-se amostras do material, inicialmente seco, dentro de câmaras com umidade controlada a uma temperatura constante e medir-se o ganho de massa das amostras, até que o equilíbrio tenha sido atingido. O mesmo pode ser feito para a isoterma de desorção, colocando-se as amostras de material úmido e medindo-se a perda de massa, até que o equilíbrio seja atingido.

As soluções saturadas de sais são consideradas as mais adequadas, pois podem liberar ou sorver água sem sofrerem alteração significativa de suas atividades de água. Para STOLOFF (1978), deve-se selecionar pelo menos cinco sais da lista apresentada na Tabela 3.6, cujas atividades de água estejam dentro da faixa de interesse para a verificação da umidade de equilíbrio. A atividade de água de uma solução de sal é a relação entre a pressão de vapor da solução e a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura.

Tabela 3.6 – Atividade de água de referência para sais a 25°C.

Sal	Atividade de água	Sal	Atividade de água
MgCl <sub>2</sub>	0,328	NaCl	0,753
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0,432	KBr	0,809
MgNO <sub>3</sub>	0,529	KCl	0,843
NaBr	0,576	Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0,851
CoCl <sub>2</sub>	0,649	BaCl <sub>2</sub>	0,902
SrCl <sub>2</sub>	0,709	KNO <sub>3</sub>	0,936
NaNO <sub>3</sub>	0,743	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,973

Fonte: Adaptado de STOLOFF (1978).

Cuidados especiais são recomendados no preparo das soluções saturadas. LABUZA (1984) recomenda que o sal e a água sejam puros e a mistura seja feita em recipiente limpo. Algumas soluções são muito cáusticas, tais como o cloreto de potássio e o dicromato de potássio; outras são altamente tóxicas como o nitrito de sódio, o brometo de potássio, o cromato de potássio e o cloreto de lítio. Todas elas devem ser manipuladas com muito cuidado.

A solução deve ser uma pasta contendo um excesso de cristais. Esta deve cobrir todo o fundo do recipiente e os cristais não podem estar acima da camada de líquido, que por sua vez não deve ter espessura maior que 2 milímetros. A solução deve ser preparada numa temperatura igual ou maior que a do levantamento da isoterma, pois a solubilidade de muitos sais aumenta significativamente com a temperatura e uma

solução aparentemente saturada pode ter sua umidade de equilíbrio alterada com o aumento da temperatura.

SPIESS e WOLF (1987) prepararam uma lista com as quantidades de sal e água destilada que devem ser misturadas para obter uma solução supersaturada a 25°C. Essa lista está apresentada na Tabela 3.7, que também contém os valores das umidades relativas de equilíbrio proporcionadas pelos sais.

Segundo esses autores, depois de realizada a mistura, o recipiente deve ser fechado e deixado por uma semana, agitando-se a solução uma vez por dia. Entretanto, para um período de exposição prolongado, a solução pode ser utilizada assim que estiver pronta e pode ser utilizada indefinidamente para a maioria dos sais, desde que devidamente guardada de forma a evitar perda substancial de umidade por evaporação. O sal deve ser colocado no fundo do recipiente numa camada de aproximadamente 1,5 a 4 cm. A água deve ser acrescentada aos poucos e a solução agitada constantemente, até que haja uma fina camada de líquido acima da camada do sal.

Tabela 3.7 – Preparação de soluções saturadas de sais a 25°C.

Sal	Umidade relativa (%)	Quantidades	
		Sal (g)	Água (mL)
LiCl	11,15	150	85
CH <sub>3</sub> COOK	22,60	200	65
MgCl <sub>2</sub>	32,73	200	25
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43,80	200	90
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	52,86	200	30
NaBr	57,70	200	80
SrCl <sub>2</sub>	70,83	200	50
NaCl	75,32	200	60
KCl	84,32	200	80
BaCl <sub>2</sub>	90,26	250	70

Fonte: Adaptado de SPIESS e WOLF (1987).

### 3.2.6 Secagem sob condições constantes do meio de seca

Os conceitos mencionados nos itens anteriores, extraídos de PERRY (1973), FOUST (1980) e MCCABE (1985), são relativos a um sistema composto por um sólido úmido em equilíbrio com um meio de secagem em temperatura e umidade determinados. Entretanto, para que a secagem ocorra, esse sistema não pode estar em equilíbrio. É necessário que o meio de secagem esteja a uma temperatura superior àquela do sólido úmido, permitindo a ocorrência de um fluxo de calor para o mesmo que possibilitará a vaporização da umidade.

Nas operações de secagem, observa-se que a temperatura e a umidade do ar de secagem variam no interior do equipamento, para a maioria dos secadores. Entretanto, para se estudar o fenômeno de secagem, torna-se muito esclarecedor analisar o processo sob condições em que o sólido úmido fica em contato com um meio de secagem com temperatura e umidade invariáveis ao longo do tempo. Essa situação é denominada de secagem sob condições constantes do meio de seca. Seu estudo pode ser realizado em pequena escala, com o auxílio de equipamentos e instrumentos que permitam secar o material, medir sua variação de massa ao longo do tempo e as características do meio de seca a montante e a jusante da região de secagem. Com isso, pode-se obter os conhecimentos fundamentais para a compreensão do fenômeno de secagem. A Figura 3.9 mostra um esquema representativo das condições desse estudo.

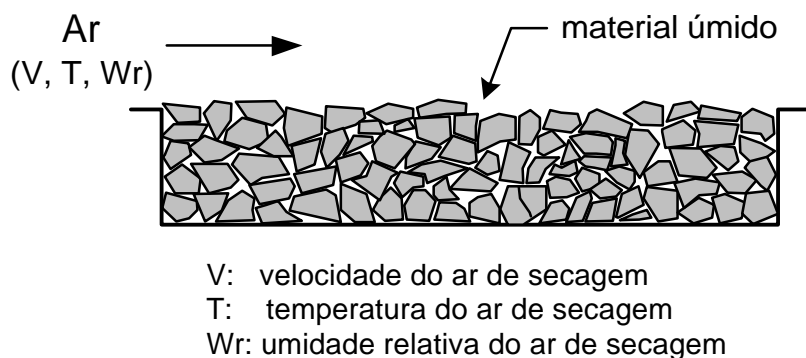


Figura 3.9 – Secagem sob condições constantes do meio de seca.

No esquema apresentado, o sólido úmido é exposto a uma corrente de ar com velocidade, temperatura e umidade relativa conhecidas. O sólido pode receber calor e perder umidade apenas pela face superior com área determinada. As faces laterais e a inferior são mantidas isoladas termicamente.

O início do processo em estudo se dá com o sólido na temperatura ambiente e com umidade livre inicial conhecida. A partir do instante de início e em instantes subsequentes, mede-se a massa do sólido em processo de secagem e determina-se a sua umidade livre, de maneira a obter-se uma tabela com os valores de massa e tempo para cada valor de velocidade, temperatura e umidade do meio de secagem. Com esses dados, constroi-se uma curva da variação da umidade em função do tempo. A Figura 3.10 apresenta uma curva típica de secagem em condições constantes do meio de seca.

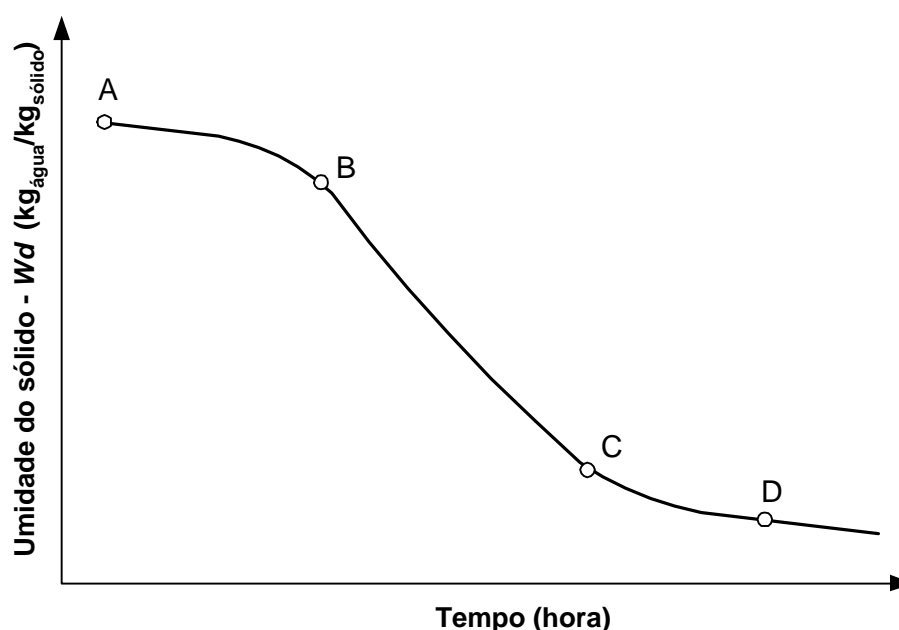


Figura 3.10 – Curva do teor de umidade em função do tempo de secagem.

Fonte: FOUST (1980).

O gráfico de teor de umidade em função do tempo, apresentado na Figura 3.10, é a forma que se obtém a partir dos dados de ensaios de secagem. Com esses resultados, pode-se calcular a velocidade de secagem em cada instante e representá-la em função do tempo, conforme apresentado na Figura 3.11. Pode-se, também, representar a



velocidade de secagem em função do teor de umidade do sólido para cada instante, que é um modo muito mais descritivo do processo. A Figura 3.11 mostra o formato típico dessa curva.

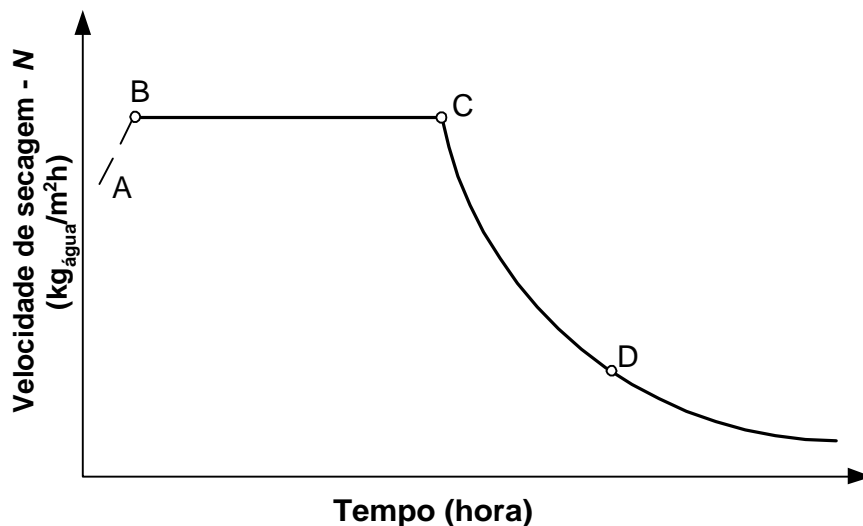


Figura 3.11 – Curva de velocidade de secagem em função do tempo.

Fonte: PERRY (1973).

A velocidade de secagem de um sólido é definida como o fluxo de massa de umidade que deixa o sólido por unidade de área de exposição ao meio de seca e por unidade de tempo. Pode ser expressa em kg de água/m<sup>2</sup>h e representada matematicamente pela equação:

$$N = \frac{Md}{A} \frac{dW}{dt} \quad (3.9)$$

Onde:

- $N$  = velocidade de secagem;
- $Md$  = massa do sólido em base seca;
- $A$  = área de exposição ao meio de seca;
- $W$  = umidade do sólido em base seca;
- $t$  = tempo.

A Figura 3.12 apresenta a forma típica da curva de velocidade de secagem em função do teor de umidade do sólido.

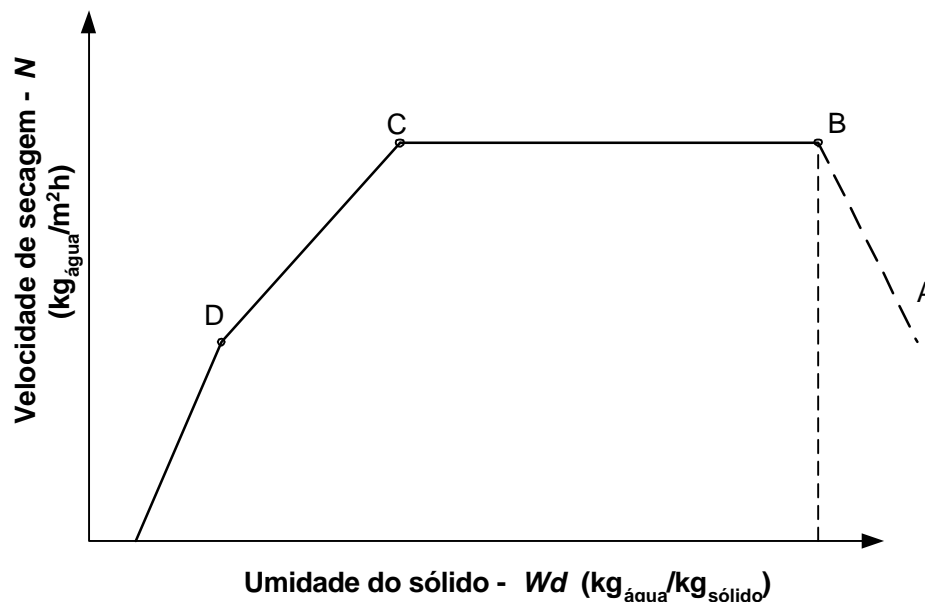


Figura 3.12 – Curva típica de velocidade de secagem em função da umidade do sólido. Fonte: PERRY (1973).

A observação dessa curva permite notar a existência de duas regiões bem distintas: a primeira, representada pelo trecho BC, parte plana da curva, refere-se ao período de secagem à taxa constante; e a segunda, parte inclinada, refere-se ao período de taxa decrescente. A região anterior ao ponto B, representada pela linha tracejada AB, não é propriamente um período de secagem. Trata-se da fase do processo na qual o material está sendo aquecido, até atingir o ponto onde começa efetivamente a evaporação da água em regime permanente. Esse tempo de aquecimento é normalmente curto, sendo que pouca umidade é removida no seu decorrer.

### 3.2.7 Período de velocidade de secagem constante

Conforme FOUST (1980), imediatamente após o contato entre o sólido úmido e o meio de secagem, a temperatura do sólido se ajusta até atingir um regime permanente. A temperatura do sólido e a velocidade de secagem podem aumentar ou diminuir para chegarem às condições do regime permanente, nas quais a temperatura

da superfície do sólido úmido é igual à temperatura de bulbo úmido do meio secante. As temperaturas no interior do sólido tendem a ser iguais à temperatura de bulbo úmido do gás, mas a concordância entre elas não é perfeita, em virtude das defasagens entre o movimento de massa e o de calor. Uma vez que as temperaturas do sólido também tenham atingido as temperaturas de bulbo úmido do gás, elas permanecem bastante estáveis e a taxa de secagem também permanece constante.

Durante o período de taxa de secagem constante, o sólido está com uma umidade tal que um filme de água permanece envolvendo toda a superfície de secagem e esta água atua como se o sólido não estivesse presente. O regime de secagem à taxa constante continua, com a massa de umidade removida da superfície sendo substituída pelo líquido, que vem do interior do sólido. Conforme FOUST (1980), o mecanismo do deslocamento do líquido e, por isso, a velocidade desse movimento, varia acentuadamente com a própria estrutura do sólido. Nos sólidos que têm espaços vazios e abertos relativamente grandes, o movimento será, possivelmente, controlado pela tensão superficial e pelas forças da gravidade no interior do sólido. Nos sólidos com estruturas fibrosas ou amorfas, o movimento do líquido ocorre por difusão através do sólido. Entretanto, nesse período, a velocidade de secagem independe do mecanismo interno de fluxo do líquido através do sólido. Conforme PERRY (1973), depende de três fatores externos, que são:

- coeficiente de transferência de calor e de massa;
- área da superfície exposta ao meio de secagem;
- diferença de temperatura e umidade entre o meio de secagem e a superfície úmida do sólido.

A velocidade de secagem nesta situação é totalmente controlada por essas condições externas. Nos equipamentos de secagem, aumentos na temperatura do ar de secagem ou em sua velocidade conduzem a um correspondente aumento na velocidade de secagem.

O valor de umidade que marca o final do período de velocidade de secagem constante é denominado de Umidade Crítica. Esse ponto assinala a situação em que a água superficial se torna insuficiente para manter um filme contínuo de água

cobrindo a área de secagem. A umidade crítica não deve ser confundida com a umidade de equilíbrio para o sólido em contato com um ar saturado, pois ocorre em situação de não equilíbrio e depende inclusive das condições de secagem não sendo uma propriedade do material.

### **3.2.8 Período de velocidade de secagem decrescente**

Conforme FOUST (1980), o período de secagem à taxa decrescente pode ser bem mais dilatado que o período à taxa constante, embora a remoção de umidade seja bem menor. A taxa de secagem aproxima-se de zero no teor de umidade de equilíbrio com o meio secante.

O formato da curva de velocidade de secagem no período de velocidade decrescente depende do tipo de material. Em qualquer caso, quem controla a velocidade de secagem são as condições internas ao sólido. As condições externas devem ser ajustadas de maneira a não provocar danos às características do material.

No caso de sólidos higroscópicos não porosos, o calor fornecido evapora primeiro a umidade superficial. A movimentação de umidade dentro do sólido se dá através de difusão no sentido de regiões mais úmidas, localizadas no interior do sólido para regiões menos úmidas, situadas na sua superfície. A resistência à transferência de umidade para o ar é desprezível em relação à resistência de movimentação da umidade no interior do sólido. Nesta situação, alterações na velocidade do ar de secagem não produzem qualquer variação na velocidade de secagem.

Os sólidos não higroscópicos porosos são compostos por uma rede de capilares de diferentes dimensões nas seções transversais, e as forças capilares são tão maiores quanto menores forem os raios dos capilares. Quando a água superficial se esgota, os capilares de maior diâmetro esvaziam-se primeiro, pois perdem água para o meio de seca e para os capilares de diâmetros menores, sendo a água substituída por ar. À medida que os poros forem se esvaziando, a superfície de evaporação recua para o interior do sólido e a área disponível para troca de massa diminui, embora a taxa de evaporação por unidade de área úmida se mantenha constante. Por isso, o primeiro trecho do período de velocidade decrescente é reto, já que o mecanismo é similar ao

do período de velocidade constante, porém com a área efetiva para a troca de massa diminuindo a cada momento e a velocidade de seca continuando a ser calculada com referência à área A, disponível para a troca de calor. Conforme PERRY (1973), esse estado, em que a água constitui a fase contínua e o ar a fase dispersa, é denominado por Estado Funicular.

Com o prosseguimento do processo de secagem, atinge-se uma situação em que a água deixa de ser fase contínua. Este fato é indicado na curva de velocidade de secagem pelo ponto D, denominado segundo ponto crítico. Esta situação, em que a água deixa de ser fase contínua, recebe o nome de Estado Pendular. A velocidade de secagem no Estado Pendular é independente da velocidade do ar, devendo o vapor difundir-se através do sólido e o calor deverá ser fornecido por condução a partir da superfície. A temperatura tende a aproximar-se da temperatura do ar de secagem.

Para um sólido higroscópico poroso, uma vez vaporizada a umidade superficial, tanto o Estado Funicular como o Estado Pendular são compostos por água ligada. A curva de velocidade de secagem, em sua fase decrescente, apresenta um aspecto que depende da natureza e forma do material sem indicar, contudo, um ponto crítico. Quando só houver água ligada, o mecanismo de movimentação da umidade assemelha-se bastante ao da difusão. Em geral, os mecanismos de secagem desses materiais são bastante complexos para uma maior generalização (FOUST, 1980).

### **3.2.9 Secagem sob condições variáveis**

A secagem sob condições variáveis é aquela encontrada na maioria dos secadores industriais. A temperatura e a umidade do meio não são constantes ao longo de todo o percurso do material dentro do equipamento. Os secadores de alimentação contínua, em geral, funcionam em regime permanente e as condições do meio de secagem variam, ponto a ponto no sistema, porém, são constantes ao longo do tempo em cada ponto (PACHECO, 1995).

Conforme FOUST (1980), a aplicação dos princípios básicos ao projeto ou escolha do equipamento de secagem nem sempre é direta. Além da dificuldade de previsão da curva de velocidade de secagem, surgem problemas sobre a variação das

condições de secagem ao longo do secador, sobre a diferença entre a área de transferência térmica e de transferência de massa, sobre a configuração do escoamento do gás e sobre o efeito das variáveis de operação. Deve-se levar em conta, também, o fator econômico habitual dos custos de processamento no que diz respeito às condições desejáveis do produto.

Por essas razões, a obtenção de dados para o projeto de um equipamento de secagem, para a escolha de um secador ou, mesmo, para a verificação do desempenho de um secador em operação, deve ser feita com a realização de ensaios com secadores em escala industrial, em condições semelhantes às da produção.

Nos ensaios com secadores industriais, pode-se obter resultados de desempenho global, que são usados para efetuar balanços térmicos, balanços de massas e conseqüentemente determinar as velocidades de secagem e os coeficientes globais de transferência de calor. Conforme PERRY (1973), os dados mínimos que devem ser obtidos para calcular o desempenho de um secador são:

- teor de umidade do sólido na entrada e na saída;
- temperatura do gás afluente e efluente;
- temperatura do material na entrada e na saída;
- taxa de alimentação;
- velocidade do gás;
- umidade do gás na entrada e na saída;
- tempo de retenção ou tempo de residência no secador;
- consumo de combustível.

Os resultados dos ensaios de secagem podem ser correlacionados empiricamente, em termos do coeficiente global de transferência de calor ou do comprimento da unidade de transferência, expressos em função das variáveis operacionais (PERRY, 1973).

Os fabricantes de secadores, em geral, possuem instalações de secagem em escala piloto, nas quais é possível secar amostras do material em diversas condições operacionais, com o propósito de encontrar a melhor combinação do tipo do equipamento, das condições de operação e das características finais do produto que se pretende secar.

### **3.3 Métodos de secagem térmica de lodos/biossólidos**

#### **3.3.1 Generalidades**

A separação entre as fases líquida e sólida nos processos de tratamento dos lodos gerados em ETEs é uma tarefa difícil e dispendiosa, comparada às demais operações do tratamento de esgotos. Os métodos mecânicos de separação entre líquido e sólido, comumente chamados de desidratação mecânica ou, ainda, desaguamento, podem ser feitos através de: filtros prensa, filtros prensa de esteira e centrifugadoras. Com esses processos, consegue-se obter teores de sólidos na faixa de 20 a 30%, podendo chegar a 40% com a utilização de cal na etapa de condicionamento.

A secagem térmica de lodos ou biossólidos é um processo de redução de umidade através da evaporação de água para um meio insaturado e, deste, para a atmosfera com a aplicação de energia térmica. É um processo de operação relativamente cara, pois além de envolver a utilização de combustível para a geração de calor, necessita de mão de obra especializada para manuseio e controle. Na secagem térmica o lodo é aquecido para promover a evaporação da água. Esse aquecimento é conduzido até um ponto inferior ao de destruição da matéria orgânica. Dessa forma, os sólidos totais presentes são mantidos praticamente inalterados, apenas a água é removida.

O objetivo principal da secagem térmica é a redução da quantidade de água presente na massa do lodo, com o propósito de diminuir o custo de transporte caso esse material necessite ser transportado para outro local. Com a secagem térmica pode-se obter teores de sólidos da ordem de 90 a 95% e, com isso, reduzir significativamente a massa final dos lodos gerados.

Outro objetivo, muito importante, da secagem térmica é a destruição dos organismos patogênicos, que se mantêm presentes nos lodos mesmo após os processos de estabilização. A secagem térmica constitui um processo de melhoria da qualidade do lodo/biossólido. Com a redução do volume e da umidade promove melhoria nas condições para armazenamento, embalagem e facilita a sua comercialização. É um processo definido pela Environment Protection Agency - EPA como PFRP

“Processes to Further Reduction Pathogens”, que pressupõe a eliminação de organismos patogênicos ao nível de detecção dos mesmos.

Os fatores de maior importância na secagem térmica do lodo, com o objetivo de aplicá-lo na agricultura, são a preservação da matéria orgânica nele existente e a destruição dos organismos patogênicos. O processo de secagem térmica pode, dessa forma, ser visto não apenas como uma etapa do tratamento dos lodos para disposição final, mas como um meio para fabricação de um produto: o biossólido para utilização na agricultura.

### **3.3.2 Associação água-sólidos no lodo**

A associação da água com o lodo, conforme descrito por GRANDIN (1992), teoricamente pode ser dividida em:

- água livre;
- água inter-flocos;
- água adsorvida nos flocos;
- água inter-partículas;
- água adsorvida nas partículas;
- água de partícula.

A água livre refere-se à parcela de água que fica separada quando os flocos de lodo de maior peso específico sofrem sedimentação ou adensamento devido à ação da força da gravidade após determinado tempo de repouso. A quantidade de água removida deste modo depende da fragilidade estrutural dos flocos e de suas características de sedimentação.

A água inter-flocos refere-se à parcela de água que permanece presa entre os flocos após o término do período de sedimentação ou adensamento por gravidade. Esta parcela de água é facilmente removida pela aplicação de pressão ou vácuo através dos flocos. Um processo convencional de desidratação remove a maioria desta água inter-flocos, por conta de um entupimento pouco significativo do meio filtrante e da torta de lodo.



A água adsorvida no floco refere-se à parcela de água adsorvida sobre a superfície do floco e que, devido à tensão superficial e rigidez estrutural dos flocos, só pode ser removida quando é aplicada uma adequada pressão ou vácuo. Esta remoção ocorre sem a ruptura dos flocos. No caso da ocorrência de fragmentação dos flocos de lodo, a parcela de água adsorvida não é identificada em quantidades significativas.

A água inter-partículas refere-se à parcela de água presa dentro dessas partículas. Esta parcela pode ser removida através da ruptura dos flocos de lodo, com aplicação de elevada pressão ou vácuo às partículas fragmentadas.

A água adsorvida na partícula refere-se à parcela de água adsorvida sobre a superfície da partícula por tensão superficial ou sucção capilar, sendo difícil de remover mecanicamente.

A água da partícula refere-se à parcela de água íntima e quimicamente ligada às partículas inorgânicas, quimicamente ligada às células, ou fisicamente ligadas às partículas orgânicas. Essa parcela de água só pode ser removida por processos específicos de secagem.

Deve-se ressaltar que essa divisão é meramente teórica, que não existem técnicas capazes de caracterizar cada tipo de associação mencionada. Entretanto, ela é muito útil para o estudo de métodos de separação e, nesse sentido, muitos esforços e pesquisas têm sido feitos para investigar esse campo.

### **3.3.3 Sistemas de secagem**

Um sistema para secagem térmica é constituído por uma série de equipamentos além do secador, como: silos de armazenagem do lodo desidratado e seco, sistema de mistura e alimentação de lodo, moinho, peneiras, queimador de combustível para geração de calor, condensador, sistema de remoção de pó, sistema de controle de odores e gases emitidos para a atmosfera e, por fim, equipamentos para transporte ou transferência do lodo entre os diversos componentes.

A Figura 3.13 mostra um esquema de um sistema de secagem térmica, que tem o objetivo de secar e granular o lodo, transformando-o em um biossólido para uso como fertilizante na agricultura.

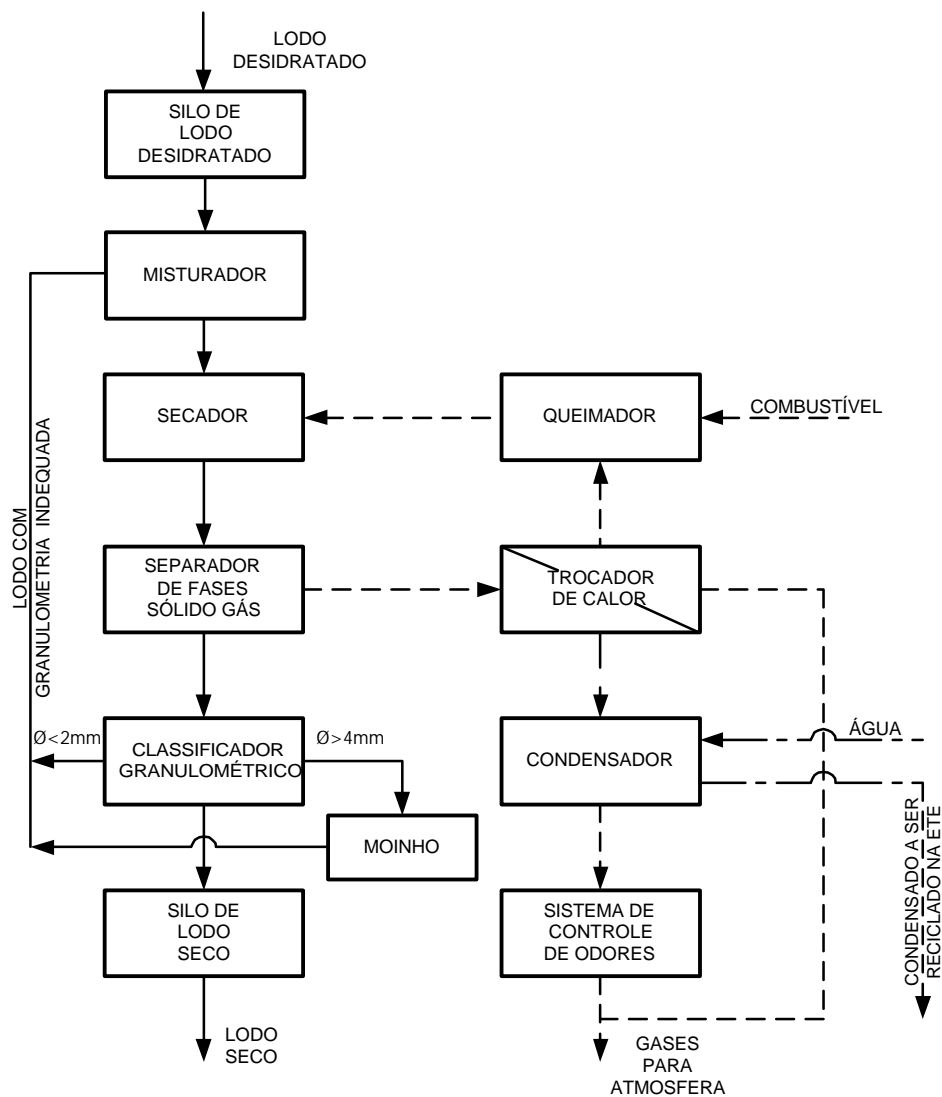


Figura 3.13 – Esquema de um sistema de secagem. Fonte: CEEJ (1998).

A parcela de recirculação de lodos secos dentro do processo de secagem, apresentada na Figura 3.13, deve-se à necessidade dos equipamentos requererem que o teor de sólidos, na entrada do secador, situe-se na faixa de 50 a 60%, para evitar que o lodo grude nas paredes internas do secador, tornando o processo ineficiente. TIZI; CRAEN (s.d.), da Seghers Better Technology (fabricante de secadores para lodos), descreve como “glue phase” (fase aderente) essa faixa de teor de sólidos. Nessa faixa

de teor de sólidos, o lodo encontra-se em forma pastosa e possui a característica de se tornar pegajoso. Para lodos biológicos, a fase aderente do lodo situa-se na faixa de 45 a 60% de teor de sólidos (TIZI; CRAEN, s.d.).

O problema da aderência é normalmente resolvido com a recirculação no processo de uma parcela de material já seco, em geral, o material fino na forma de pó ou pequenas partículas separados em peneiras ou outros equipamentos de separação de materiais particulados. Esse material é misturado com o lodo úmido, que chega da etapa anterior de desidratação, aumentando o teor de sólidos e formando partículas maiores, não aderentes e mais fáceis de serem secadas e manuseadas.

### **3.3.4 Consumo de energia**

A geração de calor para o aquecimento do lodo é conseguida pela queima de combustível, que pode ser: gás natural, biogás, óleo combustível ou uma combinação entre eles. A energia requerida pelo processo pode variar bastante, depende de vários fatores como: umidade de entrada e saída do lodo no processo, tipo e características do equipamento utilizado, eficiência térmica do secador empregado, aproveitamento ou recuperação de energia proveniente de outros processos, como a utilização do biogás quando possível.

De um modo geral, segundo informações de fabricantes de secadores, a quantidade de energia necessária para evaporar a água contida no lodo é da ordem de 800 a 1000 kcal/kg de água evaporada. Isso equivale dizer que para um lodo com teor de sólidos de 30%, que se deseja secar para 90%, o consumo de energia será da ordem de 670 kcal por kg de lodo.

Considerando-se o gás natural como fonte de energia para a secagem, com poder calorífico de 9.400 kcal por metro cúbico, cujo custo é da ordem de R\$ 0,50 por metro cúbico (aproximadamente US\$ 0,20) para consumos industriais e comerciais, situados na faixa de 5.000 a 50.000 metros cúbicos mensais, conforme informações obtidas na Companhia de Gás de São Paulo – Comgás. Considerando-se, ainda, um equipamento de secagem cuja eficiência térmica produza evaporação de 1 kg de água com 900 kcal, o custo de combustível para a secagem será da ordem de R\$ 120

(aproximadamente US\$ 50) por tonelada de lodo seco. Ou, de outra forma, o custo de combustível (gás natural) para a secagem será da ordem de R\$ 50 por tonelada de água evaporada do lodo.

Esse valor de custo de secagem térmica deve ser visto como uma ordem de grandeza, pois existem variações no preço do combustível devido a diversas razões como a faixa de consumo mensal e a localização da unidade consumidora. Outro fator que influencia no custo é a eficiência térmica do equipamento utilizado que pode variar significativamente.

### **3.3.5 Métodos de transferência de calor**

O calor transferido para o lodo aumenta sua temperatura e promove a evaporação da água contida na sua superfície. Durante o processo, forma-se um gradiente de temperatura da superfície para o interior do sólido, que causa a migração da umidade do interior para a superfície por mecanismos de escoamento capilar, difusão e diferenças de pressão internas provocadas pelo encolhimento do material. Conforme WEF (1992), a transferência de calor para o lodo é afetada por condições externas como: temperatura, umidade, velocidade e direção do gás de secagem, área da superfície de exposição, forma física do lodo, agitação e tempo de detenção. O entendimento dessas condições externas e seus efeitos é importante para a investigação das características de secagem do lodo, para a escolha do secador apropriado e para a determinação das melhores condições de operação.

Os métodos de transferência de calor empregados nos processos de secagem térmica, em geral, caracterizam o tipo de secador. Esses métodos podem ser: condução, convecção, radiação ou uma combinação destes.

#### **Convecção**

A transferência de calor por convecção ocorre pelo contato direto do meio de secagem com o lodo. É expressa matematicamente como:

$$Q_{cv} = h_{cv} A (T_g - T_l) \quad (3.10)$$

Onde:

$Q_{cv}$	=	calor transferido por convecção;
$h_{cv}$	=	coeficiente de transferência de calor por convecção;
$A$	=	área exposta ao meio de secagem;
$T_g$	=	temperatura do gás;
$T_l$	=	temperatura do lodo.

### Condução

A transferência de calor por condução ocorre através de uma parede que separa o lodo do meio de transferência de calor, em geral, óleo térmico ou vapor. É expressa matematicamente como:

$$Q_{cd} = h_{cd} A (T_m - T_l) \quad (3.11)$$

Onde:

$Q_{cd}$	=	calor transferido por condução;
$h_{cd}$	=	coeficiente de transferência de calor por condução;
$A$	=	área da superfície de transferência de calor ;
$T_m$	=	temperatura do meio de transferência de calor;
$T_l$	=	temperatura do lodo.

### Radiação

A transferência de calor por radiação ocorre através de energia radiante proveniente de superfícies aquecidas como: resistência elétrica, lâmpada infravermelha ou superfície refratária incandescente. É expressa matematicamente como:

$$Q_{rd} = C_e St A (T_r^4 - T_l^4) \quad (3.12)$$

Onde:

$Q_{rd}$	=	calor transferido por radiação;
$C_e$	=	emissividade da superfície aquecida;
$St$	=	constante de Stefan-Boltzman;
$A$	=	área exposta à fonte radiante;
$T_r$	=	temperatura absoluta da superfície radiante;
$T_l$	=	temperatura absoluta do lodo.

As temperaturas envolvidas num sistema de secagem podem variar bastante, dependem do processo de secagem utilizado e do tipo de secador empregado. Usualmente o ar quente entra no secador na faixa de 400 a 450°C, e sai na faixa de 90 a 150°C, o lodo deixa o secador na faixa de 70 a 100°C (WEF, 1992).

### **3.3.6 Classificação de secadores**

Existem, no mercado, vários tipos de equipamentos disponíveis para secagem térmica e muitos deles têm sido propostos para secagem de lodos de ETEs. Os equipamentos para secagem podem ser classificados de diferentes formas. Porém, as formas mais úteis de classificação são quanto ao modo de transferência de calor para os sólidos úmidos e quanto às características de manipulação e propriedades físicas do material úmido.

Quanto ao processo de transferência de calor, os secadores podem ser classificados como: diretos, indiretos, radiantes ou mistos. Nos secadores diretos, o ar quente entra em contato direto com o lodo e a troca de calor se dá por convecção. Nos indiretos, a transferência de calor é efetuada através do contato do lodo com superfícies aquecidas por: ar quente, vapor ou óleo térmico; e a troca de calor é realizada por condução. Nos secadores chamados radiantes ou secadores por infravermelho “infrared”, a troca de calor se dá por radiação. Nos secadores mistos, a transferência de calor é efetuada por uma combinação entre as formas de transferência de calor.

#### **Secadores diretos**

Nos secadores diretos, o material entra em contato direto com o meio de seca: ar quente, gases de combustão ou vapor superaquecido, que serve como fonte de calor para conduzir o processo de secagem. A Figura 3.14 apresenta esse processo esquematicamente, quanto à forma de transferência de calor e umidade.

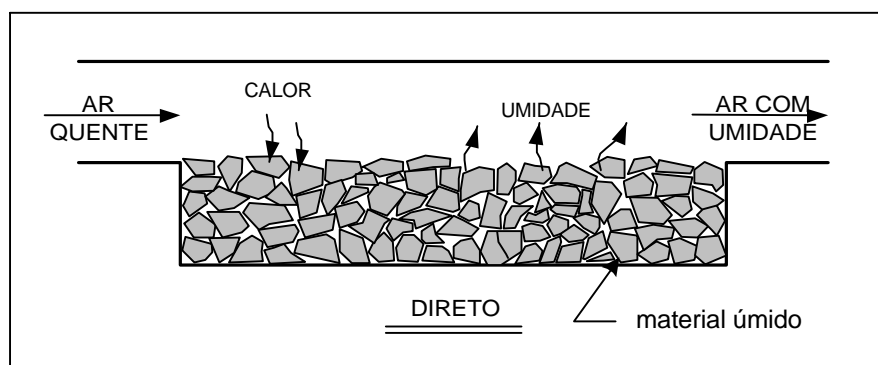


Figura 3.14 – Secagem direta.

Uma vantagem do secador direto é que, devido ao contato direto entre as partículas de lodo e o meio de seca, a taxa de troca de calor é mais alta e o lodo pode ser seco prontamente para teores de umidade inferiores a 20%. Para se atingir melhores taxas de transferência de calor, é necessário evitar que as partículas grudem umas às outras. Isso é normalmente conseguido por reciclo de uma parte do lodo seco no sistema de secagem.

A principal desvantagem desse tipo de secador, quando se usa ar ou gases de combustão como meio de secagem, é a geração de grande quantidade de gases com odores. O tratamento desses gases pode ser problemático e demanda o uso de combustível adicional, caso se adote tratamento térmico para esses gases. Outra desvantagem é o risco potencial de incêndio, que pode ser provocado pela auto-ignição do lodo seco em contato com os gases quentes, devido à presença de finos e poeiras gerados quando os lodos são transportados ou estocados (FROST, 1990).

O pequeno tempo de residência (da ordem de segundos para secadores do tipo “flash dryer”), decorrente da alta taxa de troca térmica, também pode ser uma desvantagem se as condições não forem suficientemente rigorosas para assegurar um alto grau de destruição dos organismos patogênicos (FROST, 1990).

### **Secadores indiretos**

Nos secadores indiretos, o lodo permanece separado do fluido de transferência de calor por uma parede metálica. Essa parede metálica recebe calor do meio de transferência de calor, que pode ser vapor saturado ou óleo térmico. Sua temperatura

encontra-se bem superior à do lodo úmido para que o calor seja transferido. A Figura 3.15 mostra, esquematicamente, o processo de secagem indireta quanto à forma de transferência de calor do meio térmico para o lodo e a forma de transferência de umidade do lodo para o meio de secagem.

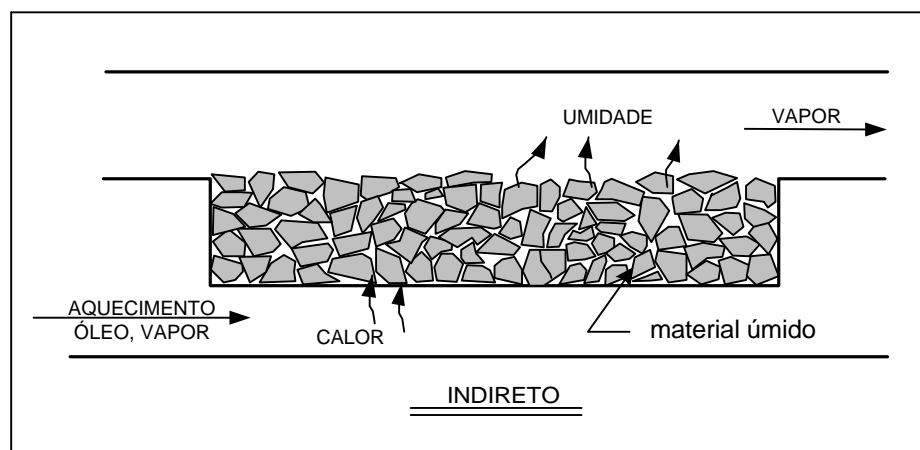


Figura 3.15 – Secagem indireta.

Para prevenir incrustações de lodo seco nas superfícies de troca de calor e manter uma taxa efetiva de transferência de calor, o lodo em contato com a superfície quente deve ser constantemente revolvido. Isso pode ser realizado de vários modos, tais como a agitação do lodo e a raspagem freqüente da superfície de troca de calor. A recirculação de uma parte do lodo seco com o lodo de alimentação pode contribuir para a realização desse objetivo, desde que, por esse meio, seja possível manter o teor de sólido do lodo dentro do secador acima do teor de sólido crítico. O teor crítico de sólido, que segundo TIZI; CRAEN (s.d.), situa-se na faixa de 50 a 60%, é um parâmetro importante, que deve ser levado em conta quando o lodo precisa ser seco para um teor de sólido maior.

No processo de secagem térmica indireta, o vapor formado fica acima da camada de lodo e em contato com ele. Um escoamento de ar de arraste auxilia na transferência de umidade do lodo para a corrente de ar, levando o vapor para fora do secador. O ar de arraste tem o propósito adicional de abaixar o ponto de orvalho e assim evitar a condensação do vapor dentro do secador, na saída deste. Segundo FROST (1990), tipicamente, a quantidade de ar de arraste é de aproximadamente 0,5 kg de ar por kg



de vapor. Uma consequência da redução do ponto de orvalho da corrente de vapor é que a recuperação de calor do vapor é prejudicada, se comparada com aquela com corrente de vapor, ambas em termos de taxa e quantidade de calor recuperável em qualquer temperatura.

### **Secadores por radiação**

Os secadores por radiação são semelhantes, construtivamente, aos secadores transportadores de esteira. São construídos em formato retangular, orientados horizontalmente e revestidos com chapa de aço e material refratário. O mecanismo transportador é constituído por uma esteira, sobre a qual o lodo é depositado em uma fina camada e transportado no interior do corpo do secador, para receber o calor de uma fonte de radiação. O calor é transmitido ao lodo por radiação, não há contato do lodo com gases de combustão. Entretanto, uma corrente de ar é necessária para promover o arraste da umidade evaporada do lodo.

### **3.3.7 Tipos de secadores**

#### **Secador rotativo**

É um dos tipos de secadores mais empregados para secagem de lodos biológicos e podem ser do tipo direto ou indireto. São constituídos por um ou mais cilindros rotativos, onde o lodo é deslocado continuamente ao longo da sua geratriz inferior, pela ação de pás direcionadoras presas na face interna do cilindro, que também promovem o revolvimento do lodo. A Figura 3.16 mostra esse tipo de equipamento.

No secador do tipo rotativo direto, o lodo entra em contato com uma corrente de ar quente ao longo de seu percurso, o que promove a evaporação da água. O fluxo de ar quente pode ser em contracorrente ou em corrente, em relação ao fluxo de lodo. No de fluxo em corrente, o lodo é mais rapidamente aquecido próximo à entrada, o que diminui a perda de calor para a estrutura do secador, aumentando assim, sua eficiência térmica. A temperatura do lodo próximo à descarga é menor, o que diminui a produção de odores e a perda de energia com a descarga do lodo muito aquecido.

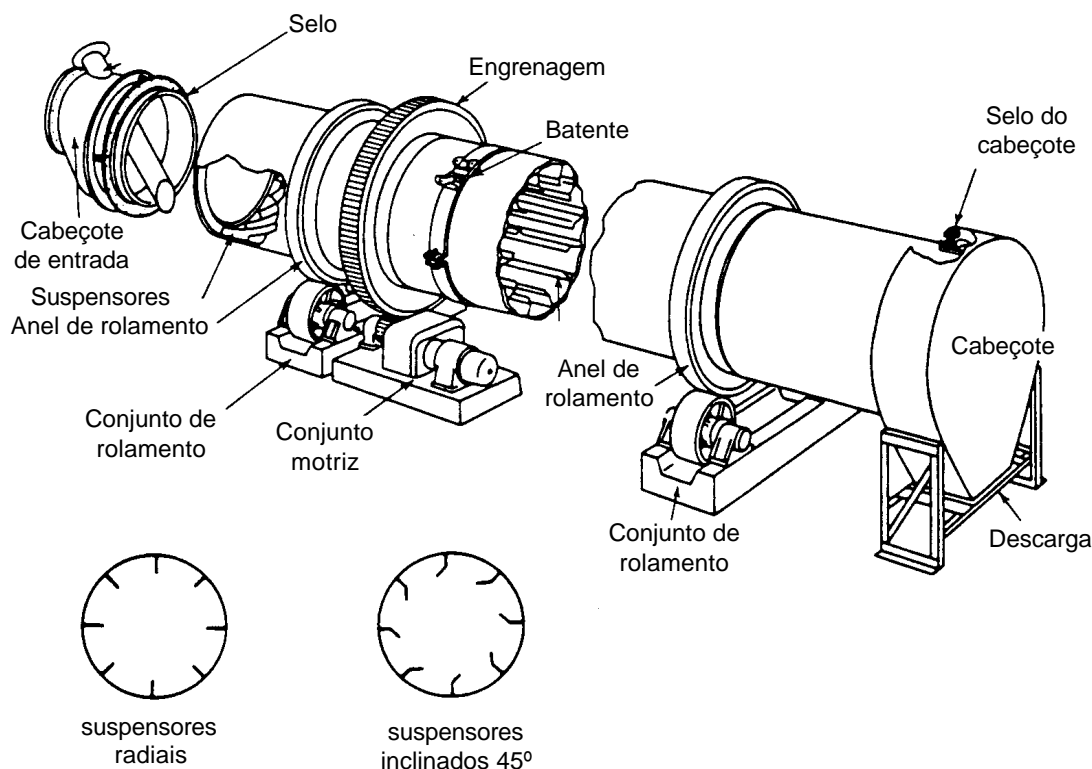


Figura 3.16 – Secador rotativo. Fonte: WEF (1992).

O secador do tipo rotativo indireto possui o cilindro principal por onde circula o lodo encamisado por outro cilindro. Entre eles, circula ar quente ou vapor em circuito fechado, que transfere o calor para o lodo por condução através da parede do cilindro, ou seja, não há contato direto do fluido quente com o lodo. Isso constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores.

### **Secador transportador de esteira**

Também denominado secador tipo túnel. É um equipamento de secagem de operação contínua à circulação permanente. Opera com o princípio da passagem de ar quente através de um leito permeável de material úmido. São constituídos por uma ou mais esteiras transportadoras, posicionadas horizontalmente dentro de uma caixa metálica isolada termicamente.

Ao entrar no equipamento, o lodo ainda úmido é moldado em grânulos por processo de extrusão e, em seguida, é distribuído em uma fina camada sobre a superfície da esteira transportadora, que se desloca dentro da câmara de secagem. O ar quente

atravessa a esteira e a camada de lodo, aquecendo-o e retirando a umidade nele contida. A Figura 3.17 mostra, esquematicamente, esse tipo de secador.

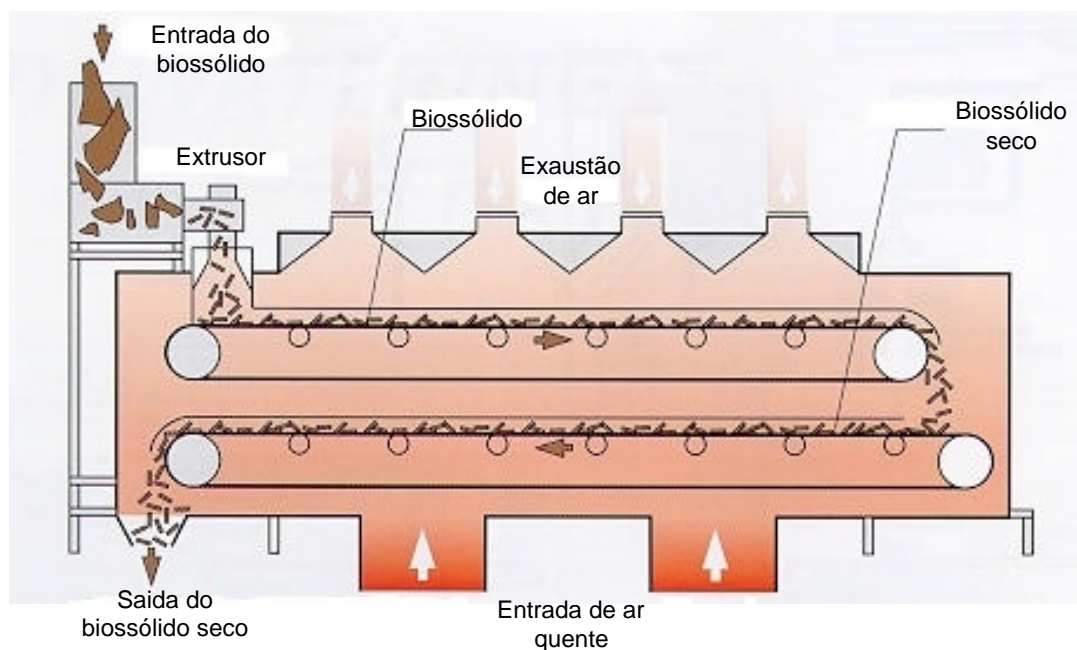


Figura 3.17 – Secador transportador de esteira. Fonte: Catálogo da Netzsch (1999).

O ar quente, requerido no processo, é gerado externamente através de queimadores. Estes podem utilizar gás natural, biogás ou óleo combustível. A temperatura na câmara de secagem situa-se na faixa de 70 a 140°C.

### **Secador a transporte pneumático**

Também denominado secador por arraste de ar ou secador tipo “flash dryer”. Consiste num longo tubo vertical, no qual circula o gás quente em alta velocidade, arrastando os sólidos para cima, enquanto realiza a secagem. Os lodos úmidos são misturados com lodos secos em um misturador e, são triturados e pulverizados na corrente de gás quente, que evapora, rapidamente, a água das partículas de lodo, enquanto o lodo é arrastado pelo tubo até o ciclone, que separa os sólidos dos gases. Do ciclone separador, o lodo seco é conduzido para os silos de armazenagem e parte é recirculado no processo. Os gases passam ainda por filtros de manga para retirada dos finos antes de serem liberados para a atmosfera.

Este tipo de secador gera muitos finos e poeiras, o que aumenta seu potencial para auto-ignição. Isso requer cuidados especiais de controle e segurança para não torná-lo susceptível à explosão ou incêndio. Por outro lado, a temperatura dos gases, muito alta na entrada, quando em contato com o lodo úmido, abaixa rapidamente até valores em torno de 70 °C. A Figura 3.18 mostra um sistema de secagem do tipo transporte pneumático, no qual a secagem, propriamente dita, ocorre no tubo vertical, localizado entre o desagregador e o ciclone coletor.

O lodo seco, nesse tipo de secador, fica na forma de pequenas partículas ou pó, necessitando novas operações para pelletização. É mais apropriado quando o produto final será misturado com outros nutrientes para a formação do fertilizante orgânico.

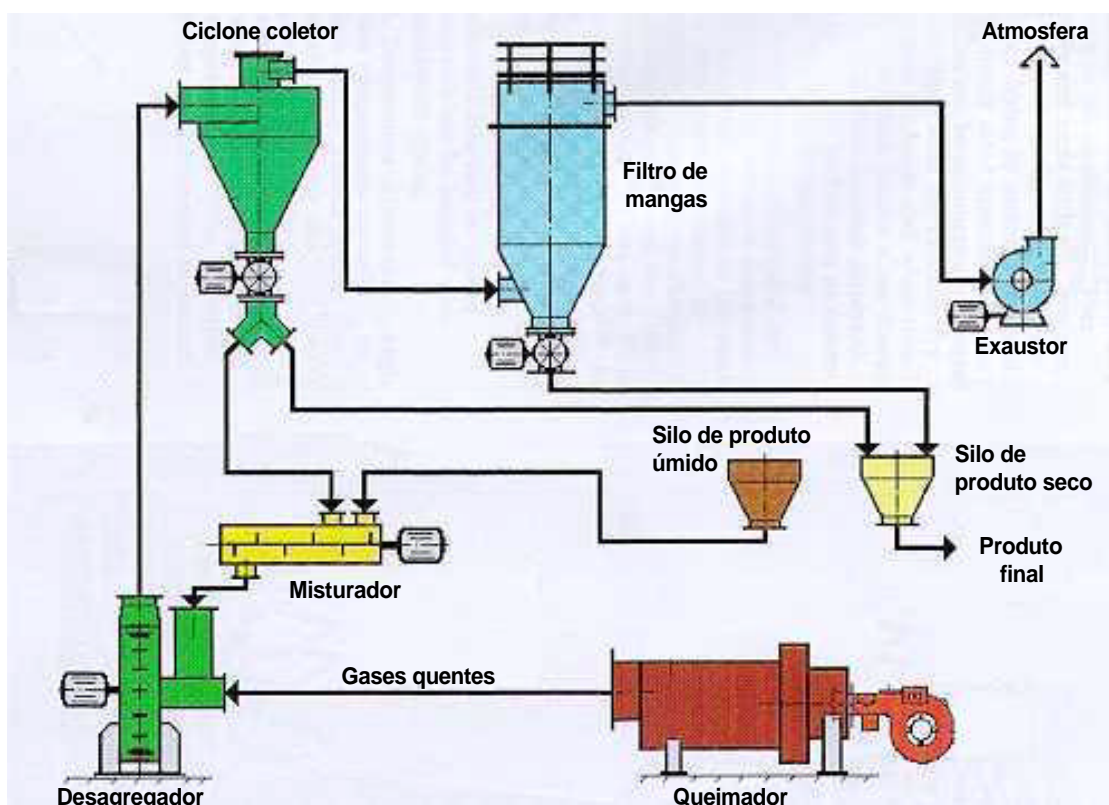


Figura 3.18 – Secador a transporte pneumático “flash dryer”.

Fonte: Adaptado de WEF (1996).

### Secador de soleiras múltiplas

Esse equipamento consiste de um tubo cilíndrico vertical hermeticamente fechado, contendo múltiplas soleiras anulares e horizontais montadas umas sobre as outras. É um secador do tipo indireto. A Figura 3.19, apresenta esse tipo de secador.

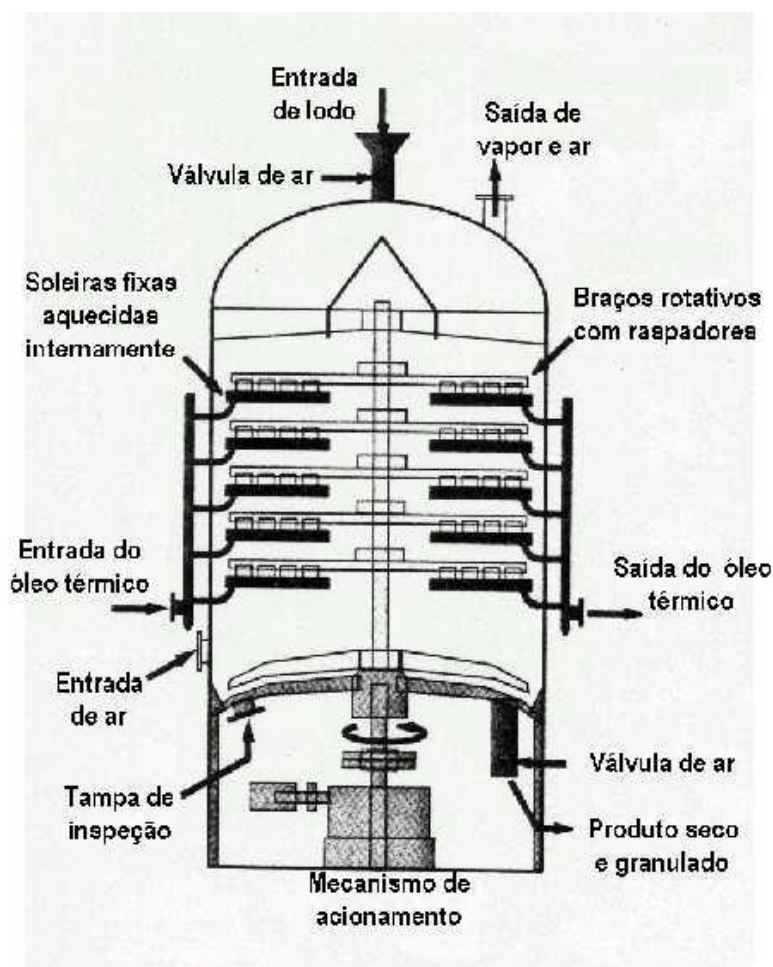


Figura 3.19 – Secador de soleiras múltiplas.

Fonte: FROST (1990).

O calor é transferido para as soleiras por óleo térmico ou vapor em circuito fechado. O contato do lodo com a soleira provoca seu aquecimento e a evaporação da água. O vapor é removido pela parte superior e conduzido para o condensador para recuperação de energia e recirculação do líquido condensado.

O processo de secagem inicia-se pela parte superior do equipamento, onde o lodo é colocado, sendo continuamente movimentado sobre a superfície da soleira e, de uma para outra sucessivamente, num movimento de vai e vem entre elas. Em uma, é empurrado para a borda externa, onde cai sobre a soleira seguinte. Nesta é empurrado para o centro, onde cai sobre a próxima e, assim, sucessivamente até a saída na parte inferior. Esse movimento é realizado através de um eixo vertical, acionado por motor elétrico, com palhetas direcionadoras, que empurram o lodo para as extremidades externa ou interna. A Figura 3.20 apresenta uma vista interna de um secador de bandejas múltiplas fabricado pela Seghers.

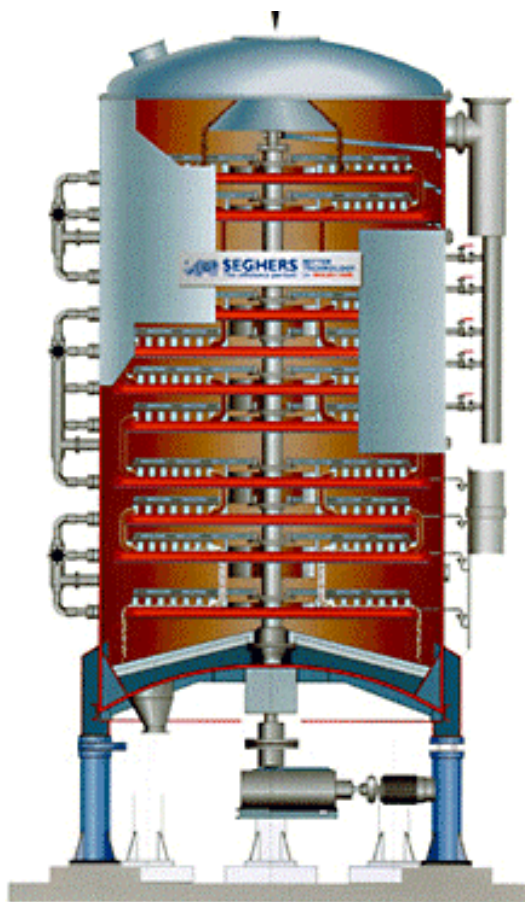


Figura 3.20 – Secador de soleiras múltiplas Seghers. Fonte: Catálogo da Seghers.

O material seco é descarregado na parte inferior do equipamento, em uma tremonha e transportado para os silos de armazenamento. Uma parte é recirculada no processo

e misturada com o lodo úmido na entrada do secador para iniciar a formação de novos grânulos.

### Secador pulverizador “spray dryer”

Também chamado atomizador, consiste de uma câmara cilíndrica grande, posicionada na vertical, onde o material, ainda na forma líquida, é alimentado por uma centrifugadora de alta velocidade. A Figura 3.21 apresenta um esquema de uma instalação com esse tipo de secador.

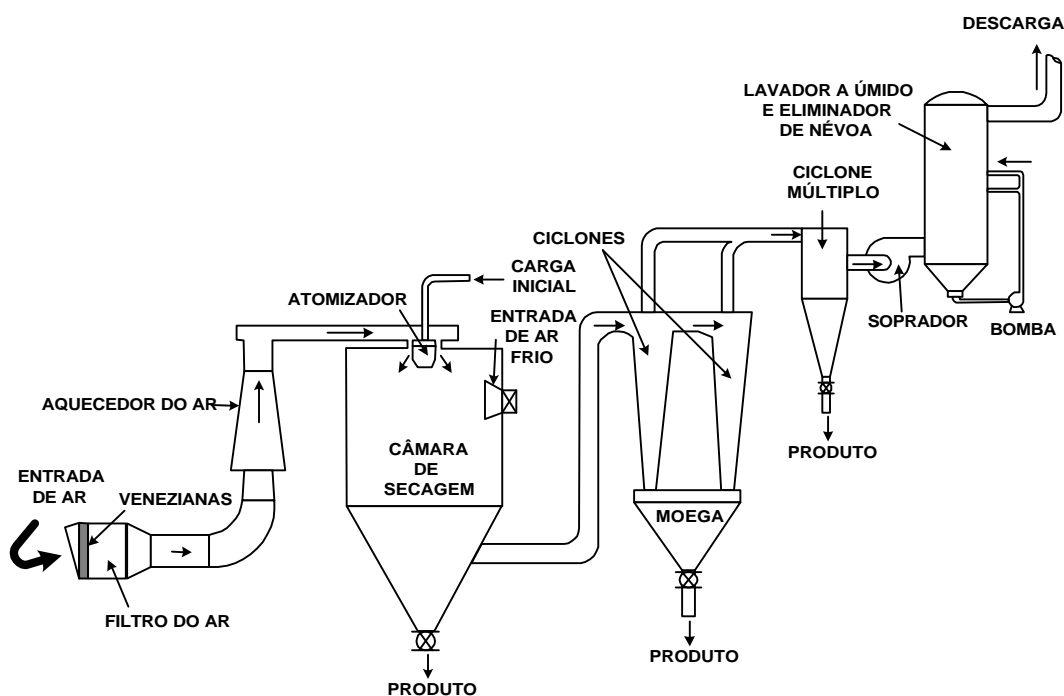


Figura 3.21 – Secador pulverizador “spray dryer”. Fonte: FOUST (1980).

A força centrífuga serve para pulverizar o lodo e aspergi-lo no topo da câmara de secagem, onde ocorre a transferência de umidade para o ar quente, que flui em contracorrente. A transferência de calor e umidade, que ocorrem de forma muito rápida na câmara, são realizadas pelo contato direto entre o gás quente e as gotículas dispersas.

### Secador de leito fluidizado

O secador de leito fluidizado consiste de uma câmara vertical estacionária com o fundo perfurado, através da qual uma corrente de ar quente é introduzida por sopradores pela parte inferior. A Figura 3.22 mostra esquematicamente um secador de leito fluidizado.

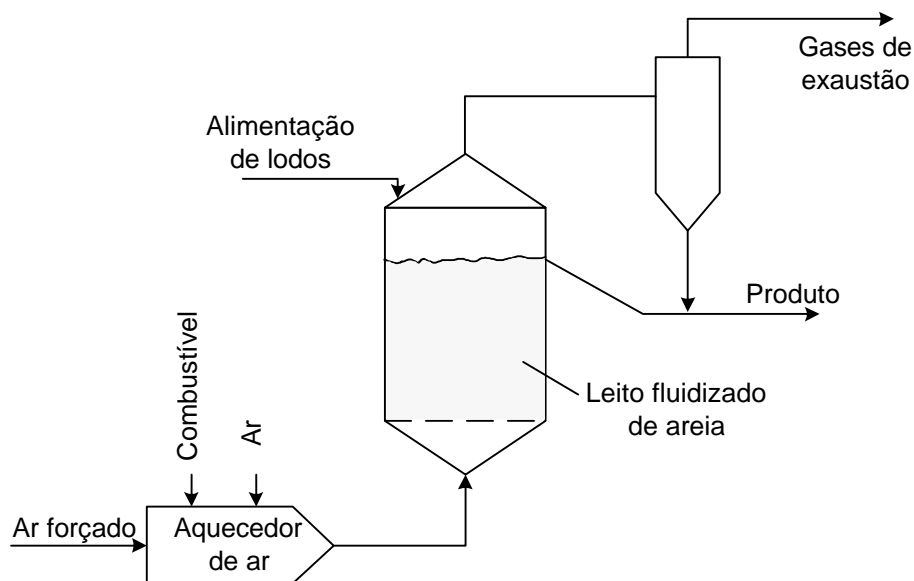


Figura 3.22 - Esquema de um secador por leito fluidizado. Fonte: WEF (1992).

Um transportador de rosca alimenta o secador com lodo úmido através de uma entrada, que não permite a saída de ar. No interior da câmara, uma corrente de ar quente ascendente passa através do lodo granulado disposto no fundo perfurado, revolvendo e suspendendo as partículas, tornando toda a massa de lodo num leito fluidizado. No interior da câmara, em sua parte inferior, o ar quente é distribuído uniformemente em torno do material particulado. Isso produz um alto grau de mistura e um íntimo contato entre as partes sólidas e gasosas envolvidas, resultando em uma alta transferência de calor e massa entre essas fases. O lodo seco sai do secador por extravasamento da câmara através de um tubo ou de um vertedor ajustável, com uma chave rotativa, que não permite a saída do ar. Os gases gerados no processo são conduzidos para um ciclone separador ou para outro equipamento de separação de material particulado e de controle de poluição.



Os secadores de leito fluidizado não possuem partes móveis. O lodo úmido é bombeado diretamente para dentro do secador, sem a necessidade de reciclo de material seco para ser misturado com lodo úmido, portanto, há pouca movimentação do material no processo. O meio de secagem é constituído de um circuito fechado. O ambiente, onde ocorre a secagem, é selado, de maneira a não permitir a entrada de ar. Estes aspectos são importantes para a segurança do sistema e para a economia de energia elétrica.

Embora os secadores pelo processo de leito fluidizado tenham sido reconhecidos como eficientes para muitas aplicações, atualmente eles são raramente aplicados na secagem de lodos de estações de tratamento de esgotos domésticos (WEF, 1992).

Cada tipo de secador possui vantagens e desvantagens em relação aos demais. A escolha do mais apropriado requer estudo técnico e econômico cuidadoso, levando-se em consideração uma série de fatores como:

- quantidade e teor de sólidos do lodo produzido na ETE;
- disponibilidade de fontes de energia (biogás, gás natural, fontes alternativas);
- disposição final ou utilização posterior do lodo seco;
- tipo de utilização do lodo;
- atendimento às exigências legais;
- custos operacionais e de implantação do sistema.

Pesam, também, na escolha certos fatores como segurança e facilidade de operação e manutenção, que são mais difíceis de quantificar e sobre os quais uma avaliação econômica não é exata.

Os secadores dos tipos soleiras múltiplas, de leito fluidizado e os rotativos de aquecimento indireto são os mais apropriados para a granulação e secagem dos biossólidos em uma única operação, o que é um importante fator a ser considerado quando o produto já deve sair na forma final para aplicação direta na agricultura.

### **3.3.8 Controle de emissões**

Duas medidas de controle muito importantes, associadas com secagem térmica do lodo são: coleta de materiais particulados e eliminação de odores. Os materiais

particulados, principal poluente do processo de tratamento térmico de lodo, que incluem partículas sólidas e líquidas, podem ser separados por coletores mecânicos tipo ciclone ou câmara de sedimentação, lavadores de gases, precipitadores eletrostáticos e filtros manga.

Os separadores tipo ciclone, com eficiência de 75 a 80 %, são adequados a aplicações a gases com temperaturas de até 370°C (METCALF & EDDY, 1991). Os lavadores de gases possuem eficiências mais elevadas, porém, algumas das matérias orgânicas presentes no gás podem ser condensadas e permanecer no efluente, que deve ser recirculado no processo. Os filtros tipo manga conseguem reter sólidos muito finos com eficiência superior a 99%. São usados em temperaturas mais baixas e em complemento aos separadores tipo ciclone.

Para a eliminação dos odores, os gases de exaustão devem ser aquecidos até aproximadamente 730 °C. Em temperaturas mais baixas, pode ocorrer oxidação parcial de componentes produtores de odores, resultando em um aumento na intensidade do odor produzido.

### **3.4 Utilização na agricultura de biossólidos submetidos à processos de secagem térmica**

#### **3.4.1 Generalidades**

O biossólido possui um grande valor para a agricultura, conforme citam: CARVALHO (2001), MELO (2000), ANDREOLI (1999) e BETTIOL (2000). Pode ser utilizado como fertilizante para as plantas, pois contém os micro e macronutrientes necessários ao seu desenvolvimento. Contém, ainda, a matéria orgânica em concentração da ordem de 40%, muito importante para aumentar o conteúdo de húmus que ajuda a melhorar a capacidade de armazenamento e de infiltração de água no solo, a retenção de umidade próxima à superfície e, conseqüentemente, o desenvolvimento da fauna biológica do solo. São considerados macronutrientes os elementos: nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre, pois aparecem em maiores proporções na composição do tecido vegetal. São considerados micronutrientes os elementos: cobre, ferro, zinco, manganês, boro, molibdênio e cloro, que aparecem em menores proporções no tecido vegetal. Esses nutrientes têm uma grande importância na manutenção da fertilidade do solo. Exercem impacto direto no desenvolvimento e rendimento das plantas e, conseqüentemente, na produção agrícola (MELO, 2000).

O uso agrícola do biossólido é uma forma mundialmente aceita para reciclar a matéria orgânica e dispor, adequada e economicamente, o resíduo do tratamento de esgotos. Nos Estados Unidos, cerca de 25% do total de biossólidos produzidos tem destinação agrícola. Na Europa e Canadá, o uso agrícola de biossólidos é de aproximadamente 37% do total produzido. Atualmente, dentre as várias formas de disposição final de biossólidos, somente a disposição em aterros sanitários ainda é a solução mais praticada do que o uso agrícola nos Estados Unidos e na Europa, correspondendo a 41% e 40%, respectivamente. A incineração ocupa a terceira opção nesses dois países, correspondendo a 16% nos Estados Unidos e 11% na Europa (TSUTIYA, 1999).

### 3.4.2 Normatização para uso na agricultura

Ainda não existe uma legislação federal brasileira específica para regulamentar o uso de bio sólidos na agricultura. Conforme CARVALHO, F.J.P.C.; CARVALHO P.C.T. (2001), o Ministério da Agricultura e Abastecimento, que é o órgão federal responsável pela legislação, está promovendo uma revisão da legislação visando atender as exigências internas do país e o mercado internacional, exigente na qualidade dos produtos agrícolas.

A legislação brasileira, que regulamenta a produção e o comércio de corretivos e fertilizantes, é um conjunto de leis, decretos, portarias, ofícios e instruções normativas. A atual legislação teve início com a lei 6.894/80, que dispõe sobre a inspeção e a fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos e biofertilizantes. A lei 6.934/81 alterou a lei 6.894/80, introduzindo a exigência de assistência técnica permanente de profissional habilitado e a taxa de inspeção. O decreto 86.955/82 regulamentou as leis 6.894/80 e 6.934/81 com objetivos específicos sobre os registros de estabelecimentos e produtos, entre outros; e foi, ainda, alterado pelo decreto 99.427/90 (CARVALHO, F.J.P.C.; CARVALHO P.C.T., 2001).

Na regulamentação da atual legislação, os bio sólidos não foram contemplados, por não existirem no Brasil. Com a revisão da legislação, que está sendo promovida pelo Ministério da Agricultura e Abastecimento, com o apoio de universidades, institutos de pesquisa e órgãos ambientais, os bio sólidos serão contemplados como fertilizante orgânico enriquecido (CARVALHO, F.J.P.C.; CARVALHO P.C.T., 2001).

Mesmo não sendo especificamente contemplado na atual legislação, os bio sólidos podem ser registrados como fertilizante orgânico, organomineral ou composto, dependendo do processo final de tratamento. No caso do bio sólido não ser submetido a processos de compostagem, secagem ou mistura com fertilizantes minerais, então, só poderá ser classificado como corretivo melhorador do solo (CARVALHO, F.J.P.C.; CARVALHO P.C.T., 2001).

Para o Estado de São Paulo, a CETESB elaborou um Manual Técnico, redigido na forma de norma, visando o atendimento de exigências ambientais. Essa norma estabelece os critérios para elaboração de projetos, implantação e operação de sistemas de aplicação de lodos biológicos em áreas agrícolas (STRAUS, 2000).

Para CARVALHO, F.J.P.C.; CARVALHO P.C.T. (2001), ficou um ponto de conflito entre a legislação federal e a norma da CETESB, visto ser ilegal a dupla fiscalização. Assim, quando um biossólido atender aos padrões de qualidade e for devidamente registrado, será aplicável a legislação federal, enquanto que as normas da CETESB restringem-se aos resíduos de tratamento biológico não enquadráveis na legislação federal.

A norma da CETESB, denominada P 4.230 - Aplicação de Lodos de Sistemas de Tratamento Biológico em Áreas Agrícolas – Critérios para Projeto e Operação, foi editada em agosto de 1999. Aplica-se a todos os sistemas operados no Estado de São Paulo e refere-se, exclusivamente, a biossólidos produzidos em sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários e industriais. Essa norma foi elaborada com base, principalmente, na norma 40 CFR Part 503 (Code of Federal Regulations nº 40, Part 503 – Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge), publicada em 1993, através da United States Environmental Protection Agency (USEPA), para disciplinar o uso de biossólidos na agricultura nos EUA.

Na norma P 4.230, a CETESB adotou as mesmas recomendações da norma norte americana EPA 40 CFR Part 503 quanto aos limites de metais pesados e patógenos. Nela são regulamentados os pré requisitos de qualidade microbiológica e parasitológica, redução à atividade de vetores e de concentração de metais pesados, para que o biossólido possa ser considerado adequado para aplicação em culturas agrícolas. São estabelecidos, também, os critérios para a aplicação do biossólido no solo quanto à localização, taxas de aplicação e monitoramento do solo.

Dentro do requisito de redução de patógenos, o biossólido é dividido em duas classes: ‘Classe A’ – resultante de processos de redução adicional de patógenos e, ‘Classe B’ – resultante de processos de redução de patógenos. Nas duas classes definidas pela norma CETESB P 4.230, bem como pela EPA 40 Part 503, os

biossólidos devem possuir características tais, que permitam seu enquadramento dentro dos parâmetros apresentados a seguir.

### **Biossólido Classe A**

Um biossólido é considerado classe A se o processo adotado para o seu tratamento, for aprovado pelo órgão de controle ambiental como processo de redução adicional de patógenos. Deve, ainda, ser analisado quanto à presença de coliformes fecais e *Salmonella sp*, no momento de seu uso ou disposição no solo agrícola ou no momento da entrega a terceiros, responsáveis pela aplicação.

O biossólido classe A deve atender aos seguintes limites para a densidade dos organismos especificados:

- densidade de coliformes fecais inferior a 1000 NMP/g de sólidos totais e;
- densidade de *Salmonella sp* inferior a 3 NMP/ 4 g de sólidos totais.

Para a verificação da redução adicional de patógenos, a concentração de vírus entéricos deve ser reduzida a um valor menor que 1 UFP/ 4 g de sólidos totais, os ovos viáveis de helmintos devem ser reduzidos a um valor menor que 1 por 4 g de sólidos totais e os cistos de protozoários devem ser reduzidos a um valor menor que 1 por 4 g de sólidos totais (CETESB, 1999).

NMP: número mais provável;

UFP: unidade formadora de placa;

Para a classificação do biossólido em classe A, a norma EPA 40 CFR Part 503, requer a verificação de coliformes fecais ou *Salmonella sp* (apenas um dos dois parâmetros), enquanto que a norma da CETESB P 4.230 requer a verificação de ambos.

### **Biossólido Classe B**

Um biossólido é considerado classe B se a densidade de coliformes fecais for inferior a  $2 \times 10^6$  NMP/g de sólidos totais. Para confirmação da sua classificação como classe B, o processo adotado para o seu tratamento deve ter sido aceito pelo órgão de controle ambiental ou; o resultado do monitoramento de coliformes fecais indicar que a média geométrica da densidade de coliformes fecais de 7 amostras é inferior a  $2 \times 10^6$  NMP/g de sólidos totais ou  $2 \times 10^6$  UFC/g de sólidos totais (CETESB, 1999).

A norma CETESB P 4.230, assim como a EPA 40 CFR Part 503 recomenda 11 processos de tratamento de lodo para a redução de patógenos, sendo cinco processos de redução de patógenos, para a classificação do biossólido em classe B e seis processos de redução adicional de patógenos para a classificação do biossólido em classe A. Os processos aceitos pela CETESB são apresentados a seguir.

- **Processos de redução adicional de patógenos:** São os processos para produção do biossólido classe A (densidade de coliformes fecais até 1000 NMP/g de sólidos totais): compostagem, secagem térmica, tratamento térmico, digestão aeróbia termofílica, irradiação com raios beta ou com raios gama e pasteurização. Na EPA 503 são denominados processos PFRP (Process to Further Reduce Pathogens).
- **Processos de redução de patógenos:** São os processos para produção do biossólido classe B (densidade de coliformes fecais até 2 milhões NMP/g sólidos totais): digestão aeróbia, secagem ao ar, digestão anaeróbia, compostagem e estabilização com cal. Na EPA 503 são denominados processos PSRP (Process to Significantly Reduce Pathogens).

Dentre os processos para redução adicional de patógenos, estabelecidos pela CETESB e EPA, o de secagem térmica deve ser por contato direto ou indireto com o ar. O teor de umidade no lodo seco deve ser igual ou menor que 10%. A temperatura do material deve ser superior a 80°C ou a temperatura de bulbo úmido dos gases em contato com o lodo, na saída do secador, superior a 80°C.

Para que os biossólidos possam ser utilizados na agricultura, devem ser atendidos os limites estabelecidos pela CETESB, sendo que para o biossólido Classe A não há nenhuma restrição de uso, enquanto que, para o biossólido Classe B há restrições referentes às culturas de alimentos, cujas partes comestíveis entrem em contato com o biossólido, pastagem de animais e contato público.

A atração a vetores também é um fator limitante para a sua utilização agrícola. A CETESB recomenda os seguintes processos como adequados para a redução da

atração a vetores: digestão anaeróbia, digestão aeróbia, compostagem, estabilização química, secagem, aplicação superficial e incorporação no solo.

Na Europa, a normatização que rege a aplicação de biossólidos na agricultura está sob regime de cada país e está baseada no estabelecimento de critérios para disposição em solos destinados às culturas agrícolas. Porém, foi promulgada uma Diretiva com abrangência para toda a Comunidade Econômica Européia (CEE), para unificar e homogeneizar os critérios e procedimentos relativos à aplicação de biossólidos no solo. Nessa diretiva, são apresentadas tabelas sobre os limites de concentrações de metais pesados nos solos e no biossólido, bem como a dose máxima de aplicação anual, baseada em média de 10 anos. Essa diretiva fixa limites máximos, entretanto, permite que os países membros tenham suas legislações próprias, desde que não ultrapassem aqueles limites. Na Tabela 3.8, são apresentados os teores limites dos diversos poluentes possivelmente presentes nos biossólidos de alguns países europeus, Canadá e Estados Unidos.

Tabela 3.8 – Concentrações de metais em biossólidos para uso agrícola.

Metal poluente	Concentração máxima de metais em base seca ( mg/kg)				
	França	Alemanha	Itália	Canadá	EUA
Arsênio	-	-	-	75	75
Cádmio	20	5	20	20	85
Chumbo	800	900	750	500	840
Cobre	1000	800	1000	-	4300
Cromo	1000	900	-	-	-
Mercúrio	10	8	10	5	57
Molibdênio	-	-	-	20	75
Níquel	200	200	300	180	420
Selênio	100	-	-	14	100
Zinco	3000	2000	2500	1850	7500

Fonte: CEEJ (1998), TSUTIYA (1999).



### 3.4.3 Biossólido na indústria de fertilizante

Conforme CEEJ (1998), em seu estudo para uso agrícola, descrito no plano diretor de lodos, em conformidade com o Decreto Lei 86.955 de 18/02/82 e Portarias 84 de 28/03/82 e 01 de 30/01/86, os biossólidos podem ser utilizados de três maneiras na indústria de fertilizantes:

- Fertilizante granulado complexo, quando o biossólido e os sais minerais estão reunidos no mesmo grânulo, formando um produto homogêneo. Será chamado de organo-mineral, se apresentar teor mínimo de 25% de matéria orgânica e 12% de NPK e; será chamado de mistura granulada complexa, quando não atender a esse mínimo de matéria orgânica, com exigência de um mínimo de 24% de NPK;
- Mistura de fertilizantes minerais e orgânicos, em forma de mistura de grânulos ou em pó. Dependendo dos teores em matéria orgânica e NPK, será da mesma maneira considerado um fertilizante mineral ou organo-mineral;
- Carga numa formulação mineral, quando a mistura mineral não atingir o peso de uma tonelada, que é o padrão comercial. Neste caso, a indústria de fertilizantes, habitualmente, completa o peso com carga inerte (granilha). A substituição desta carga por biossólido seco traz vantagens decorrentes do seu teor em matéria orgânica e nutrientes.

Os processos, recomendados para controlar os patógenos presentes e a atração de vetores, são a estabilização química e a secagem térmica, que propiciam condições adequadas de transporte e manuseio. A estabilização química é indicada para a produção de fertilizante granulado complexo, enquanto que a secagem térmica é obrigatória para a mistura de grânulos ou pó e para utilização como carga (CEEJ, 1998).

#### **Fertilizante granulado complexo**

Conforme CEEJ (1998), o processo de produção de fertilizante granulado complexo compreende as etapas: alimentação das matérias primas, dosagem de componentes, granulação da mistura, secagem e classificação granulométrica do produto. As

matérias primas são constituídas pela torta potássica preparada a partir de lodos, fosfatos, sulfato de amônia, uréia, cloreto de potássio, ácido fosfórico e amônia. Na preparação da torta potássica, o lodo recebe adição de cal até pH 12, com 2 horas de contato, seguido de choque osmótico com cloreto de potássio.

Em seguida, são realizadas as etapas de granulação, secagem e classificação granulométrica. O produto final deve ter granulometria entre 2,0 e 4,0 mm, isento de microrganismos patogênicos e com todas as características para um bom fertilizante granulado. Pelas suas propriedades físicas e químicas, semelhantes às dos fertilizantes químicos, o transporte, armazenamento, manuseio e aplicação nos solos devem ser de forma semelhante, sem necessidade de qualquer equipamento especial ou mudança na rotina e tecnologia utilizada pelos agricultores (CEEJ, 1998).

### **Mistura de fertilizantes minerais e orgânicos**

O processo produtivo deste material consiste, basicamente, da mistura de componentes já granulados. Em geral, é feito por pequenas empresas ou cooperativas, que não possuem uma unidade de granulação. Essas empresas, localizadas nas proximidades dos consumidores, adquirem a matéria prima por importação ou compra direta dos fabricantes nacionais e atendem aos seus clientes, misturando os componentes na formulação desejada. Neste caso, o bio sólido, após secagem térmica, passa a constituir uma nova matéria prima, única no mercado, com matéria orgânica granulada e de grande valia para os misturadores porque permitirá formulações de matéria orgânica associada a fertilizantes minerais em média concentração. Este tipo de formulação, segundo CEEJ (1998), muito usada em algumas culturas, raramente é produzida hoje em dia, tendo em vista as dificuldades na obtenção de uma matéria prima orgânica. Este é um mercado potencialmente importante para a destinação final do bio sólido seco termicamente.

### **Carga na formulação mineral**

Tanto na produção do fertilizante granulado complexo como na de mistura de fertilizantes minerais e orgânicos, são adicionadas pequenas quantidades de ingredientes inertes, de 1 a 5% do total, conhecidos como carga ou enchimento. O limite de 5% raramente é ultrapassado porque a carga normalmente utilizada é a

granilha, ou seja, pedra moída inerte e com aspecto físico semelhante ao do fertilizante. Se a carga for maior, se destacará da mistura gerando problemas comerciais. Se utilizada uma carga orgânica como o bio-sólido seco, o seu volume poderá ser muito maior. Quase todas as formulações aceitarão cargas elevadas se forem utilizados fertilizantes concentrados (CEEJ, 1998).

#### **3.4.4 Benefício agrônômico dos bio-sólidos**

Em um sistema produtivo racional, o solo deve estar em condições de fornecer às plantas os nutrientes necessários, nas quantidades e nos momentos adequadas. Como, de uma maneira geral, os solos não se apresentam em condições de atender às necessidades das culturas, o homem tem que intervir por meio de um manejo adequado do sistema solo-planta, incluindo a aplicação de fertilizantes minerais, orgânicos, adubação verde e outros sistemas de manejo.

Os fertilizantes químicos, usualmente aplicados nos solos, de uma maneira geral, possuem em sua formulação Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), em concentrações variáveis que dependem do tipo de solo e da cultura agrícola a ser cultivada. Uma das preocupações ao se fazer e usar fertilizantes é a fórmula. Ela é o teor de nutrientes em porcentagem do elemento fertilizante em peso, mesmo que o fertilizante seja fluido ou sólido. A fórmula é expressa como um conjunto de 3 números nessa ordem: porcentagem de nitrogênio total (N), de fósforo disponível ( $P_2O_5$ ) e potássio solúvel ( $K_2O$ ). Assim, uma fórmula 5-10-15 contém 5% de N, 10% de  $P_2O_5$  e 15% de  $K_2O$ . Os 70% restantes do produto são formados por outros elementos como: cálcio, cloro e oxigênio (IPT/CEFER, 1976).

Os fertilizantes minerais não possuem matéria orgânica em sua formulação. Quando há falta de matéria orgânica no solo, em geral, o agricultor utiliza esterco de curral, cama de frango, torta de mamona ou outro material que a contenha.

A matéria orgânica, os macro e os micronutrientes exercem um papel fundamental na manutenção da fertilidade do solo e, conseqüentemente, na produção agrícola. Conforme citam CARVALHO (1999) e MELO (2000), os bio-sólidos contém todos os nutrientes essenciais e benéficos para o desenvolvimento dos vegetais. Possui

grande potencial para uso na agricultura, seja como condicionador das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, seja como substituto, pelo menos em parte, dos fertilizantes minerais atualmente em uso.

Na Tabela 3.9, são apresentados alguns dados, apenas para efeitos comparativos dos principais parâmetros de valor agrônômico dos biossólidos produzidos em Curitiba (ETE Belém), em Brasília (ETEs Sul, Norte e Sobradinho), em São José dos Campos (ETE Lavapés), em Franca (ETE Franca) e em São Paulo (ETE Barueri).

Tabela 3.9 – Principais parâmetros de valor agrônômico dos biossólidos produzidos em diversas ETEs do Brasil.

Parâmetro	CONCENTRAÇÃO (%)				
	BELÉM Curitiba PR	BRASÍLIA Brasília DF	LAVAPÉS SJC Campos SP	FRANCA Franca SP	BARUERI S. Paulo SP
Nitrogênio Total	4,91	5,5	4,5	5,53	2,25
Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,70	3,0	2,59	0,93	1,48
Potássio (K <sub>2</sub> O)	0,36	0,35	0,39	0,26	0,01
Mat. Orgânica	69,4	52,5	52,6	65,2	44
Cálcio	1,59	4,5	13,3	2	7,29
Magnésio	0,60	0,35	0,27	0,22	-

Fonte: Adaptado de TSUTIYA (2001).

Pode-se observar na tabela 3.9 que os biossólidos das diversas localidades mencionadas possuem quantidades de nitrogênio, com concentração variável de 2,2 a 5,6% e fósforo de 0,9 a 3,7%. Conforme TSUTIYA (1999), essas concentrações são decorrentes do processo de tratamento da fase líquida e da fase sólida dos esgotos. As concentrações de potássio são pequenas, comparadas com as necessidades das plantas, porque esse elemento é altamente solúvel em água e, durante o processo de tratamento de esgoto, fica contido no efluente líquido.

Pelas quantidades de nitrogênio e fósforo contidas nos biossólidos, pode-se dizer que estes podem substituir os fertilizantes comerciais como uma fonte desses nutrientes

para as plantas, conforme WEBBER; BATES (1997). No entanto, o uso exclusivo de biossólido como fertilizante poderá implicar em deficiências nutricionais para a cultura, devido à baixa concentração de outros elementos também importantes. Por isso, deve-se fazer a suplementação mineral, quando necessário.

#### **3.4.5 Importância da matéria orgânica dos biossólidos**

Em solos de regiões tropicais e subtropicais, a matéria orgânica desempenha um papel de fundamental importância na fertilidade, por se tratarem de solos altamente intemperizados, cujos minerais, já na escala final do intemperismo, possuem baixa capacidade de troca catiônica (CTC) e pouco potencial de liberação de nutrientes para as plantas. Assim, conforme cita MELO (2000), a matéria orgânica, principal componente da CTC, libera nutrientes para a nutrição dos vegetais durante o processo de mineralização. Desta forma, o manejo da matéria orgânica constitui-se em elemento de elevada importância para o sucesso das atividades agropecuárias.

A matéria orgânica dos biossólidos favorece a formação de agregados, facilitando a penetração das raízes e a vida microbiana. Atua, também, junto a resistência do solo à erosão, por estabilizar a estrutura do solo e aumentar a capacidade de retenção de água do solo, tornando as culturas mais resistentes à seca. A matéria orgânica fornece nutrientes para a planta e para os organismos do solo após a mineralização e atua como condicionador do solo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas (TSUTIYA, 2000).

Conforme CARVALHO; BARRAL (1981), a decomposição do biossólido no solo produz agentes complexantes que facilitam a movimentação de fosfatos combinados com ferro e alumínio, além de permitir melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, em decorrência da lenta liberação dos mesmos através do processo de mineralização da matéria orgânica.

O aumento do teor de matéria orgânica no solo, decorrente da aplicação de biossólidos, melhora sensivelmente o nível de fertilidade, promovendo o aumento de pH, diminuição da acidez potencial e aumento gradual da disponibilidade de nutrientes como Ca, Mg e S.

Segundo TSUTIYA (1999), os solos paulistas têm carência de matéria orgânica, por isso, possivelmente, o valor agrônômico de maior importância dos biossólidos refere-se à matéria orgânica, cuja concentração é, em geral, da ordem de 40%. Os biossólidos contém, também, outros macronutrientes, tais como: cálcio, magnésio e enxofre e, também, micronutrientes como ferro, cobre e zinco, que constituem elementos de vital importância para o desenvolvimento das plantas.

### **3.4.6 Importância dos macro e micronutrientes para as plantas**

São considerados macronutrientes: o nitrogênio (N), o fósforo (P), o potássio (K), o cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o enxofre (S). São considerados micronutrientes o cobre (Cu), o ferro (Fe), o manganês (Mn), o zinco (Zn), o molibdênio (Mo), o boro (B) e o cloro (Cl). São, ainda, considerados elementos benéficos para as plantas: o cobalto (Co), o níquel (Ni), o silício (Si) e o vanádio (V) (MELO, 2001).

#### **Nitrogênio**

Os biossólidos contém nitrogênio em concentrações que podem variar de 1 a 6%, dependendo dos processos de tratamento empregados. Quando há utilização de cal para a estabilização, os teores diminuem significativamente. O nitrogênio está presente nos biossólidos nas formas orgânica e inorgânica. O nitrogênio inorgânico é composto pelo nitrogênio amoniacal ( $\text{NH}_4$ ) e nitrogênio na forma de nitrato e nitrito ( $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ ).

Conforme WEBBER (1984), nos lodos digeridos anaerobiamente, cerca de 30 a 60% do total de nitrogênio está presente na forma de nitrogênio amoniacal. Para lodo digerido aerobiamente, esse valor é de 5 a 20%. O nitrogênio amoniacal e o nitrato são considerados totalmente disponíveis para a planta, enquanto que o nitrogênio orgânico deve passar por mineralização microbiológica antes de ser absorvido pelas plantas. Segundo dados bibliográficos levantados por ANDREOLI; FERNANDES (1999), em climas quentes, aproximadamente 50% do nitrogênio total contido nos biossólidos é utilizável pela planta no primeiro ano, podendo cair para 10 a 20% no segundo ano e, em casos de dosagens altas de biossólidos, pode haver perda de nitrogênio por lixiviação e escoamento superficial.

O nitrogênio, que provém dos dejetos e da massa microbiana dos esgotos, geralmente é um dos constituintes de maior valor agrônômico dos bio sólidos, conforme TSUTIYA (1998), podendo ser utilizado como fator limitante para a definição da dosagem máxima de bio sólido a ser aplicado no solo, pois acima de um certo nível, o nitrogênio pode lixiviar em forma de nitrato e contaminar o lençol freático.

### **Fósforo**

O fósforo, contido nos bio sólidos, provém dos dejetos dos corpos microbianos do esgoto e dos detergentes e sabões que utilizam fosfatos como aditivos. Este elemento, assim como o nitrogênio, é também um dos constituintes de importante valor agrônômico dos bio sólidos. De um modo geral, os bio sólidos contêm quantidades de fósforo ligeiramente inferiores às de nitrogênio. As plantas, entretanto, necessitam de menores quantidades de fósforo do que de nitrogênio para o seu desenvolvimento.

O fósforo está presente nos bio sólidos nas formas orgânica e inorgânica. A parcela orgânica precisa ser mineralizada para ficar disponível às plantas. Segundo BERTON (1987) apud MELO et al (2001) o fósforo apresenta-se predominantemente na forma mineral em bio sólidos digeridos anaerobiamante. Isso constitui um fator importante para a disponibilização desse elemento para as plantas, que é de 50% no primeiro ano de aplicação do bio sólido, segundo ANDREOLI (1999). O fósforo contido no bio sólido é menos solúvel no solo que os superfosfatos, mas oferece maior constância no fornecimento ao longo do tempo (MELO et al, 2001).

### **Potássio**

De um modo geral, os bio sólidos são pobres em potássio, pois esse elemento é muito solúvel na água, o que resulta em baixa concentração na fase sólida do tratamento e, conseqüentemente, na composição final do bio sólido. Entretanto, mesmo apresentando-se em baixos teores, a totalidade deste nutriente é considerada assimilável pelas plantas.

O teor de potássio presente nos bio sólidos não é suficiente para suprir as necessidades das plantas, segundo MELO et al (2001). Dessa forma, quando se

utiliza biossólido como fertilizante, deve-se tomar um cuidado todo especial com o potássio, de modo que esse nutriente não venha a faltar, com reflexos negativos na produtividade. Se houver necessidade, deve-se completar sua dosagem com a utilização de fertilizante mineral.

### **Cálcio, Magnésio e Enxofre**

Os biossólidos, normalmente, são ricos em cálcio quando se utiliza cal na etapa de condicionamento ou na de estabilização do lodo. Esses nutrientes estão presentes nos biossólidos essencialmente na forma mineral e, segundo ANDREOLI et al (1999), mesmo em pequenas aplicações de biossólidos, podem suprir as necessidades de magnésio e enxofre da maioria das culturas agrícolas.

### **Micronutrientes**

Os biossólidos apresentam, em sua composição, todos os micronutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas: zinco, ferro, cobre, manganês, boro, molibdênio e cloro, às vezes em concentrações bastante elevadas, como ocorre com o zinco e o ferro. Isso permite antever, conforme cita MELO (2000), que o biossólido seja uma excelente fonte de micronutrientes para os vegetais. Quando o biossólido é aplicado em taxas suficientes para suprir as necessidades de nitrogênio das plantas, normalmente, as necessidades de micronutrientes também são atendidas.

#### **3.4.7 Qualidade dos biossólidos submetidos a secagem térmica**

Os biossólidos, produzidos em sistemas de tratamento biológicos, podem poluir o meio ambiente devido à presença de metais pesados e de organismos patogênicos. Os processos de secagem térmica pressupõem a destruição dos organismos patogênicos, porém, não provocam nenhuma alteração no conteúdo de metais pesados. O controle de metais pesados deve ser feito por monitoramento das fontes geradoras.

### **Metais Pesados**

Segundo MALAVOLTA (1994), os metais pesados são elementos que possuem peso específico maior que  $5 \text{ g/cm}^3$  ou número atômico maior que 20. Tanto os nutrientes como os elementos tóxicos são chamados de metais pesados. É uma denominação imprópria, que engloba um conjunto heterogêneo de elementos. Vários autores



englobam sob essa designação os metais, semi-metais e, até mesmo, alguns não metais. São os principais poluentes que podem ser encontrados nos biossólidos, quando presentes em concentrações elevadas.

Os metais pesados são originários da atividade industrial e podem estar presentes nos biossólidos, pois os esgotos sanitários, recebidos nos sistemas coletores, são compostos de esgotos doméstico industrial e água de infiltração. O lançamento de efluentes industriais é regulamentado pelo artigo 19-A do Decreto 8.468 de 08 de setembro de 1976, na qual são estabelecidas as concentrações máximas de poluentes a serem observadas nas descargas industriais. Para a Região Metropolitana de São Paulo, a presença de metais pesados é o principal aspecto poluidor dos biossólidos.

Para evitar problemas de acumulação de metais pesados no solo, decorrentes da aplicação em doses elevadas, a legislação ambiental estabelece limites à sua utilização. A taxa de aplicação de biossólidos no solo, ou seja, a quantidade em toneladas (base seca) aplicadas por hectare de solo, é calculada com base na necessidade de nitrogênio da planta e no teor de nitrogênio disponível no biossólido. Entretanto, essa taxa de aplicação é limitada pela taxa de aplicação anual máxima, que é a quantidade de biossólido em toneladas (base seca) e, também, é limitada pelo teor de metais que pode ser aplicado no solo por hectare e por ano. A reaplicação de biossólidos em culturas agrícolas deve respeitar, ainda, os limites de carga acumulada, que devem ser calculados com base na soma das cargas, considerando o teor de metal no biossólido e as taxas de cada aplicação (CETESB, 1999).

### **Organismos patogênicos**

Nos esgotos sanitários, são encontrados vírus, fungos, bactérias e parasitas (helmintos e protozoários). Segundo FERNANDES (2000), a maioria dos microrganismos são inofensivos, entretanto, alguns grupos de patógenos são considerados perigosos pelo risco que representam para a saúde humana e animal. O sistema de tratamento de esgoto elimina muitos microrganismos, fazendo com que haja substancial diminuição na concentração de patógenos na fase líquida e migração para a fase sólida (lodo). O lodo bruto contém grande concentração de patógenos,

cujos níveis podem ser diminuídos pelos vários processos de estabilização e desinfecção (FERNANDES, 2000).

Conforme TSUTIYA (2000), os organismos patogênicos são inerentes aos esgotos sanitários e conseqüentemente aos biossólidos. A sua presença causa um problema potencial de poluição, na medida em que se verifica a possibilidade da sua disseminação pelo meio ambiente. A combinação de organismos patogênicos com a matéria orgânica causará outro tipo de problema ambiental, a atração de vetores. Isso pode ocorrer quando o lodo não se encontra bem estabilizado, nessas condições, o lodo pode exalar odores desagradáveis. Os vetores são os insetos, ratos e pássaros, que são os disseminadores potenciais de patógenos no ambiente.

A secagem térmica, realizada conforme os padrões estabelecidos pela CETESB P 4.230 e EPA 503, como processo de redução adicional de patógenos, elimina os organismos patogênicos. É indicada para produzir o biossólido Classe A, que não têm nenhuma restrição de uso na agricultura. A figura 3.23 - mostra o aspecto de um biossólido seco e granulado para utilização na agricultura.



Figura 3.23 - Biossólido seco e granulado para aplicação na agricultura.

Fonte: Catálogo Seghers.

### **3.4.8 Formas de utilização dos biossólidos secos na agricultura**

A aplicação do biossólido submetido a processos de secagem térmica no solo pode ser feita de três formas distintas:

- aplicação direta;
- enchimento para fabricação de fertilizantes;
- fabricação de fertilizante organomineral.

Qualquer que seja a forma de aplicação do biossólido na agricultura, é necessário que essa atividade seja regulamentada. É necessário que se fixe as condições e restrições para que os biossólidos possam ser aplicados de forma segura para a população e meio ambiente. Na norma da CETESB P 4.230 de agosto de 1999, estão definidos os procedimentos, critérios e requisitos para a elaboração de projetos de aplicação de biossólidos em áreas agrícolas, bem como sua implantação e operação.

Além dos aspectos referentes à qualidade dos biossólidos para o uso agrícola, deve-se, ainda, levar em consideração as condições do solo, as características das áreas para aplicação, as taxas de aplicação e as culturas agrícolas recomendadas. As condições do solo para uso de biossólidos devem ser monitoradas, com acompanhamento constante das quantidades de metais aplicados e acumulados ao longo do tempo.

Dentre as características das áreas agrícolas para aplicação de biossólidos, devem ser levadas em consideração a declividade da área, a facilidade de acesso durante todo o ano, a proximidade de áreas residenciais, corpos d'água, lagos, sistemas de drenagem e vias de domínio público. A norma CETESB P 4230 estabelece esses limites.

### **3.4.9 Propriedades físicas dos fertilizantes granulados**

Os fertilizantes podem existir nos estados sólido, líquido e gasoso. A forma predominantemente utilizada no Brasil é a sólida. Nesse estado, os fertilizantes podem ser encontrados na forma de pó, farelado, granulado ou mistura de grânulos. Os tamanhos de partículas, em geral, variam entre 0,5 e 4 mm, sendo a maior parte entre 1 e 3 mm. No estado líquido estão os fertilizantes utilizados em fertirrigação e adubações foliares. Os produtos que se apresentam nesse estado são subdivididos em

soluções e suspensões. No estado gasoso, forma pouco utilizada no Brasil, estão produtos como a amônia anidra, que é utilizada como fonte de nitrogênio (FERTIPAR, 2001).

A forma física de um fertilizante tem uma importância muito grande, tanto do ponto de vista agrônomo, como do manuseio do material, seja no transporte, armazenamento ou na aplicação no campo. Além das propriedades químicas relacionadas ao seu conteúdo (nutrientes), muitos dos problemas relacionados com fertilizantes são resultantes de deficiências nas propriedades físicas. Os problemas mais frequentes estão relacionados com aglomeração ou empedramento, esfarelamento ou formação de pó, baixa fluidez, segregação e excessiva higroscopicidade (UNIDO, 1980).

A preferência dos clientes por um certo fertilizante, com o mesmo conteúdo de outro, quase sempre é baseada nas propriedades físicas do produto. Boas condições físicas, que são relativamente fáceis para o usuário avaliar por uma simples observação, asseguram a ele, facilidade, rapidez, uniformidade e economia na aplicação no campo. Também nas várias etapas de manuseio, transporte e estocagem, que normalmente são envolvidas entre a produção e o uso final dos fertilizantes, é essencial que as propriedades físicas sejam tais que proporcionem boa fluidez (não empedramento), que não seja esfarelado e que resista a uma razoável exposição à umidade atmosférica. Muitas técnicas de produção, incluindo vários tratamentos para condicionamento físico, são desenvolvidas especialmente para proporcionar propriedades físicas favoráveis (UNIDO, 1980).

Conforme GOMIDE (1983), as propriedades físicas dos sólidos particulados são de duas categorias: as que só dependem da natureza das partículas e as que se associam com todo o sistema. As propriedades do primeiro tipo, que interessam para o estudo de fertilizantes são: tamanho, forma, densidade e dureza da partícula. As propriedades da segunda categoria são: densidade aparente, porosidade, permeabilidade e ângulo de repouso natural. Neste segundo caso, as propriedades passam a ser características do conjunto e não mais do sólido em si, dependem principalmente da porosidade do leito que, por sua vez, está associada com a distribuição granulométrica das partículas, além de outros fatores.

## **Granulometria**

A granulometria das partículas diz respeito à forma e, principalmente, ao tamanho das partículas. O tamanho das partículas é uma importante característica dos fertilizantes, pois todos os fenômenos que dependem do contato, como velocidade de dissolução e higroscopicidade são intensificados ou reduzidos devidos a esta característica (FERTIPAR, 2001).

O controle do tamanho das partículas varia de acordo com o tipo de produto, o método adotado de manuseio e a sua destinação final. Produtos de baixa solubilidade em água são, normalmente, finamente moídos, de modo a permitir um contato mais íntimo e, por consequência, uma dissolução mais rápida no solo, liberando nutrientes para as plantas. Por outro lado, produtos solúveis em água são, normalmente, comercializados na forma de grânulos a fim de, ao contrário, permitir uma dissolução mais lenta no solo.

A granulometria está diretamente relacionada ao fenômeno de segregação. Como o próprio nome diz, segregação é a separação e acomodação seletiva dos constituintes de um produto, motivado pela movimentação e trepidação do mesmo. A segregação pode ser causada por fatores como diferença de densidade e formato dos grânulos. A diferença de tamanho das partículas é o principal responsável por este fenômeno. A falta de uniformidade de tamanho entre as partículas pode dificultar a regulação dos equipamentos de aplicação e, por consequência, comprometer a perfeita distribuição dos fertilizantes numa área de plantio. A atual legislação brasileira de fertilizantes define normas e estabelece limites de tolerância, em termos de granulometria, para as diferentes formas de produtos (UNIDO, 1980).

## **Dureza**

A dureza da partícula, também denominada de consistência, conforme FERTIPAR (2001), refere-se à resistência dos grânulos à ação mecânica. Grânulos pouco consistentes são mais susceptíveis à quebra durante os processos de armazenamento, transporte e manuseio do produto, podendo originar partículas não uniformes em termos de tamanho, gerando, como consequência, os inconvenientes como aumento da porcentagem de pó e segregação das partículas. Os três tipos de resistência

mecânica consideradas são: resistência à compressão, resistência à abrasão e resistência ao impacto (UNIDO, 1980).

### **Fluidez**

Fluidez é a capacidade de livre escoamento do fertilizante por determinados espaços, ou seja, a eficiência da distribuição mecânica dos mesmos. No caso de fertilizantes sólidos este atributo, está relacionado com a higroscopicidade, uniformidade de tamanho e forma das partículas (FERTIPAR, 2001).

### **Densidade**

No caso de fertilizantes sólidos, a variação de densidade das partículas tem influência na segregação do produto, porém, como mencionado anteriormente, não é o principal responsável por esse fenômeno. Em fertilizantes sólidos, a densidade aparente é definida como o peso por unidade de volume incluindo os espaços vazios existentes entre os grânulos (FERTIPAR, 2001).

### **Higroscopicidade**

Conforme FERTIPAR (2001), é a tendência que os materiais apresentam de absorver umidade do ar atmosférico. Cada fertilizante, simples ou mistura, possui um valor máximo de umidade relativa do ar na qual pode ser exposto. Acima desse valor, absorverá, espontaneamente, a umidade do ar. Em outras palavras, é a umidade de equilíbrio do material ou umidade relativa crítica, conforme chamado por FERTIPAR (2001) e UNIDO (1980).

Um fertilizante úmido apresenta vários inconvenientes como: queda no teor de nutrientes, menor resistência das partículas (dureza), além de dificultar o seu manuseio e distribuição.

O conhecimento da umidade de equilíbrio de um fertilizante, além de ser um indicador dos cuidados a serem tomados para o seu manuseio e armazenagem, determinará o tipo de sacaria necessária para o seu acondicionamento e a compatibilidade de determinada mistura (FERTIPAR, 2001).

## **Empedramento**

É fundamental que durante o armazenamento de um fertilizante, o mesmo permaneça solto ou que o empedramento seja o menor possível, de modo que a sua fluidez seja rapidamente restabelecida com o menor esforço possível.

O empedramento dos sólidos particulados, na maioria dos casos, é causado pelo crescimento de pontes cristalinas entre as partículas dos produtos, formando uma massa de dimensões muito maiores que a das partículas originais (UNIDO, 1980). Esses cristais se formam durante o período de armazenamento, por efeitos térmicos e reações químicas internas, entre os sais e a umidade remanescente do processo de fabricação, que tem um grande efeito na tendência de empedramento do material. Materiais com tamanhos de partículas relativamente grandes (granulados), sem a presença de finos, têm menor número de pontos de contato entre as partículas, e conseqüentemente, a tendência a empedramento é menor.

As propriedades físicas, necessárias para o bio sólido seco, dependem da forma ou método que se pretende para seu armazenamento e aplicação no campo. A aplicação direta, com os mesmos equipamentos utilizados para aplicação de fertilizantes químicos, requer que o material tenha granulometria semelhante à dos fertilizantes. A utilização do bio sólido como carga em fertilizantes minerais orgânicos ou granulados complexos, quando embalados em sacos, requer que o material tenha dureza suficiente para resistir ao empilhamento sem se esfarelar. Para o armazenamento em silos, é preciso que o material tenha umidade suficientemente baixa para evitar aglomeração ou empedramento. Este campo, enfim, especialidade da área de manuseio de materiais, é bastante vasto e merece estudo específico.

## 4 SECADOR DE LODOS DA ETE SÃO MIGUEL NA RMSP

### 4.1 Generalidades

A solução visualizada no desenvolvimento do Plano Diretor de Esgotos Sanitários da RMSP (COPLADES/1988), para disposição final dos lodos gerados nas ETES da região, foi a utilização de aterros sanitários exclusivos. Entretanto, essa solução se mostrou insuficiente face às escassas áreas disponíveis na região para comportar o grande volume de produção. A CETESB e a Secretaria do Meio Ambiente, em seus pareceres sobre o plano diretor de esgotos, recomendaram o estudo de alternativas possíveis de uso ou destinação do lodo que contemplassem seu aproveitamento na agricultura (CEEJ, 1998).

Esse estudo levou à elaboração do Plano Diretor de Uso/Disposição dos Lodos das ETES da RMSP, que foi desenvolvido para a Sabesp pelo consórcio ETEP-ESTÁTICA-JNS (CEEJ) em 1998. Nele, foram estudadas várias alternativas de disposição final para os lodos gerados, tais como a disposição em aterro sanitário exclusivo de tortas desidratadas e secas, incineração e secagem para aplicação na agricultura.

Conforme o Plano, as cinco estações de tratamento de esgotos da Sabesp, na RMSP, deverão produzir cerca de 748 toneladas diárias, em base seca, no ano de 2015. A Tabela 4.1 apresenta a evolução da produção de lodos até o final do plano, nessas ETES.

Tabela 4.1 – Produção de lodos nas ETES da Sabesp na RMSP.

ANO	PRODUÇÃO DE LODOS (ts/d)					
	Barueri	Suzano	ABC	S.Miguel	P.N.Mundo	Total
2000	133,18	13,87	47,16	23,22	77,99	295,41
2005	221,10	21,95	79,64	52,64	164,62	539,94
2010	286,38	31,50	103,08	70,56	219,37	710,89
2015	303,07	31,50	105,71	76,67	231,49	748,44

Fonte: CEEJ (1998).



Com base nas recomendações do Plano Diretor de Lodos, a Sabesp adquiriu e instalou uma central de secagem térmica de lodos na ETE São Miguel. Esse sistema deverá receber os lodos desidratados das ETEs São Miguel, Parque Novo Mundo e Suzano com teores de sólidos entre 30 e 50 %, promover a secagem térmica e fornecer um produto seco com teor de sólidos igual ou superior a 90%, com granulometria entre 2 a 4 mm.

#### 4.2 Descrição do processo de secagem térmica

O secador de lodos instalado pela Sabesp, fabricado pela Seghers - Better Technology, é do tipo indireto, de soleiras múltiplas, com capacidade de evaporação de água de 6 toneladas por hora. O calor é fornecido às soleiras através de óleo térmico aquecido em uma caldeira, pela queima de gás natural ou biogás. A Figura 4.1 apresenta um diagrama esquemático do processo de secagem.

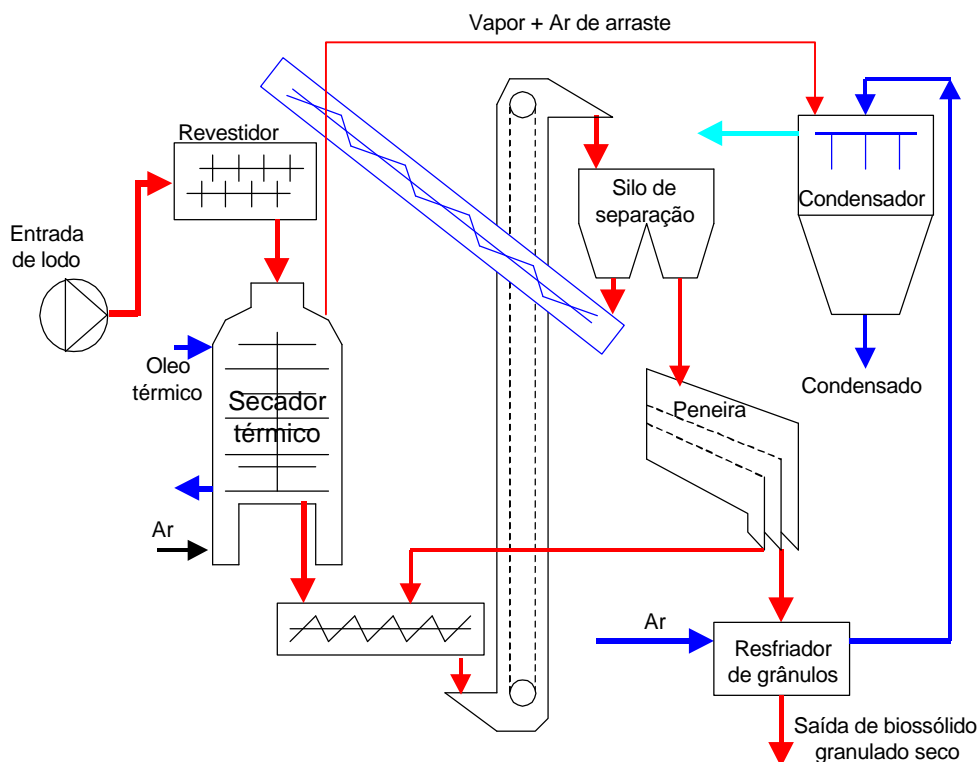


Figura 4.1 – Esquema da secagem térmica de lodos da ETE São Miguel.

Fonte: SEGHERS (2001).

O lodo produzido na ETE São Miguel, desidratado no filtro prensa, é diretamente transportado para o silo de entrada do sistema de secagem. Os lodos proveniente das ETEs Parque Novo Mundo e Suzano são recebidos nos poços de recebimento e armazenados nos silos de entrada. Há um silo de entrada para os lodos de cada ETE, de forma a possibilitar a secagem dos lodos separadamente, não havendo a mistura de lodos de diferentes ETEs.

A massa de lodo desidratado é levada por transportadores de roscas até o revestidor de lodos, situado no topo do secador. Nesse equipamento, o lodo úmido é misturado aos grânulos secos reciclados no processo, recobrimo-os e aumentando seus tamanhos. A Figura 4.2 apresenta, de uma forma esquemática, um grânulo de lodo em processo de formação, durante a operação de secagem.

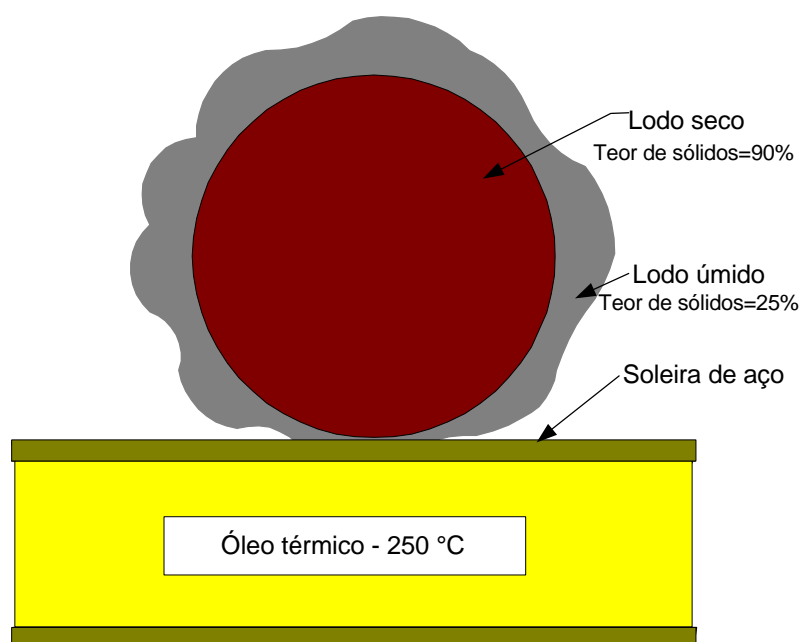


Figura 4.2 – Grânulo de lodo em processo de formação.

Fonte: Catálogo da Seghers.

A característica marcante do processo de revestimento e secagem em camadas é que a camada úmida exterior do grânulo de lodo, que recobriu o grânulo menor recirculado, é seca por contato com a bandeja quente. Devido à ação de aragem dos braços dos raspadores, as partículas de lodo são misturadas e reviradas continuamente, o que resulta, segundo a Seghers, numa elevada eficácia de secagem

e evita o superaquecimento localizado do lodo. Este processo de secagem forma grânulos com um diâmetro médio de 2 a 4 mm e um conteúdo de sólidos secos superior a 90 % (SEGHERS, 2001).

Os grânulos de lodo revestidos são introduzidos no secador pela parte superior, onde caem sobre um cone que distribui o fluxo, de forma uniforme, sobre a bandeja superior. Por intermédio de um mecanismo de raspadores, ligado a um eixo rotativo central, o lodo é movido sobre a bandeja superior e empurrado para a borda externa, de onde cai para a segunda bandeja. Os braços de raspagem em rotação contínua movem o lodo do exterior para o interior desta bandeja, de onde cai novamente para a bandeja seguinte. A Figura 4.3 apresenta uma vista interna do secador, onde se destacam os raspadores.



Figura 4.3 – Vista interna do secador de lodos da ETE São Miguel.

Desta forma, o lodo é transportado de bandeja para bandeja até atingir a bandeja inferior, de onde é descarregado seco.

Os grânulos de lodo seco, recolhidos na parte inferior do secador, são transportados para um silo de separação por intermédio de um elevador de canecas. A partir do silo de separação, uma parte dos grânulos é encaminhada para o revestidor de lodo para

recirculação no processo, o restante é transferido para a classificação e armazenamento.

O grânulos produzidos, ao deixarem o silo de separação, são resfriados para uma temperatura inferior a 40°C no resfriador vibratório e descarregados no classificador, constituído de uma peneira vibratória com 4 níveis de separação.

Os grânulos maiores, com diâmetro entre 4 e 10 mm, são separados e enviados para o britador, onde são triturados. As partículas pequenas, com diâmetro inferior a 2 mm, são adicionadas às frações trituradas e encaminhadas ao ciclo de recirculação. As partículas inesperadas ou objetos com diâmetros superiores a 10 mm são desviados para um recipiente de rejeitos. Os grânulos de tamanhos intermediários, diâmetros entre 2 e 4 mm, são transferidos para os silos de armazenamento de grânulos secos. Há um silo para cada ETE.

### **4.3 Descrição do secador de lodos**

O secador de lodos da instalação de secagem térmica de São Miguel, projetado e fabricado pela Seghers - Better Technology, é constituído pelas seguintes partes principais: estrutura suporte, corpo, bandejas (conjunto de 21 peças), eixo central, braços de raspagem, mancais, conjunto motriz, coletores de óleo e compensadores.

#### **Estrutura suporte**

É uma estrutura tubular soldada com 10 colunas. Na extremidade superior, as colunas são ligadas entre si para constituir uma estrutura fechada rígida. Em cima de cada coluna existe um suporte deslizante, com exceção do ponto fixo. Estes suportes deslizantes permitem que o chassis do secador se expanda e contraia por ação das variações de temperatura. Cada um dos suportes é montado sobre placas separadas, que podem ser calçadas para ajuste da altura.

#### **Corpo**

Constitui o ambiente fechado para a formação da atmosfera de secagem, além de funcionar como estrutura de suporte para os diferentes elementos do secador, como as bandejas e o eixo dos raspadores. É constituído de uma estrutura cilíndrica

fechada, feita de chapas de aço de 10 mm de espessura e reforçada com perfis de aço. Na parte superior estão posicionados o revestidor e misturador de grânulos, os flanges de entrada do lodo e de saída do vapor. Na parte inferior, estão os flanges de saída dos grânulos secos, os mancais e vedantes do eixo. Entre os níveis das bandejas, existem portas de visita, lâmpadas e visores para inspeção. Os orifícios para as ligações de óleo das bandejas são montados na lateral do corpo. A Figura 4.4 mostra o corpo do secador em fase de montagem.

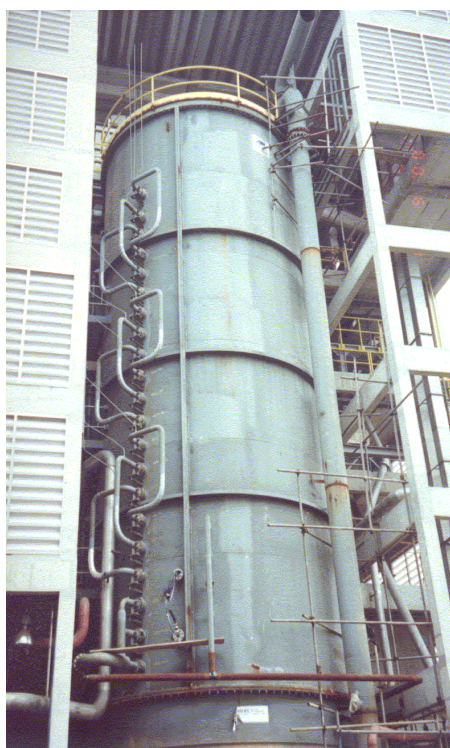


Figura 4.4 – Corpo do secador de lodos da ETE São Miguel em fase de montagem.

### **Bandejas**

Constituem as superfícies de evaporação do secador. Os grânulos de lodo rolam sobre as mesmas retirando o calor fornecido pelo óleo térmico, que entra pela parte inferior. A bandeja é construída com chapas de aço soldadas. São duas placas circulares montadas uma sobre a outra com um contorno fechado, separadas por peças concêntricas que criam uma trajetória para o fluxo de óleo. Existem dois tipos de bandejas: a primeira, com um diâmetro externo de 5.200 mm, no qual o produto é conduzido da borda externa para o centro e a segunda, com um diâmetro externo de

4.800 mm, na qual o produto é conduzido do centro para a borda externa. A Figura 4.5 apresenta uma vista interna do secador, onde podem ser observados as bandejas e os raspadores de lodo.



Figura 4.5 – Bandejas de secagem e raspadores de lodo do secador de lodos da ETE São Miguel.

### **Eixo e braço de raspagem**

O eixo é o suporte dos braços de raspagem. Formam o conjunto responsável pelo deslocamento do lodo dentro do secador. O eixo é uma estrutura tubular de aço, montada em posição vertical, com suportes para fixação dos braços raspadores. Os braços de raspagem são feitos de perfis de aço retangulares, com lâminas de raspagem nele fixadas por parafusos, com possibilidade de regulagem. As lâminas são montadas de forma a direcionar o deslocamento do lodo para a borda externa e para o centro, conforme o caso.

### **Mancais**

Os mancais suportam as forças horizontais e verticais do eixo e asseguram a rotação deste com baixa fricção. São dois mancais distintos, um radial e outro axial trabalhando em conjunto. O topo do eixo é fixado por uma bucha deslizante, feita de material resistente a pó e vapor, que encarrega-se apenas de forças radiais.

### **Conjunto motriz**

O conjunto motriz é constituído de motor elétrico e caixa de transmissão. A montagem ao eixo é feita por acoplamento hidráulico que proporciona partida suave e segurança contra sobrecargas.

### **Coletores de óleo**

Os coletores de óleo dividem o fluxo de óleo térmico entre as bandejas. São constituídos por tubos horizontais ligados aos invólucros das bandejas e tubos verticais que fazem a interligação entre as bandejas. Em todas as ligações existem compensadores para as expansões.

#### **4.4 Tratamento de vapor**

Um exaustor succiona os vapores do secador, mantendo-o a uma pressão levemente negativa. O fluxo de vapor, que sai do secador através de uma abertura no topo, consiste de, no máximo, 10% de ar e 90% de vapor em volume. Os vapores são resfriados a temperatura de 50°C e condensados num condensador de contato direto. Os não condensáveis fluem para a caldeira de óleo térmico, onde são termicamente destruídos, resultando em uma operação isenta de odores.

Somente uma pequena quantidade de ar é admitida dentro do secador. A atmosfera acima do lodo em processo de secagem compõe-se, principalmente, de vapor, de modo que não seja possível a auto-ignição do lodo seco.

#### **4.5 Sistema de óleo térmico**

O óleo térmico, que faz a transferência de calor para o lodo através das bandejas, é aquecido em uma caldeira. A operação da caldeira pode ser feita através da queima de gás natural, biogás ou ainda, de ambos os combustíveis.

Para a circulação do óleo térmico, são utilizadas duas bombas centrífugas, uma das quais, em modo de espera. Um tanque de expansão permite a expansão térmica do óleo e a saída de ar e água durante a partida do sistema.

O óleo térmico entra no secador a uma temperatura entre 250 e 280°C e sai a aproximadamente 230°C. O controle da condição de funcionamento do aquecedor é feita pelo controle da temperatura do óleo, de forma a proporcionar a quantidade correta de energia térmica para seu funcionamento eficiente.

O volume de óleo térmico no sistema é de aproximadamente 27 m<sup>3</sup>. O abastecimento do circuito é realizado através de um reservatório de armazenamento de óleo e uma bomba de abastecimento. O volume deste armazenamento permite esvaziar o conteúdo do secador e das linhas de óleo em caso de necessidade. A Figura 4.6 apresenta uma vista da caldeira de óleo térmico.



Figura 4.6 – Caldeira de óleo térmico do secador de lodos da ETE São Miguel.

#### **4.6 Qualidade dos biossólidos granulados**

O tempo de residência do lodo em uma passagem através do secador é de aproximadamente 10 minutos. O número médio de passagens de um grânulo de lodo através do secador, segundo a Seghers, é de 5 a 7 vezes, devido à recirculação do material. Dessa forma, o tempo total médio de exposição do lodo ao calor é de 50 a 70 minutos, assegurando, assim, segundo a Seghers, que os organismos patogênicos sejam destruídos até os níveis de detecção dos mesmos.



Devido ao movimento de rolamento do lodo sobre as bandejas do secador, os grânulos de lodo seco ganham uma forma esférica regular. Na saída do sistema de secagem os grânulos possuem tamanho aproximado de 3 mm, sendo a faixa de distribuição granulométrica, de 2 a 4 mm, garantida pela peneira classificadora para 90% do material. Todo o produto final fica na forma granulada, sem a presença de pó ou materiais particulados finos.

A formação dos grânulos em várias etapas, pela recirculação no processo, faz com que uma fina camada de lodo seja depositada ao redor de um núcleo duro e seco a cada ciclo, tornando o grânulo final bastante compactado e duro. Segundo a Seghers, a dureza das pelotas de lodo formadas por esse processo é de 50 a 60 N, ligeiramente mais alta que a dureza das partículas dos fertilizantes comerciais.

Outro aspecto importante, que também está associado ao processo de formação da pelota durante a secagem, é que a densidade específica da pelota se torna alta, com baixa porosidade na massa do material aglomerado. Esse aspecto assegura a característica de baixa higroscopicidade ao produto final granulado, o que lhe confere boa resistência à absorção da umidade do ar ambiente, não requerendo, portanto, muitos cuidados no controle da umidade do ambiente de armazenamento.

As características conferidas ao lodo pelo processo de secagem e granulação em uma única operação, conforme a Seghers, são:

- produto final granulado em forma esférica com diâmetro de 2 a 4 mm;
- dureza do grânulo superior a 50 N;
- isenção de pó e material particulado fino;
- baixa higroscopicidade.

Essas características conferem ao material os aspectos de qualidade necessários ao seu manuseio e aplicação na agricultura.

As características químicas do produto final são inerentes ao próprio lodo. Entretanto, alguma parcela de nitrogênio poderá se volatilizar durante a secagem, o que diminuirá sua qualidade para aplicação na agricultura. Esse aspecto precisará ser avaliado quando o equipamento estiver a pleno funcionamento.

#### 4.7 Aspectos de segurança operacional

Um aspecto muito importante da segurança operacional do secador é a sua característica de transferência de calor de forma indireta. Não há fluxo de ar forçado dentro do equipamento. Isso permite que a concentração de oxigênio, dentro do secador, seja muito pequena, impossibilitando a auto-ignição do material, evitando-se, assim, os riscos de incêndio e explosão.

O secador é equipado, ainda, com um sistema de inertização de fogo por injeção de nitrogênio. Esse sistema é capaz de encher o equipamento com nitrogênio em caso de combustão no interior do secador. O sistema possui 3 níveis de injeção, que são dependentes da temperatura no interior do equipamento.

O silo de separação, na saída do secador, também é protegido pelo sistema de inertização por nitrogênio. Nesse local há um armazenamento temporário de grânulos de lodo quentes, ocorrendo, portanto, uma situação de perigo potencial.

O sistema de secagem possui elevado nível de automatização, com equipamentos de detecção de falhas em todos os sub-sistemas e componentes como motores e bombas. Caso ocorra falha na alimentação de lodos, recirculação de grânulos, condicionamento de grânulos ou tratamento de vapor, o secador entra, imediatamente, em modo de resfriamento. Caso ocorra falha em componentes do sistema de movimentação do lodo, todo o equipamento de transporte a montante desse ponto pára imediatamente. Em todos esses casos, um sinal de falha é gerado e enviado ao painel de controle para providências do operador.

A temperatura dos grânulos é monitorada constantemente em várias partes do sistema. Existem 3 níveis de alarme de temperatura elevada. No primeiro nível, o sistema de proteção limita-se a avisar o operador para a realização de ajustes. No segundo nível, além de avisar o operador, o sistema de proteção inicia o resfriamento do secador, mantendo a recirculação e alimentação de lodo. No terceiro nível, que indica risco de incêndio, todos os sub-sistemas param, o óleo térmico é resfriado, a chaminé de emergência é aberta e inicia-se a injeção de nitrogênio nos pontos de risco.

Há, ainda, outros parâmetros de monitoração que visam a segurança operacional do sistema, como:

- elevada pressão no filtro de mangas;
- baixo nível de material no silo;
- baixo nível de óleo térmico no reservatório de expansão.

#### **4.8 Parâmetros de secagem de lodos na ETE São Miguel**

O secador de lodos da ETE São Miguel foi dimensionado para as condições apresentadas a seguir:

Condições de projeto:

- Capacidade de evaporação de água: 6000 kg/h;
- Conteúdo de sólidos disponível: 34,1 % - (30 a 50%);
- Temperatura ambiente: 18 °C;
- Umidade relativa: 80 %;
- Teor de sólidos no lodo seco: 90%;
- Produção de lodo granulado: 3658 kg/h;
- Disponibilidade operacional: 7000 h/ano.

Os consumos esperados de energia no processo de secagem são:

- Consumo específico de energia: 2816 kJ/kg(água evaporada);
- Consumo de biogás (22175 kJ/Nm<sup>3</sup>): 7900 Nm<sup>3</sup>/dia;
- Consumo de gás natural (37928 kJ/Nm<sup>3</sup>): 7865 Nm<sup>3</sup>/dia;
- Consumo de energia elétrica: 58 kWh/t(água evaporada);

O secador de lodos/biossólidos da Sabesp, instalado na ETE São Miguel, vai produzir o biossólido seco e granulado para possibilitar a aplicação na agricultura como biossólido Classe A. Por ser a primeira instalação dessa natureza na Sabesp, espera-se que venha contribuir significativamente no fornecimento de parâmetros para utilização de forma benéfica. O material que não possuir as características próprias para aplicação na agricultura ou que não atingir os parâmetros de qualidade necessários, será disposto em aterro sanitário isento da umidade, o que contribuirá para diminuir a vida útil do aterro.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

A experiência realizada neste estudo foi o levantamento da curva de umidade de equilíbrio do lodo gerado na ETE Barueri da Sabesp, que opera pelo processo de lodo ativado convencional e possui capacidade de tratamento de 9,5 m<sup>3</sup>/s.

A produção atual de lodo na ETE Barueri situa-se entre 220 e 250 toneladas por dia, com teor de sólidos entre 25 e 33%. A disposição final desse lodo está sendo feita no aterro sanitário Bandeirantes, pertencente à Prefeitura Municipal de São Paulo e distante aproximadamente 36 km da ETE Barueri.

### **5.1 Levantamento da curva de umidade de equilíbrio**

A curva de umidade de equilíbrio tem uma importância muito grande na secagem de materiais, pois determina os valores das umidades contidas no material, que ficam em equilíbrio com a umidade relativa do meio no qual esse material está submetido.

O método utilizado para a determinação dos valores da umidade de equilíbrio do lodo consistiu na colocação de amostras do material, inicialmente seco, dentro de câmaras com umidades conhecidas e controladas e, posteriormente, na medição das massas de água absorvidas do ar ambiente pelas amostras no decorrer do tempo até o atingimento dos pontos de equilíbrio, ou seja, os pontos em que o material não absorvia mais umidade dos ambientes a que estavam condicionados.

Com os valores medidos das massas das amostras de lodo, calculou-se os teores de umidade e de sólidos, em suas evoluções ao longo do tempo, para cada ambiente com umidade controlada. Com os valores de umidade do sólido no ponto de equilíbrio para cada valor de umidade relativa do ar ambiente, construiu-se a curva de umidade de equilíbrio do lodo.

O experimento foi realizado nos dois sentidos, ou seja, com o material inicialmente seco ganhando massa de água do ar ambiente e com o material inicialmente úmido cedendo massa de água para o ar ambiente. Dessa forma foram levantadas as curvas de umidade de equilíbrio do lodo em processo de sorção e dessorção de umidade para temperatura ambiente, mantida na faixa de 20 a 25°C.

## 5.2 Materiais utilizados nos experimentos

Para a realização destes experimentos, foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- estufa de secagem;
- forno mufla;
- balança analítica de precisão;
- dessecadores;
- cápsulas de porcelana de 130 mL;
- espátula;
- becker de 1000 mL;
- proveta de 500 mL.

## 5.3 Preparação das câmaras com umidades controladas

O método utilizado para a formação das câmaras com umidades controladas foi a utilização de dessecadores contendo, em seus interiores, soluções saturadas de sais, cujas atividades de água são conhecidas. A atividade de água de uma solução saturada de sal é a relação entre a pressão de vapor da solução e a pressão de vapor da água pura na mesma temperatura. Particularmente para estes experimentos, é a umidade relativa que se formará dentro da câmara fechada contendo a solução saturada de sal. Conforme LABUZA (1984), o método considerado mais adequado para a formação de câmaras com umidades controladas é com a utilização de soluções saturadas de sais, pois estas podem liberar ou sorver água sem sofrerem alteração significativa de suas atividades de água.

Cada solução saturada de sal provoca a formação, dentro da câmara fechada, de um ambiente com umidade relativa bem definida e conhecida, conforme apresentado nas Tabelas 3.6 e 3.7.

### 5.3.1 Sais utilizados

Dentre os sais da lista apresentada nas Tabelas 3.6 e 3.7, foram escolhidos 6 sais cujas atividades de água cobrem a faixa de umidade relativa de 32,7 a 93,6%.

STOLOFF (1978) recomenda utilizar 5 ou mais sais. A Tabela 5.1 apresenta os seis sais utilizados, bem como, os valores das umidades relativas proporcionadas pelos ambientes, nos quais as soluções saturadas desses sais estão confinadas.

Tabela 5.1 – Sais utilizados nas experiências.

Sal		Umidade relativa (%)
Fórmula	Denominação	
MgCl <sub>2</sub>	Cloreto de magnésio	32,8
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Carbonato de potássio	43,2
NaBr	Brometo de sódio	57,6
NaCl	Cloreto de sódio	75,3
KCl	Cloreto de potássio	84,3
KNO <sub>3</sub>	Nitrato de potássio	93,6

Fonte: Adaptado de STOLOFF (1978).

Para a realização destes experimentos, foram utilizados sais puros do tipo PA (para análise), nas quantidades de 1 kg de cada sal. A Figura 5.1 mostra os sais utilizados em suas embalagens originais.



Figura 5.1 – Sais utilizados nas experiências nas embalagens originais.

### 5.3.2 Preparação das soluções

De cada sal da lista apresentada na Tabela 5.1, foi colocado 1 kg dentro de um dessecador. Em cada dessecador, foi acrescentada, aos poucos, água destilada previamente aquecida à temperatura de aproximadamente 40°C, nas quantidades descritas na Tabela 5.2. A solução foi sendo vigorosamente mexida à medida que a água era acrescentada. O motivo de se utilizar água destilada aquecida foi para garantir que a solução ficasse saturada, mesmo com a queda e equilíbrio da temperatura interna com a temperatura ambiente.

Tabela 5.2 – Preparação das soluções saturadas de sais.

Sal	Umidade relativa (%)	Quantidades	
		Sal (kg)	Água (mL)
MgCl <sub>2</sub>	32,8	1,0	125
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	43,2	1,0	450
NaBr	57,6	1,0	400
NaCl	75,3	1,0	300
KCl	84,3	1,0	400
KNO <sub>3</sub>	93,6	1,0	400

Fonte: Adaptado de SPIESS e WOLF (1987).

As soluções saturadas de sais ficaram na forma final de pasta, algumas contendo um excesso de cristais, sobretudo aquelas com atividade de água mais baixas. Todo o fundo do recipiente ficou coberto com a solução, com uma fina camada de líquido sobre a pasta de sal nas soluções de atividade de água mais altas. Após a preparação das soluções, foram colocadas as placas separadoras e os dessecadores foram tampados e deixados em ambiente com temperatura de 25°C, a espera das amostras de lodo. A Figura 5.2 mostra a preparação de uma solução em um dessecador.



Figura 5.2 – Preparação de solução saturada de sal.

#### **5.4 Preparação das cápsulas**

Foram utilizadas 35 cápsulas de porcelana para este experimento, 5 para cada recipiente contendo as soluções saturadas de sais. As cápsulas, já identificadas, foram lavadas, secas em estufa a 104 °C e submetidas a calcinação em forno mufla por duas horas a 550 °C. Suas massas (taras) foram medidas após completo esfriamento no interior de dessecadores e identificadas como  $P_0$ . Os valores das massas medidas das cápsulas estão descritos nos anexos A e B.

#### **5.5 Coleta e preparação das amostras**

As amostras de lodo, para a realização destes experimentos, foram coletadas na saída do filtro prensa de placas da ETE Barueri, na forma de pedaços de torta desidratada. O material coletado foi acondicionado em sacos plásticos e levado para o laboratório.

As tortas foram quebradas e homogeneizadas dentro do próprio saco plástico, manualmente e com o auxílio de uma espátula, de modo a ficar na forma de pequenas pelotas ou grânulos, com dimensões variadas, porém situando-se entre 5 e 10 milímetros.



Com uma colher, as amostras de lodo foram colocadas nas cápsulas de porcelana previamente preparadas, aproximadamente 40 a 50 g em cada cápsula. A Figura 5.3 mostra a preparação das amostras nas cápsulas.



Figura 5.3 – Preparação das amostras de lodo para secagem.

As massas das cápsulas contendo as amostras de lodo desidratado, ainda com umidade, foram medidas e identificadas por P<sub>1</sub>.

### 5.6 Secagem das amostras

As cápsulas contendo as amostras de lodo foram colocadas em estufa a 104 °C e deixadas por 24 horas para eliminação de toda umidade contida no lodo, conforme o procedimento para determinação de sólidos totais (PIVELI, 1996). A Figura 5.4 mostra as cápsulas contendo amostras de lodo em processo de secagem na estufa.

Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa e colocadas em dessecadores contendo sílica gel para esfriamento, até a temperatura se igualar à temperatura ambiente. O tempo de espera foi de aproximadamente 2 horas. Após o completo esfriamento, as massas das cápsulas, contendo as amostras secas, foram medidas e identificadas por P<sub>2</sub>. A Figura 5.5 mostra a pesagem e a acomodação das cápsulas dentro dos dessecadores.



Figura 5.4 – Amostras de lodo na estufa de secagem.



Figura 5.5 – Pesagem e acondicionamento das amostras de lodo nos dessecadores.

Em cada câmara com umidade controlada, foram colocadas 5 cápsulas contendo amostras de lodo seco sobre as placas separadoras. As câmaras foram tampadas e mantidas em uma sala fechada à temperatura ambiente.

### **5.7 Acompanhamento da absorção de umidade**

Após um tempo de permanência de 8 horas no interior das câmaras, as massas das amostras foram novamente medidas e, em seguida, devolvidas para o mesmo lugar no interior das câmaras. Essa massa foi identificada como  $P_3$ .

O mesmo procedimento foi executado após 1 dia do início do experimento, com as pesagens sendo identificadas por  $P_4$ . Para as pesagens seguintes, o intervalo de tempo entre as medições foi ampliado para dois dias, pois a velocidade de absorção de umidade diminui à medida que o teor de umidade do material aumenta e se aproxima da umidade de equilíbrio com o meio. As medições seguintes das massas do lodo em processo de absorção de umidade foram identificadas por  $P_5$  a  $P_{11}$ .

Os valores medidos das massas das cápsulas vazias, bem como das amostras de lodo úmido, seco e em processo de sorção de umidade ( $P_0$  a  $P_{11}$ ), estão apresentados no Anexo A. Para cada valor de massa de amostra de lodo medido, foram calculados o teor de sólidos, a umidade em base seca e a umidade em base úmida (equações 3.1 a 3.7).

### **5.8 Curva de dessorção de umidade**

Com o objetivo de verificar a histerese no comportamento de sorção e dessorção de umidade, foram medidas, também, as perdas de umidade do lodo úmido (desidratado na forma de torta), quando submetido aos meios com umidades relativas conhecidas.

Os meios com umidades relativas controladas, para as medições de dessorção de umidade, foram os mesmos utilizados para a medição da sorção de umidade, conforme descrito nas Tabelas 5.1 e 5.2.

As amostras de lodo apenas desidratado foram preparadas da mesma forma descrita no item 5.5. Após a medição das massas, foram posicionadas no interior das câmaras com umidade controlada e deixadas para secagem natural em cada ambiente. Do lote

de lodo preparado, algumas amostras foram secas em estufa para determinação do teor de sólidos.

O acompanhamento da dessorção de umidade foi feito da mesma forma que o da sorção. A primeira medição de massa foi realizada após 8 horas do início do experimento e a segunda, após 24 horas. As demais medições foram realizadas com intervalos de tempo maiores, de 2 ou 3 dias, pois a velocidade de secagem diminui à medida que a umidade do material se aproxima da umidade de equilíbrio.

As identificações das pesagens,  $P_3$  a  $P_{11}$ , foram as mesmas do experimento com sorção de umidade. O intervalo de tempo entre as pesagens foi sendo gradativamente ampliado, à medida que se observava a lenta variação das massas das amostras, principalmente para os ambientes com umidades relativas mais altas.

A pesagem  $P_2$ , para determinação da massa de sólidos secos, foi realizada ao final do período de secagem natural nas câmaras com umidades relativas controladas.

## 6 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos de sorção e dessorção da umidade do lodo foram realizados no laboratório da ETE Barueri da Sabesp, em duas etapas distintas. A primeira consistiu na medição do comportamento do lodo quanto à sorção de umidade do ambiente em que estava condicionado. A segunda consistiu na medição do comportamento do lodo quanto à dessorção de umidade.

Na etapa de sorção de umidade foram utilizadas 5 amostras de lodo para cada ambiente com umidade controlada. Os resultados apresentados no Anexo A referem-se à média das 5 amostras. A Figura 6.1 apresenta, como ilustração, a evolução dos teores de sólidos das 5 amostras de lodo condicionadas no ambiente de umidade relativa de 75,3%, que é um valor bastante comum para umidade relativa. Para ambientes com outros valores de umidade relativa, o comportamento da sorção de umidade entre as amostras foi praticamente idêntico, por isso, foi utilizada a média simples dos valores calculados dos teores de sólidos para a apresentação desses resultados.

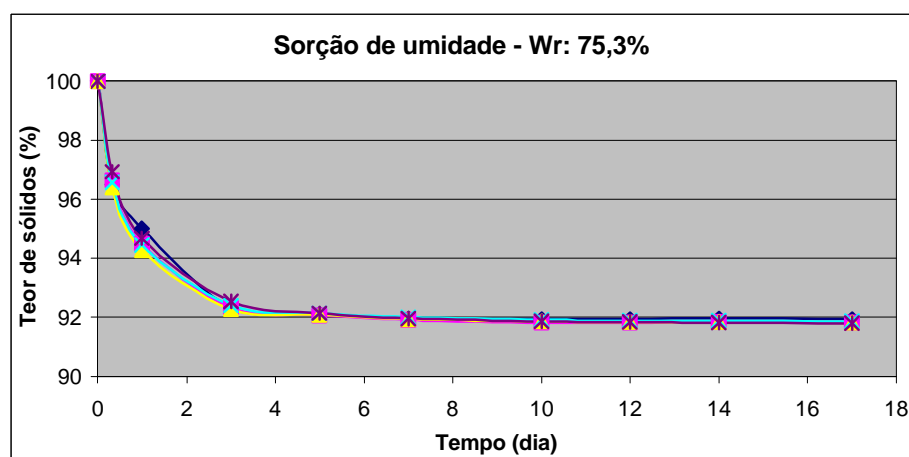


Figura 6.1 – Evolução do teor de sólidos das amostras de lodo em processo de sorção de umidade.

O comportamento da sorção de umidade foi praticamente idêntico entre as amostras durante a primeira etapa dos experimentos. Por isso, na segunda etapa, experimentos com dessorção de umidade, foram utilizadas apenas 3 amostras para cada ambiente com umidade controlada. Os valores dos teores de sólidos apresentados, dessa etapa

de medições, também referem-se à média simples das 3 amostras. A Figura 6.2, também como ilustração, mostra a evolução do teor de sólidos das 3 amostras de lodo no experimento com dessorção de umidade em ambiente com umidade relativa de 75,3%. Para as outras umidades relativas o comportamento entre as amostras foi semelhante, os valores estão apresentados no Anexo B.

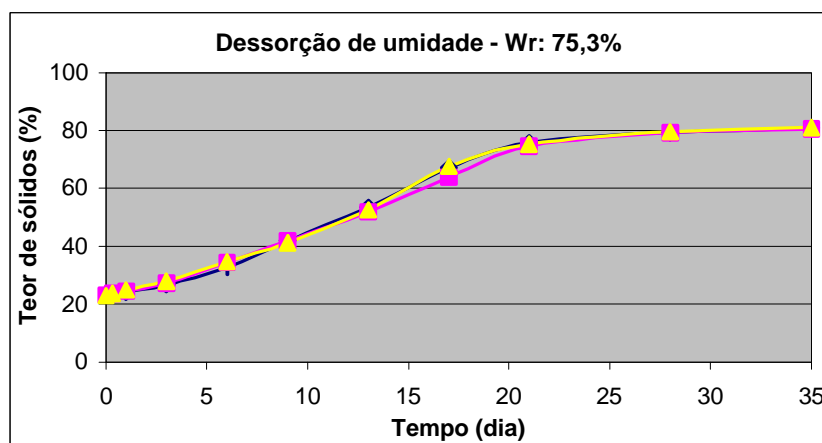


Figura 6.2 - Evolução do teor de sólidos das amostras de lodo em processo de dessorção de umidade.

### 6.1 – Experiência com sorção de umidade

Os resultados das medições das massas das amostras de lodo, efetuadas no decorrer dos experimentos com sorção de umidade, estão apresentados no Anexo A. Para cada valor de massa medido, foi calculado o teor de sólidos. Estes valores também estão apresentados no Anexo A. A evolução dos teores de sólidos, ao longo do tempo até o equilíbrio, foi representada em um gráfico, com teor de sólidos (em porcentagem) na ordenada e tempo (em dias) na abscissa. Dessa forma, para cada umidade relativa do ambiente, foi construído um gráfico com a curva de sorção de umidade. Esses gráficos estão apresentados no Anexo A.

A sorção de umidade do lodo, seco na estufa de secagem do laboratório, teve comportamento semelhante em cada ambiente onde foi condicionado, diferindo apenas no tempo de estabilização da umidade e no valor do teor de sólidos estabilizado.

A Figura 6.3 apresenta as curvas de sorção de umidade das amostras de lodo submetidas aos ambientes com umidades relativas conhecidas e controladas. Na ordenada, foram colocados os valores dos teores de sólidos (TS) em porcentagem e na abscissa, o tempo decorrido no processo de sorção de umidade em dias.

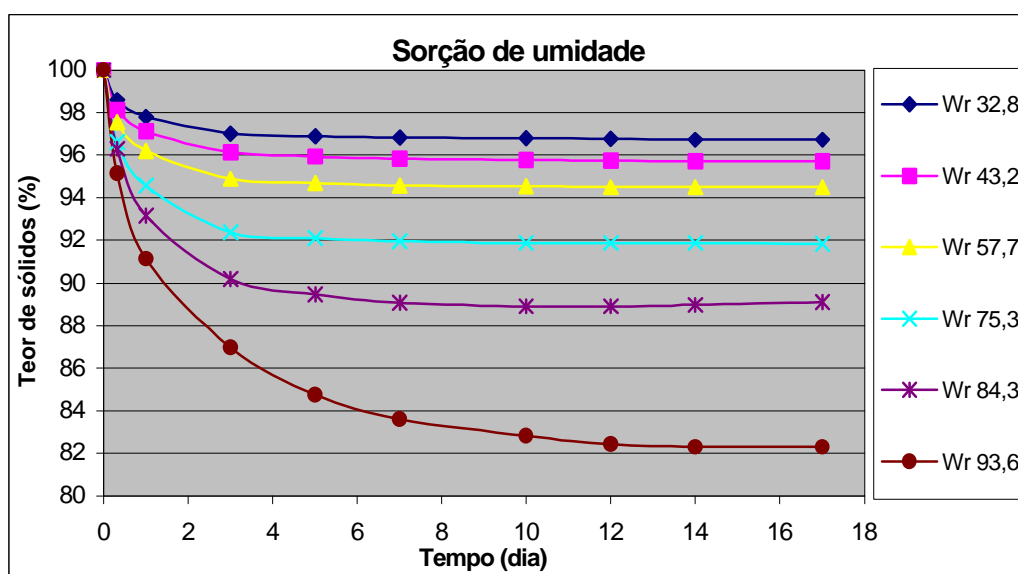


Figura 6.3 - Curvas de evolução da sorção de umidade ao longo do tempo.

Wr: umidade relativa do ar ambiente (%).

A velocidade de sorção de umidade é maior quanto maior for a umidade relativa do ambiente onde se encontra o material seco. Entretanto, a estabilização da umidade do sólido ocorre em tempo maior, à medida que cresce a umidade relativa do meio. Para os ambientes com umidade relativa mais baixas, até 75,3%, a estabilização da umidade do sólido ocorreu nos primeiros 3 a 5 dias, conforme pode ser observado nos gráficos da Figura 6.3. Para os ambientes com umidade relativa mais altas, o tempo de estabilização foi maior: 7 dias para umidade relativa de 84,3% e 12 dias para umidade relativa de 93,6%.

A secagem ocorre pela diferença entre as pressões de vapor da água contida no sólido e a da água contida no ar ambiente. Quando o ar ambiente tem umidade relativa de 100%, a pressão de vapor da água nele contida é igual à pressão de vapor

da água pura. Como consequência disso, nenhuma umidade é transferida para a fase gasosa e nem desta para a líquida.

A pressão de vapor do ar presente na superfície da fase líquida, após atingir o equilíbrio, será a mesma do líquido. Se o ambiente for fechado, essa situação deverá evoluir para um equilíbrio, no qual as pressões de vapor da fase líquida e da fase gasosa se igualem em todo o ambiente.

Para a simulação de um ambiente com umidade relativa de 100%, foi montada uma câmara contendo em seu interior apenas água destilada. Nessa câmara, foram colocadas amostras de lodo seco na primeira etapa e lodo apenas desidratado no filtro prensa na segunda etapa, da mesma forma que nas outras câmaras contendo soluções saturadas de sais.

Devido a interferências externas como a renovação da atmosfera da câmara quando esta é aberta, pequenos vazamentos ou troca de massa de ar e, até mesmo, o tempo decorrido para o equilíbrio entre as pressões de vapor da fase líquida com a da fase gasosa, não se pode garantir que a umidade relativa na câmara, contendo apenas água destilada, vai atingir exatamente 100%. Entretanto, pode-se dizer que a umidade relativa em seu interior estará tendendo a 100% e, após decorrido tempo suficiente com a câmara fechada, ela estará próxima de 100%.

No ambiente com umidade relativa próxima de 100%, observou-se que a velocidade de sorção de umidade foi bastante alta no início do processo, foi diminuindo ao longo do tempo, porém não atingiu a estabilização dentro do período de observação. Pelos motivos expostos anteriormente e, também, devido à incerteza do ponto, este não foi plotado no gráfico, porém foi considerado suficiente para se traçar a tendência das curvas de umidade de equilíbrio para umidade relativa próxima a 100%.

A Tabela 6.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos em teores de sólidos para cada ambiente com umidade relativa controlada.



Tabela 6.1 – Resumo dos resultados dos experimentos com sorção de umidade em teores de sólidos (%).

Tempo (dia)	Umidade relativa do ambiente (%)					
	32,8	43,2	57,7	75,3	84,3	93,6
0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
0,33	98,60	98,14	97,54	96,62	96,31	95,15
1,00	97,82	97,13	96,20	94,58	93,15	91,14
3,00	97,04	96,13	94,88	92,39	90,18	86,97
5,00	96,90	95,95	94,70	92,11	89,45	84,76
7,00	96,82	95,84	94,56	91,95	89,08	83,62
10,00	96,78	95,78	94,52	91,89	88,91	82,80
12,00	96,75	95,75	94,51	91,88	88,90	82,42
14,00	96,73	95,72	94,51	91,87	88,98	82,30
17,00	96,71	95,70	94,50	91,85	89,09	82,28

A observação desses dados permite afirmar que, se o material for completamente seco e depois exposto a um ambiente com umidade relativa de 75%, este vai absorver umidade do ar até se equilibrar em teor de sólidos de 92% em 4 dias de exposição. Com apenas 1 dia de exposição seu teor de sólidos já terá atingido 94%.

Na RMSP, é muito comum a ocorrência de períodos prolongados com umidade relativa acima de 85%. Isso faz com que o material seco absorva muita umidade do ar ambiente, até atingir teores de sólidos menores que 90%. Cuidados especiais devem ser tomados quanto ao armazenamento do produto seco para não possibilitar a absorção de umidade, o que torna a operação de secagem ineficiente.

## 6.2 – Experiência com dessorção de umidade

Os resultados das medições efetuadas no decorrer dos experimentos com dessorção de umidade estão apresentados no Anexo B.

O comportamento da dessorção de umidade do lodo ao longo do tempo, também foi semelhante entre as amostras condicionadas nos diferentes ambientes, diferindo nos tempos de estabilização e nos valores finais do teor de sólidos estabilizados. Nas faixas de umidade relativa mais baixas, a diferença entre as pressões de vapor de água contida no material úmido e a do ar ambiente são maiores, o que permite uma transferência de massa de água contida no sólido para o ambiente de forma mais rápida.

A Figura 6.4 apresenta as curvas de dessorção de umidade das amostras de lodo submetidas aos ambientes com umidades relativas consideradas. Da mesma forma anterior, na ordenada foram colocados os valores dos teores de sólidos (TS) em porcentagem e na abscissa, o tempo decorrido no processo de dessorção de umidade, em dias.

O processo de dessorção de umidade apresentou-se bem mais lento que o de sorção. Para o ambiente com umidade relativa de 32,8%, a estabilização da umidade do sólido, no processo de sorção, ocorreu apenas no décimo dia, enquanto que no processo de dessorção ocorreu no terceiro dia. A estabilização da umidade contida no sólido, no processo de dessorção, aumenta muito à medida que aumenta a umidade relativa do ambiente, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 6.4.

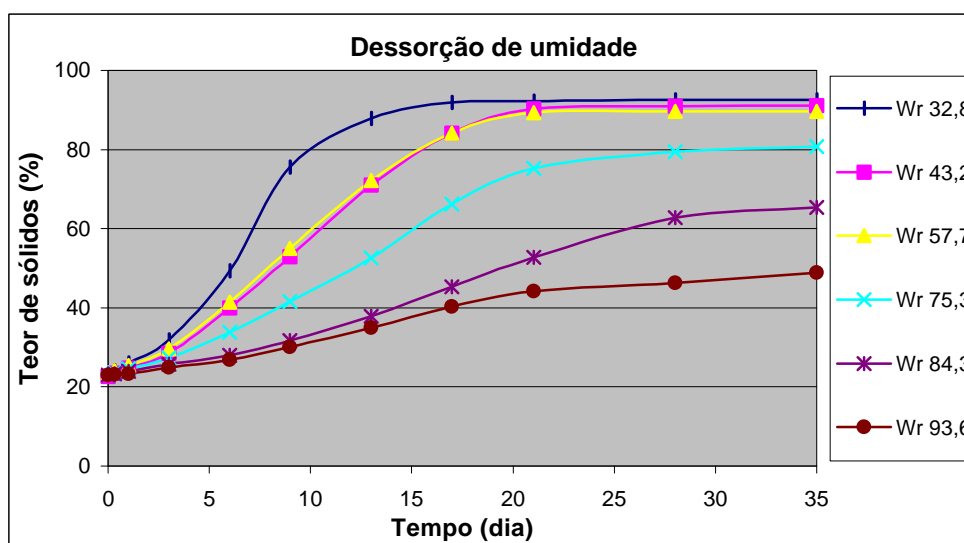


Figura 6.4 - Curvas de evolução da dessorção de umidade ao longo do tempo.

Wr: umidade relativa do ar ambiente (%).

A Tabela 6.2 apresenta o resumo dos resultados obtidos em teores de sólidos para cada ambiente com umidade relativa controlada.

Tabela 6.2 – Resumo dos resultados dos experimentos com dessorção de umidade em teores de sólidos (%).

Tempo (dia)	Umidade relativa do ambiente (%)						
	32,8	43,2	57,7	75,3	84,3	93,6	99,9
0,00	23,32	22,67	23,40	23,00	22,98	22,95	22,49
0,33	24,15	23,39	24,08	23,55	23,32	23,10	22,60
1,00	26,02	24,77	25,43	24,55	23,91	23,28	22,76
3,00	31,92	28,51	29,69	27,33	25,78	24,86	22,95
6,00	49,38	40,01	41,47	33,82	28,07	26,90	23,26
9,00	75,61	52,98	54,97	41,58	31,77	30,10	23,49
13,00	87,86	70,98	72,15	52,64	37,85	35,00	23,71
17,00	91,96	84,10	84,21	66,22	45,24	40,30	23,87
21,00	92,19	90,36	89,33	75,18	52,69	44,13	24,02
28,00	92,51	91,00	89,65	79,38	62,79	46,35	24,11
35,00	92,51	91,03	89,70	80,77	65,37	48,80	24,13

### 6.3 – Levantamento da curva de umidade de equilíbrio

Em cada ambiente com umidade relativa controlada, a umidade contida no sólido estabilizou-se em um certo valor. Os resultados finais do processo de sorção de umidade estão apresentados na Tabela 6.3. Nessa tabela, estão os valores estabilizados de teor de sólidos (TS), umidade em base seca (Wd) e umidade em base úmida (Ww), para cada ambiente com as umidades relativas consideradas nos experimentos.

Tabela 6.3 – Resultados do processo de sorção de umidade dos lodos após estabilização.

<b>Umidade relativa - W<sub>r</sub> (%)</b>	<b>Teor de sólidos - TS (%)</b>	<b>Umidade do sólido em base seca - W<sub>d</sub> (kg<sub>água</sub>/kg<sub>sólido</sub>)</b>	<b>Umidade do sólido em base úmida - W<sub>w</sub> (%)</b>
32,8	96,71	0,0340	3,29
43,2	95,70	0,0449	4,30
57,7	94,50	0,0583	5,50
75,3	91,85	0,0887	8,15
84,3	89,09	0,1224	10,91
93,6	82,28	0,2154	17,72

No processo de dessorção de umidade, os teores de sólidos estabilizaram-se em valores menores que no processo de sorção. A Tabela 6.4 apresenta os valores finais de teor de sólidos (TS), umidade em base seca (W<sub>d</sub>) e umidade em base úmida (W<sub>w</sub>), para cada ambiente com as umidades relativas consideradas nos experimentos.

Tabela 6.4 – Resultados do processo de dessorção de umidade dos lodos após estabilização.

<b>Umidade relativa - W<sub>r</sub> (%)</b>	<b>Teor de sólidos - TS (%)</b>	<b>Umidade do sólido em base seca - W<sub>d</sub> (kg<sub>água</sub>/kg<sub>sólido</sub>)</b>	<b>Umidade do sólido em base úmida - W<sub>w</sub> (%)</b>
32,8	92,51	0,0809	7,49
43,2	91,00	0,0989	9,00
57,7	89,65	0,1155	10,35
75,3	79,38	0,2598	20,62
84,3	65,37	0,5297	34,63
93,6	48,80	1,0492	51,20

#### 6.4 – Apresentação da curva de umidade de equilíbrio

A curva de umidade de equilíbrio é normalmente expressa em gráfico com os valores de umidade contida no sólido, em base seca, na ordenada e umidade relativa do ambiente na abscissa. Dessa forma, construindo-se o gráfico da umidade de equilíbrio do sólido em função da umidade relativa do ar, apresentadas na Tabela 6.3, tem-se a curva de umidade de equilíbrio para o lodo, conforme apresentada na Figura 6.5.

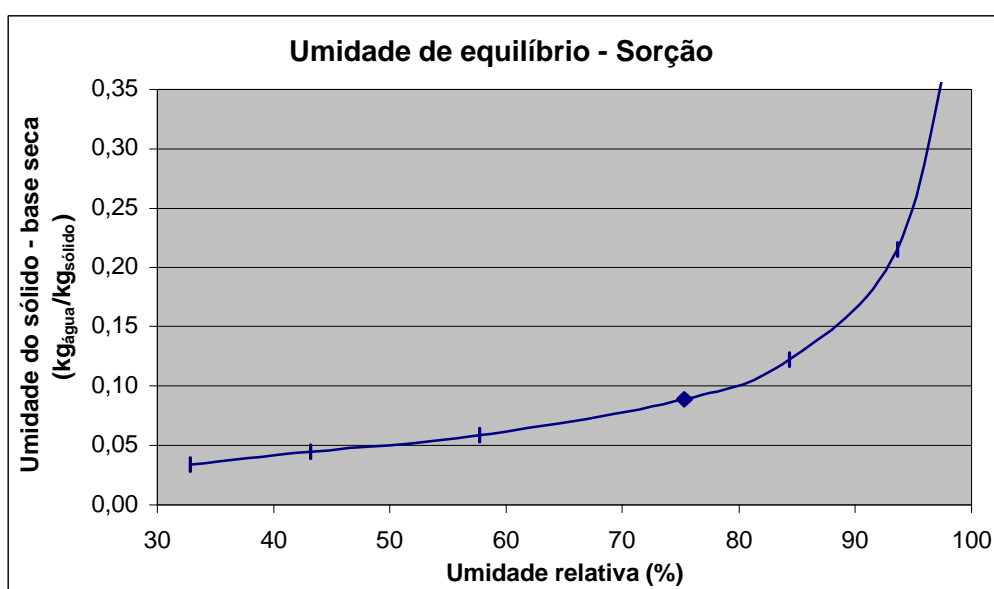


Figura 6.5 – Curva da umidade de equilíbrio do lodo seco.

Colocando-se em um mesmo gráfico as curvas de umidade de equilíbrio do lodo seco em processo de sorção de umidade e do lodo úmido em processo de dessorção, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 6.6.

A curva de umidade de equilíbrio pode, também, ser apresentada na forma de teor de sólidos em função da umidade relativa, conforme apresentada na Figura 6.7.

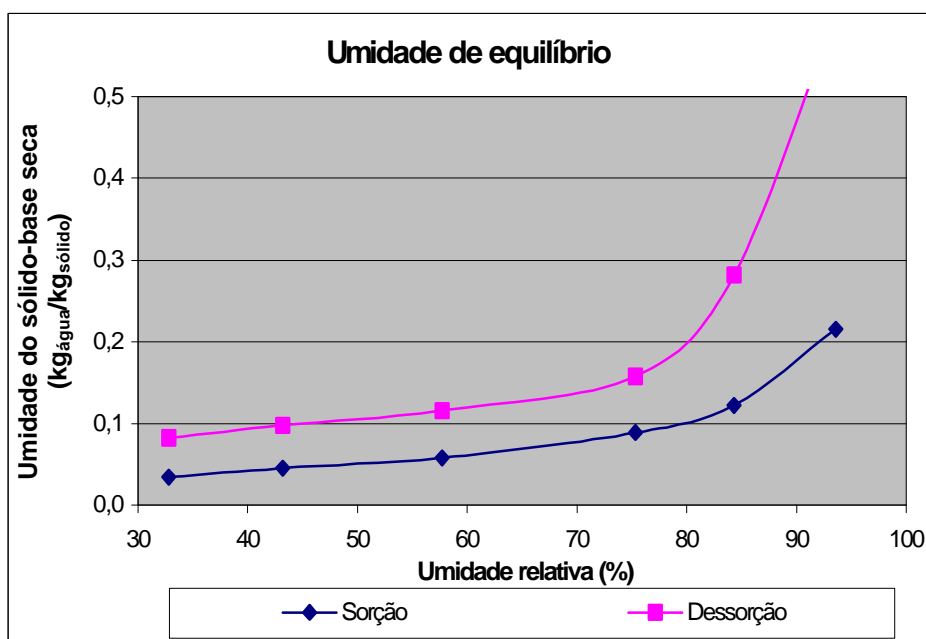


Figura 6.6 – Curvas de umidade de equilíbrio do lodo nos processos de sorção e dessorção.

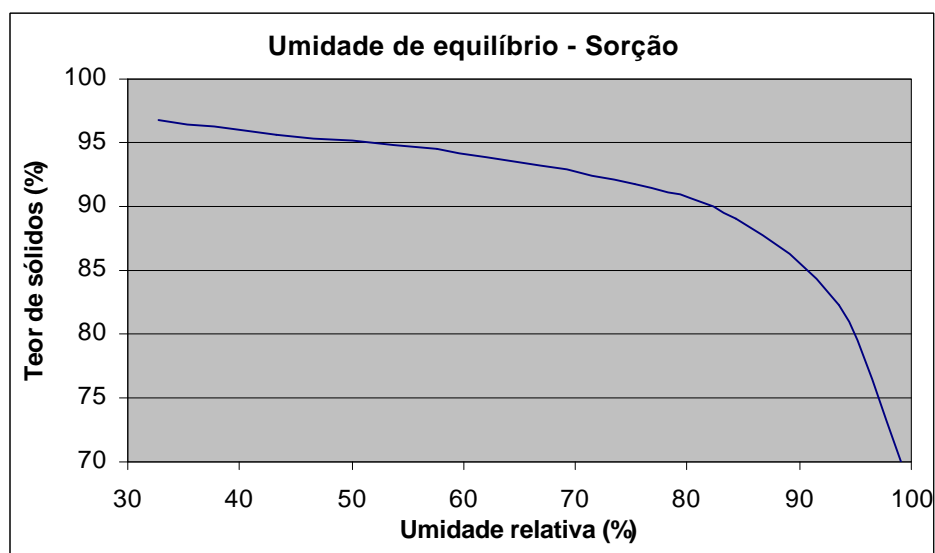


Figura 6.7 – Curva da umidade de equilíbrio do lodo seco em teores de sólidos.

Comparando-se a curva de umidade de equilíbrio do lodo, levantada neste experimento, com as curvas extraídas de FOUST (1980) e MCCABE (1985), apresentadas na Figura 3.7, referentes aos materiais: caulim, papel jornal, sabão, lã e folha de fumo, pode-se observar que a curva de umidade de equilíbrio do lodo está

próxima da curva de umidade de equilíbrio do papel jornal, que é um material higroscópico e poroso. A Figura 6.8 apresenta a curva de umidade de equilíbrio do lodo comparada com as dos outros materiais mencionados.

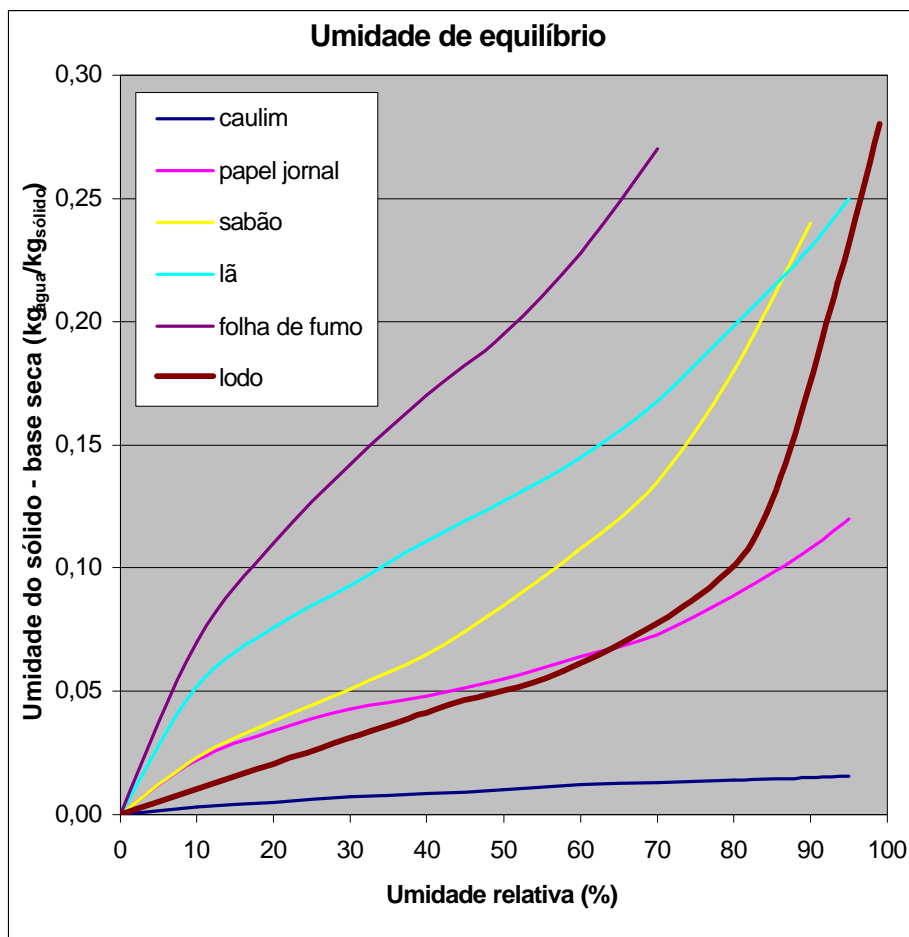


Figura 6.8 – Umidade de equilíbrio do lodo comparada com outros materiais.

O teor de umidade de equilíbrio do material determina se a umidade do ar será absorvida ou não sob as condições do ambiente (umidade relativa do ar). Entretanto, não diz nada sobre o quanto o material vai tolerar a absorção de umidade sem afetar suas propriedades físicas. Para uma completa avaliação das propriedades físicas do material, necessárias para a sua forma de utilização, outros testes devem ser realizados, relacionando o teor de umidade com as propriedades físicas responsáveis pela segregação e aglomeração, ou empedramento do material.

## 7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

As principais conclusões e recomendações deste trabalho são apresentadas a seguir:

- A curva de umidade de equilíbrio do lodo produzido na ETE Baureri, entre as umidades relativas de 32 a 75%, apresentou pequeno decréscimo, de forma quase linear, com o teor de sólidos variando de 97 a 92% respectivamente. Para umidades relativas acima de 75%, a curva apresentou decréscimo acentuado, com o teor de sólidos atingindo 82% para umidade relativa de 93%.
- O teor de umidade de 10% (teor de sólidos de 90%), estabelecido pelas normas CETESB P-4.230 e EPA 503, como valor máximo para processo de redução adicional de patógenos, é um limite suficientemente seguro para o manuseio do material nas condições médias de umidade relativa do ar, em torno de 80% na RMSP.
- O armazenamento do biossólido seco, com teor de sólidos superior a 90%, conforme estabelecido para processo de redução adicional de patógenos, requer um ambiente com umidade relativa inferior a 82%. Em caso contrário, o material incorporará umidade do ambiente, chegando a teores de sólidos inferiores aos 90% estabelecidos e, em consequência disso, a operação de secagem será ineficiente.
- Um ambiente com umidade relativa muito alta, acima de 85%, proporciona uma incorporação rápida de umidade pelo lodo seco, cerca de 2 a 3 dias para atingir teor de sólidos inferior a 90%. Neste caso, o armazenamento do produto seco deve ser feito em ambientes com umidade controlada, através de aquecimento ou circulação de ar seco.
- Os ensaios para o levantamento da curva de umidade de equilíbrio foram realizados com o lodo desidratado em filtro prensa e preparado manualmente para formação de grânulos. Os resultados obtidos são válidos para o material nessa forma. Lodos preparados de outro modo, por processos especiais, com



utilização de cal na estabilização, granulada por compactação ou de outra forma, poderão apresentar estrutura do grânulo diferente e, conseqüentemente, os tempos de estabilização de umidade e teores de sólidos de equilíbrio também diferentes. Nesses casos, a curva de umidade de equilíbrio também poderá apresentar diferenças em relação à curva levantada nestes experimentos.

- Nas experiências realizadas, a dessorção de umidade ocorreu de forma bastante lenta, atingindo-se a estabilização dos teores de sólidos em 15 dias para ambiente com umidade relativa de 32%, 20 dias para ambientes com umidade relativa de 43 e 57% e acima de 30 dias para ambientes com umidade relativa acima de 75%. A velocidade de secagem na temperatura ambiente, embora baixa, permitiu atingir teores de sólidos relativamente altos, 80% em ambiente com umidade relativa de 75% e superiores a 90% em ambientes com umidade relativa abaixo de 57%. Este aspecto pode ser explorado para utilização de secagem por processo natural.
- Recomenda-se medir a umidade de equilíbrio de lodos secos, granulados por processos especiais e de outras procedências, quando houver necessidade de se definir o teor final de sólidos em um processo de secagem, ou para estabelecer as condições de umidade relativa do ambiente para o armazenamento do produto final.
- O biossólido seco e granulado, entre o momento da sua produção e o da aplicação no solo, deverá ser transportado e armazenado. O tempo de armazenamento poderá variar consideravelmente, desde poucos dias até alguns meses. Para evitar a absorção de umidade do ar durante o tempo de armazenamento, com conseqüente alteração de suas propriedades físicas, o material poderá ser embalado em sacos plásticos ou de papelão e armazenado em local seco. Esta recomendação, entretanto, restringe-se apenas ao aspecto de absorção de umidade.
- Cada tipo de secador, conforme as características particulares de processo de secagem empregado, pode apresentar vantagens ou desvantagens em relação aos

demais. A escolha do mais apropriado requer, além de estudo técnico e econômico, a verificação das propriedades físicas proporcionadas em comparação com as desejadas para a utilização do produto final. Com base na literatura e informações de fabricantes, os secadores dos tipos soleiras múltiplas, os de leito fluidizado e os rotativos de aquecimento indireto são os mais apropriados para a secagem dos biossólidos com formação de grânulos no próprio processo de secagem.

- O custo estimado de combustível para secagem térmica de lodos é da ordem de R\$ 50 por tonelada de água evaporada, considerando-se como combustível o gás natural, com poder calorífico de  $9400 \text{ kcal/m}^3$ , com preço de R\$ 0,50 por metro cúbico.

## Anexo A – Resultados dos experimentos com sorção de umidade

**Experiência A-1** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.

Tabela A-1.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		32,8 %		
			Sal:		MgCl <sub>2</sub>		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			6	14	24	32	35
P <sub>0</sub>	16/08	8	78,7315	88,6235	94,3560	88,7420	92,9600
P <sub>1</sub>	16/08	14	123,0172	125,8763	133,4787	133,1142	127,2692
P <sub>2</sub>	17/08	8	91,4127	97,7697	105,7290	101,5532	101,2997
P <sub>3</sub>	17/08	16	91,5929	97,8904	105,8950	101,7380	101,4184
P <sub>4</sub>	18/08	8	91,7106	97,9627	105,9731	101,8429	101,4873
P <sub>5</sub>	20/08	8	91,8013	98,0408	106,0816	101,9499	101,5501
P <sub>6</sub>	22/08	8	91,8186	98,0541	106,0977	101,9675	101,5636
P <sub>7</sub>	24/08	8	91,8291	98,0637	106,1069	101,9772	101,5715
P <sub>8</sub>	27/08	8	91,8341	98,0688	106,1126	101,9829	101,5766
P <sub>9</sub>	29/08	8	91,8383	98,0711	106,1165	101,9869	101,5784
P <sub>10</sub>	31/08	8	91,8413	98,0755	106,1181	101,9892	101,5791
P <sub>11</sub>	03/09	8	91,8445	98,0761	106,1186	101,9918	101,5801

Tabela A-1.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	6	14	24	32	35
Massa de sólido úmido (g)	44,2857	37,2528	39,1227	44,3722	34,3092
Massa de sólido seco (g)	12,6812	9,1462	11,373	12,8112	8,3397
Teor de sólidos (%)	28,6	24,6	29,1	28,9	24,3

Tabela A-1.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	6	14	24	32	35	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
t <sub>1</sub>	0,33	98,60	98,70	98,56	98,58	98,60	98,60
t <sub>2</sub>	1,00	97,70	97,93	97,90	97,79	97,80	97,82
t <sub>3</sub>	3,00	97,03	97,12	96,99	97,00	97,09	97,04
t <sub>4</sub>	5,00	96,90	96,98	96,86	96,87	96,93	96,90
t <sub>5</sub>	7,00	96,82	96,89	96,78	96,80	96,84	96,82
t <sub>6</sub>	10,00	96,78	96,83	96,74	96,75	96,79	96,78
t <sub>7</sub>	12,00	96,75	96,81	96,71	96,73	96,77	96,75
t <sub>8</sub>	14,00	96,73	96,76	96,69	96,71	96,76	96,73
t <sub>9</sub>	17,00	96,71	96,76	96,69	96,69	96,75	96,71

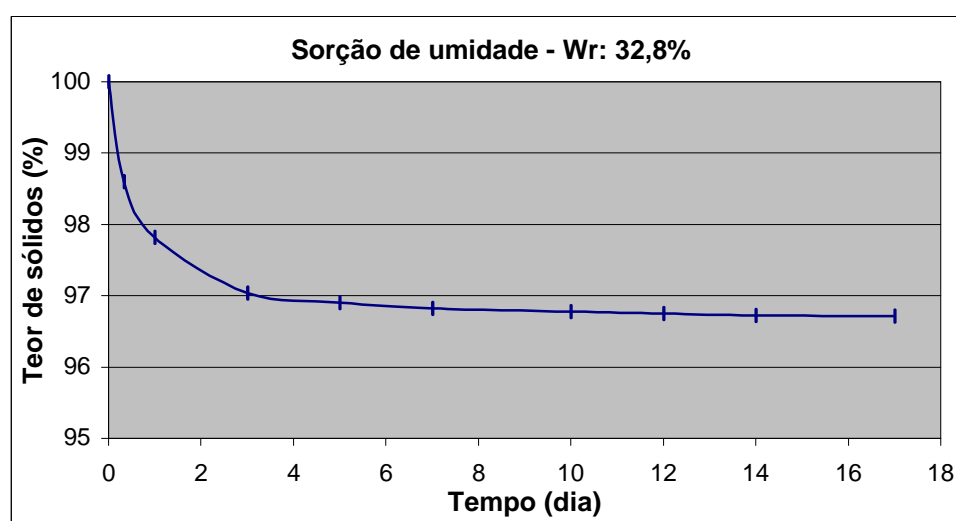


Figura A-1 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.

**Experiência A-2** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.

Tabela A-2.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		43,2 %		
			Sal:		K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			12	16	34	42	46
P <sub>0</sub>	16/08	8	92,5013	81,0169	94,5694	92,3203	89,8832
P <sub>1</sub>	16/08	14	125,7667	111,523	140,117	128,6104	128,5494
P <sub>2</sub>	17/08	8	101,4747	89,2279	106,6076	102,7215	100,3467
P <sub>3</sub>	17/08	16	101,6538	89,3926	106,8140	102,9298	100,5362
P <sub>4</sub>	18/08	8	101,7543	89,4892	106,9414	103,0198	100,6536
P <sub>5</sub>	20/08	8	101,8458	89,5639	107,0787	103,1395	100,7661
P <sub>6</sub>	22/08	8	101,8645	89,5827	107,1004	103,1562	100,7871
P <sub>7</sub>	24/08	8	101,8757	89,5958	107,1200	103,1650	100,7985
P <sub>8</sub>	27/08	8	101,8792	89,5995	107,1288	103,1714	100,8061
P <sub>9</sub>	29/08	8	101,8828	89,6014	107,1338	103,1741	100,8112
P <sub>10</sub>	31/08	8	101,8853	89,6048	107,1374	103,1768	100,8151
P <sub>11</sub>	03/09	8	101,8880	89,6064	107,1393	103,1775	100,8170

Tabela A-2.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	12	16	34	42	46
Massa de sólido úmido (g)	33,2654	30,5061	45,5476	36,2901	38,6662
Massa de sólido seco (g)	8,9734	8,211	12,0382	10,4012	10,4635
Teor de sólidos (%)	27,0	26,9	26,4	28,7	27,1

Tabela A-2.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	12	16	34	42	46	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0
t <sub>1</sub>	0,33	98,04	98,03	98,31	98,04	98,22	98,1
t <sub>2</sub>	1,00	96,98	96,92	97,30	97,21	97,15	97,1
t <sub>3</sub>	3,00	96,03	96,07	96,23	96,14	96,15	96,1
t <sub>4</sub>	5,00	95,84	95,86	96,07	95,99	95,96	96,0
t <sub>5</sub>	7,00	95,72	95,71	95,92	95,91	95,86	95,8
t <sub>6</sub>	10,00	95,69	95,67	95,85	95,85	95,79	95,8
t <sub>7</sub>	12,00	95,65	95,65	95,81	95,83	95,75	95,7
t <sub>8</sub>	14,00	95,62	95,61	95,78	95,81	95,72	95,7
t <sub>9</sub>	17,00	95,60	95,59	95,77	95,80	95,70	95,7

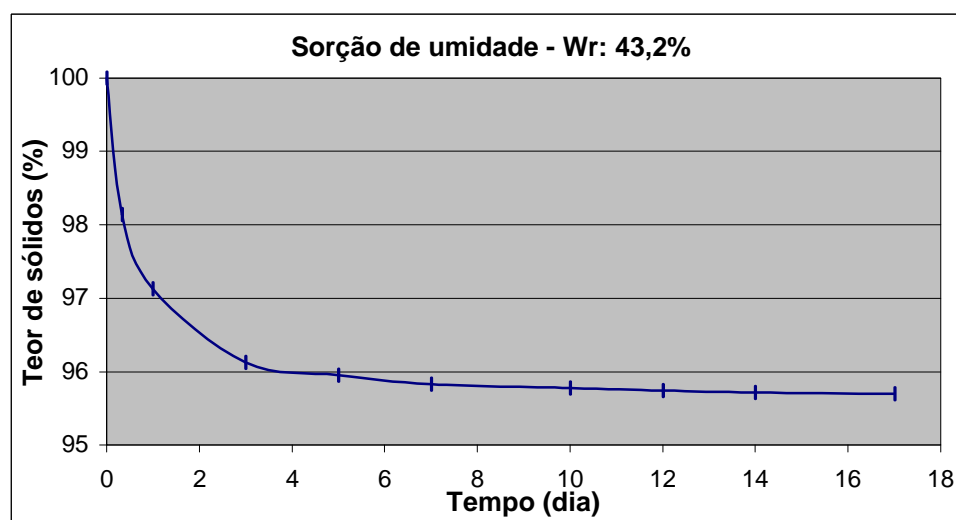


Figura A-2 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.

**Experiência A-3** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.

Tabela A-3.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		57,6 %		
			Sal:		NaBr		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			8	19	22	28	37
P <sub>0</sub>	16/08	8	88,8347	95,9104	94,1834	85,0431	86,5275
P <sub>1</sub>	16/08	14	127,9375	130,8763	133,365	125,7853	124,9827
P <sub>2</sub>	17/08	8	98,3603	105,0005	104,6386	95,8694	96,0001
P <sub>3</sub>	17/08	16	98,6045	105,2375	104,9023	96,1398	96,2280
P <sub>4</sub>	18/08	8	98,7376	105,3651	105,0532	96,2983	96,3623
P <sub>5</sub>	20/08	8	98,8725	105,4940	105,2072	96,4532	96,5061
P <sub>6</sub>	22/08	8	98,8895	105,5098	105,2303	96,4749	96,5273
P <sub>7</sub>	24/08	8	98,9040	105,5242	105,2470	96,4928	96,5428
P <sub>8</sub>	27/08	8	98,9077	105,5279	105,2536	96,4962	96,5466
P <sub>9</sub>	29/08	8	98,9083	105,5285	105,2548	96,4970	96,5479
P <sub>10</sub>	31/08	8	98,9080	105,5298	105,2551	96,4981	96,5482
P <sub>11</sub>	03/09	8	98,9097	105,5306	105,2564	96,4995	96,5486

Tabela A-3.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	8	19	22	28	37
Massa de sólido úmido (g)	39,1028	34,9659	39,1816	40,7422	38,4552
Massa de sólido seco (g)	9,5256	9,0901	10,4552	10,8263	9,4726
Teor de sólidos (%)	24,4	26,0	26,7	26,6	24,6

Tabela A-3.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	8	19	22	28	37	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0
t <sub>1</sub>	0,33	97,50	97,46	97,54	97,56	97,65	97,5
t <sub>2</sub>	1,00	96,19	96,14	96,19	96,19	96,32	96,2
t <sub>3</sub>	3,00	94,90	94,85	94,84	94,88	94,93	94,9
t <sub>4</sub>	5,00	94,74	94,69	94,64	94,70	94,73	94,7
t <sub>5</sub>	7,00	94,60	94,55	94,50	94,56	94,58	94,6
t <sub>6</sub>	10,00	94,57	94,52	94,44	94,53	94,55	94,5
t <sub>7</sub>	12,00	94,56	94,51	94,43	94,52	94,53	94,5
t <sub>8</sub>	14,00	94,56	94,50	94,43	94,51	94,53	94,5
t <sub>9</sub>	17,00	94,55	94,49	94,42	94,50	94,53	94,5

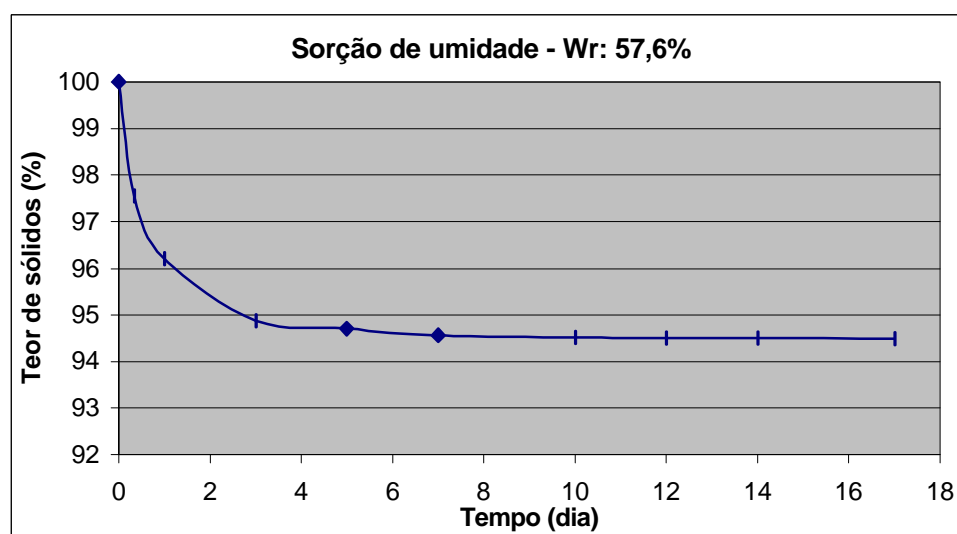


Figura A-3 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.



**Experiência A-4** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.

Tabela A-4.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		75,3 %		
			Sal:		NaCl		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			4	21	27	38	41
P <sub>0</sub>	16/08	8	81,6915	90,3289	95,1487	94,9543	82,7455
P <sub>1</sub>	16/08	14	115,232	126,2157	129,8998	132,0852	123,4186
P <sub>2</sub>	17/08	8	90,7352	99,8949	104,5619	105,7381	94,2595
P <sub>3</sub>	17/08	16	91,0631	100,2278	104,9132	106,1223	94,6240
P <sub>4</sub>	18/08	8	91,2106	100,4522	105,1329	106,3712	94,9062
P <sub>5</sub>	20/08	8	91,4862	100,6897	105,3506	106,6233	95,1873
P <sub>6</sub>	22/08	8	91,5093	100,7196	105,3696	106,6573	95,2426
P <sub>7</sub>	24/08	8	91,5265	100,7375	105,3872	106,6758	95,2655
P <sub>8</sub>	27/08	8	91,5281	100,7455	105,3947	106,6865	95,2769
P <sub>9</sub>	29/08	8	91,5276	100,7456	105,3969	106,6882	95,2801
P <sub>10</sub>	31/08	8	91,5265	100,7441	105,3983	106,6889	95,2836
P <sub>11</sub>	03/09	8	91,5283	100,7457	105,4009	106,6911	95,2879

Tabela A-4.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	4	21	27	38	41
Massa de sólido úmido (g)	33,5405	35,8868	34,7511	37,1309	40,6731
Massa de sólido seco (g)	9,0437	9,566	9,4132	10,7838	11,514
Teor de sólidos (%)	27,0%	26,7%	27,1%	29,0%	28,3%

Tabela A-4.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	4	21	27	38	41	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0
t <sub>1</sub>	0,33	96,50	96,64	96,40	96,56	96,93	96,6
t <sub>2</sub>	1,00	95,01	94,49	94,28	94,45	94,68	94,6
t <sub>3</sub>	3,00	92,33	92,33	92,27	92,41	92,54	92,4
t <sub>4</sub>	5,00	92,12	92,06	92,10	92,15	92,13	92,1
t <sub>5</sub>	7,00	91,95	91,90	91,94	92,00	91,96	92,0
t <sub>6</sub>	10,00	91,94	91,83	91,87	91,92	91,88	91,9
t <sub>7</sub>	12,00	91,94	91,83	91,85	91,90	91,86	91,9
t <sub>8</sub>	14,00	91,95	91,85	91,84	91,90	91,83	91,9
t <sub>9</sub>	17,00	91,94	91,83	91,82	91,88	91,80	91,9

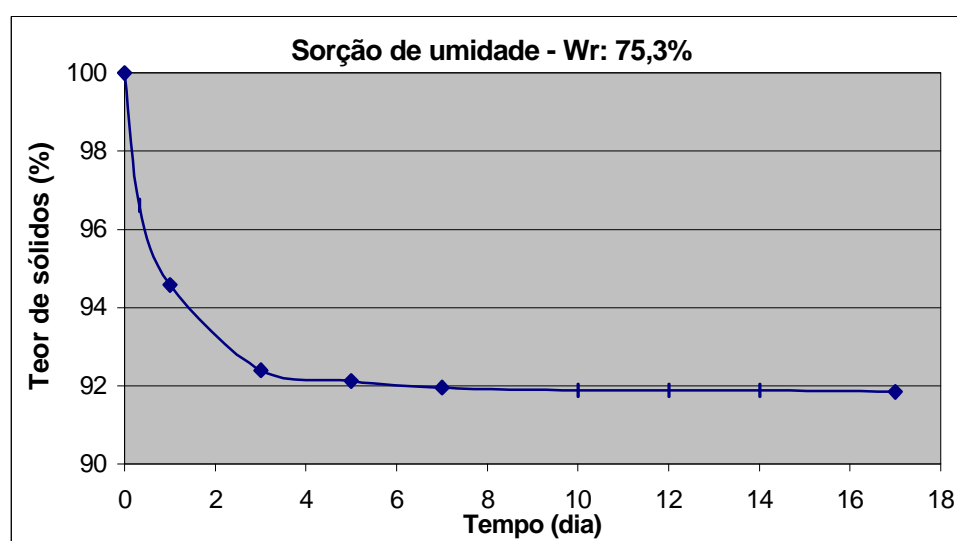


Figura A-4 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.

**Experiência A-5** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.

Tabela A.5.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		84,3 %		
			Sal:		KCl		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			2	9	20	26	40
P <sub>0</sub>	16/08	8	88,7027	76,8909	82,2573	84,9356	83,8639
P <sub>1</sub>	16/08	14	130,6675	120,1923	131,218	127,5458	129,8337
P <sub>2</sub>	17/08	8	100,0191	88,839	94,2712	95,3202	95,0753
P <sub>3</sub>	17/08	16	100,4588	89,2872	94,7487	95,7040	95,5043
P <sub>4</sub>	18/08	8	100,8371	89,7278	95,1374	96,0873	95,9145
P <sub>5</sub>	20/08	8	101,2476	90,1260	95,5960	96,4502	96,3012
P <sub>6</sub>	22/08	8	101,3490	90,2347	95,6961	96,5536	96,4018
P <sub>7</sub>	24/08	8	101,4049	90,2910	95,7480	96,6006	96,4545
P <sub>8</sub>	27/08	8	101,4142	90,3146	95,7803	96,6154	96,4918
P <sub>9</sub>	29/08	8	101,4157	90,3160	95,7815	96,6165	96,4929
P <sub>10</sub>	31/08	8	101,4024	90,3084	95,7758	96,6006	96,4837
P <sub>11</sub>	03/09	8	101,3754	90,2883	95,7626	96,5817	96,4800

Tabela A-5.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	2	9	20	26	40
Massa de sólido úmido (g)	41,9648	43,3014	48,9607	42,6102	45,9698
Massa de sólido seco (g)	11,3164	11,9481	12,0139	10,3846	11,2114
Teor de sólidos (%)	27,0%	27,6%	24,5%	24,4%	24,4%

Tabela A-5.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	2	9	20	26	40	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0
t <sub>1</sub>	0,33	96,26	96,38	96,18	96,44	96,31	96,3
t <sub>2</sub>	1,00	93,26	93,08	93,27	93,12	93,04	93,2
t <sub>3</sub>	3,00	90,21	90,28	90,07	90,19	90,14	90,2
t <sub>4</sub>	5,00	89,48	89,54	89,40	89,38	89,42	89,4
t <sub>5</sub>	7,00	89,09	89,16	89,05	89,02	89,05	89,1
t <sub>6</sub>	10,00	89,02	89,01	88,84	88,91	88,78	88,9
t <sub>7</sub>	12,00	89,01	89,00	88,83	88,90	88,78	88,9
t <sub>8</sub>	14,00	89,11	89,05	88,87	89,02	88,84	89,0
t <sub>9</sub>	17,00	89,30	89,18	88,96	89,17	88,87	89,1

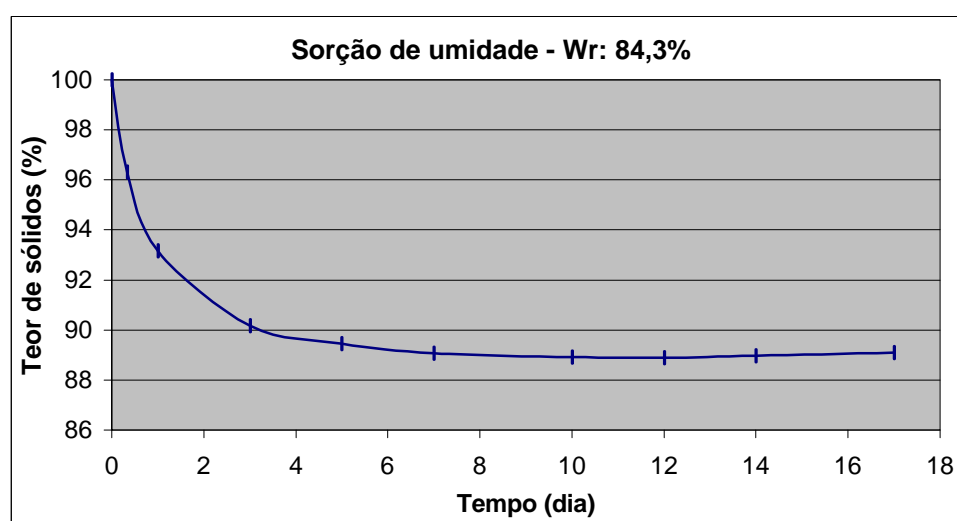


Figura A-5 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.

**Experiência A-6** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.

Tabela A-6.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		93,6 %		
			Sal:		KNO <sub>3</sub>		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			7	11	18	31	43
P <sub>0</sub>	16/08	8	88,3931	90,2133	89,1532	87,9614	90,1233
P <sub>1</sub>	16/08	14	132,5336	128,4218	131,8514	129,4328	134,6321
P <sub>2</sub>	17/08	8	100,8249	101,1794	101,5609	99,9842	102,5227
P <sub>3</sub>	17/08	16	101,4958	101,7582	102,1728	100,5940	103,1227
P <sub>4</sub>	18/08	8	101,9836	102,3124	102,7372	101,1359	103,7612
P <sub>5</sub>	20/08	8	102,6473	102,8392	103,3192	101,8684	104,4251
P <sub>6</sub>	22/08	8	102,9851	103,2023	103,7672	102,1946	104,7544
P <sub>7</sub>	24/08	8	103,2940	103,3511	103,9768	102,3456	104,9065
P <sub>8</sub>	27/08	8	103,3914	103,4542	104,1378	102,5343	105,0665
P <sub>9</sub>	29/08	8	103,4654	103,5064	104,1976	102,6002	105,1476
P <sub>10</sub>	31/08	8	103,4918	103,5383	104,2117	102,6116	105,1707
P <sub>11</sub>	03/09	8	103,5015	103,5401	104,2198	102,6098	105,1743

Tabela A-6.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	7	11	18	31	43
Massa de sólido úmido (g)	44,1405	38,2085	42,6982	41,4714	44,5088
Massa de sólido seco (g)	12,4318	10,9661	12,4077	12,0228	12,3994
Teor de sólidos (%)	28,2	28,7	29,1	29,0	27,9

Tabela A-6.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	7	11	18	31	43	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0
t <sub>1</sub>	0,33	94,88	94,99	95,30	95,17	95,38	95,1
t <sub>2</sub>	1,00	91,47	90,64	91,34	91,26	90,92	91,1
t <sub>3</sub>	3,00	87,21	86,85	87,59	86,45	86,70	87,0
t <sub>4</sub>	5,00	85,20	84,43	84,90	84,47	84,75	84,8
t <sub>5</sub>	7,00	83,43	83,47	83,70	83,58	83,87	83,6
t <sub>6</sub>	10,00	82,89	82,82	82,80	82,50	82,98	82,8
t <sub>7</sub>	12,00	82,48	82,49	82,47	82,13	82,53	82,4
t <sub>8</sub>	14,00	82,34	82,30	82,40	82,07	82,40	82,3
t <sub>9</sub>	17,00	82,28	82,29	82,35	82,08	82,38	82,3

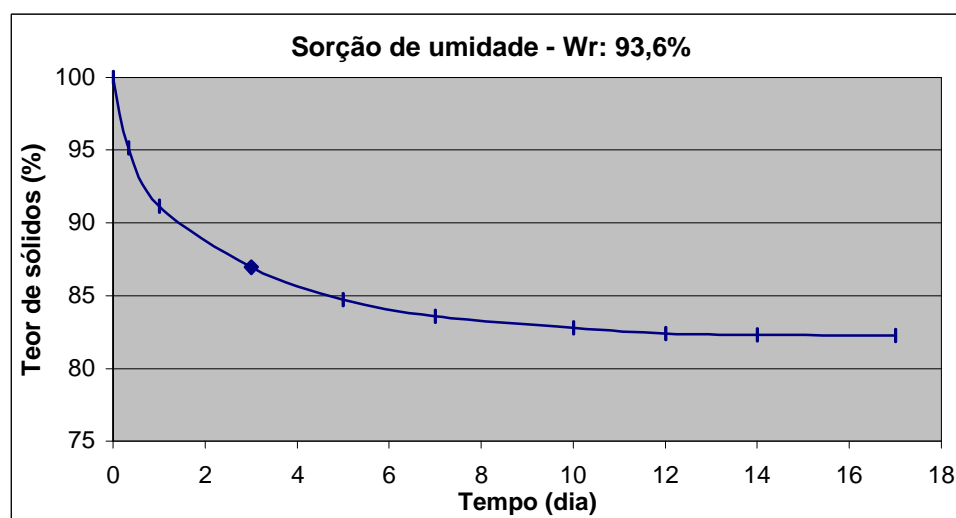


Figura A-6 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.

**Experiência A-7** – Sorção de umidade de amostras de lodo, inicialmente secas, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.

Tabela A-7.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		~100 %		
			Sal:		-		
Massas das amostras de lodo (g)							
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas				
			5	25	29	44	47
P <sub>0</sub>	16/08	8	97,6792	94,4061	73,9434	89,5432	87,3055
P <sub>1</sub>	16/08	14	139,1140	144,0618	115,2540	134,3535	125,7175
P <sub>2</sub>	17/08	8	109,8249	109,2784	86,5209	102,2420	98,4639
P <sub>3</sub>	17/08	16	110,3929	109,9582	87,0677	102,7740	98,9687
P <sub>4</sub>	18/08	8	111,1366	110,7226	87,7526	103,3521	99,6213
P <sub>5</sub>	20/08	8	112,0773	111,7902	88,5264	104,2005	100,4155
P <sub>6</sub>	22/08	8	112,5511	112,3842	89,0518	104,6982	100,9655
P <sub>7</sub>	24/08	8	112,8940	112,8116	89,3864	105,0814	101,3576
P <sub>8</sub>	27/08	8	113,3220	113,3085	89,7923	105,5861	101,8312
P <sub>9</sub>	29/08	8	113,5814	113,6324	90,0317	105,8971	102,1082
P <sub>10</sub>	31/08	8	113,7573	113,9014	90,2731	106,1785	102,3235
P <sub>11</sub>	03/09	8	114,0592	114,2769	90,5978	106,5490	102,6422

Tabela A-7.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo no início do experimento de sorção de umidade.

	Identificação das cápsulas				
	5	25	29	44	47
Massa de sólido úmido (g)	41,4348	49,6557	41,3106	44,8103	38,412
Massa de sólido seco (g)	12,1457	14,8723	12,5775	12,6988	11,1584
Teor de sólidos (%)	29,3%	30,0%	30,4%	28,3%	29,0%

Tabela A-7.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.

tempo		Teor de sólidos (%)					Média
		Cápsulas					
	(dia)	5	25	29	44	47	
t <sub>0</sub>	0,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,0
t <sub>1</sub>	0,33	95,53	95,63	95,83	95,98	95,67	95,7
t <sub>2</sub>	1,00	90,25	91,15	91,08	91,96	90,60	91,0
t <sub>3</sub>	3,00	84,36	85,55	86,25	86,64	85,11	85,6
t <sub>4</sub>	5,00	81,67	82,72	83,25	83,79	81,69	82,6
t <sub>5</sub>	7,00	79,83	80,80	81,44	81,73	79,41	80,7
t <sub>6</sub>	10,00	77,64	78,68	79,36	79,16	76,82	78,4
t <sub>7</sub>	12,00	76,38	77,35	78,18	77,65	75,38	77,0
t <sub>8</sub>	14,00	75,54	76,29	77,02	76,34	74,30	75,9
t <sub>9</sub>	17,00	74,15	74,84	75,52	74,67	72,76	74,4

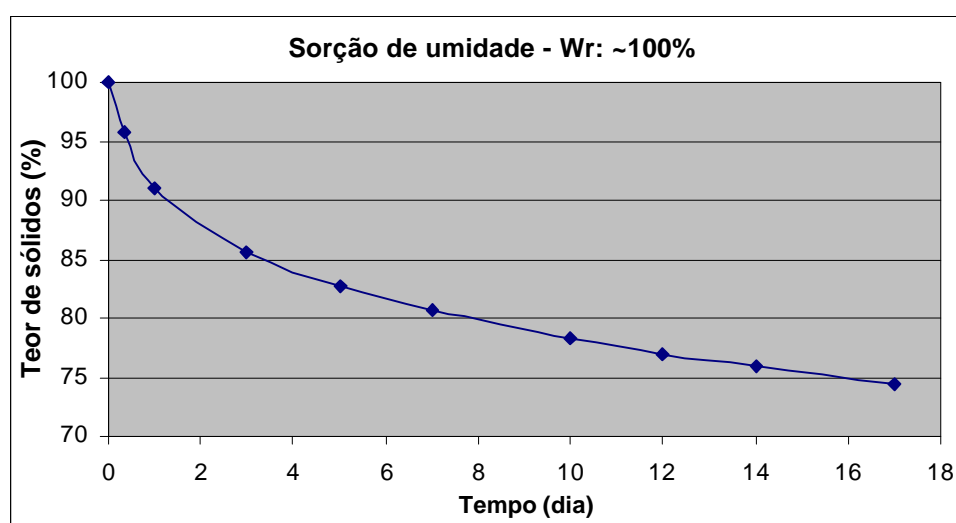


Figura A-7 – Curva de sorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.



## Anexo B – Resultados dos experimentos com dessorção de umidade

**Experiência B-1** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.

Tabela B-1.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		
			Sal:		
			32,8 %		
			MgCl <sub>2</sub>		
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			4	6	16
P <sub>0</sub>	10/09	8	81,6911	78,7316	81,0177
P <sub>1</sub>	11/09	15	123,1756	117,6052	132,1695
P <sub>2</sub>	17/10	10	91,1476	88,0487	92,8785
P <sub>3</sub>	11/09	16	121,7183	116,1923	130,564
P <sub>4</sub>	12/09	8	119,3165	113,7032	126,134
P <sub>5</sub>	14/09	8	111,9969	106,7154	118,955
P <sub>6</sub>	17/09	8	101,1506	97,2536	105,103
P <sub>7</sub>	20/09	8	94,0318	91,1814	96,7582
P <sub>8</sub>	24/09	8	92,3945	89,3896	94,5242
P <sub>9</sub>	28/09	8	91,9538	88,8543	93,9524
P <sub>10</sub>	02/10	8	91,9387	88,8281	93,9065
P <sub>11</sub>	09/10	8	91,9248	88,8130	93,8101
P <sub>12</sub>	16/10	8	91,9237	88,8109	93,8231

Tabela B-1.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	4	6	16
Massa de sólido úmido (g)	41,4845	38,8736	51,1518
Massa de sólido seco (g)	9,4565	9,3171	11,8608
Teor de sólidos (%)	22,80	23,97	23,19

Tabela B-1.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	4	6	16	
$t_0$	0	22,80	23,97	23,19	23,32
$t_1$	0,33	23,63	24,87	23,94	24,15
$t_2$	1	25,13	26,64	26,29	26,02
$t_3$	3	31,20	33,29	31,26	31,92
$t_4$	6	48,60	50,30	49,25	49,38
$t_5$	9	76,63	74,84	75,35	75,61
$t_6$	13	88,35	87,42	87,82	87,86
$t_7$	17	92,14	92,04	91,70	91,96
$t_8$	21	92,28	92,28	92,02	92,19
$t_9$	28	92,41	92,42	92,72	92,51
$t_{10}$	35	92,42	92,44	92,62	92,49

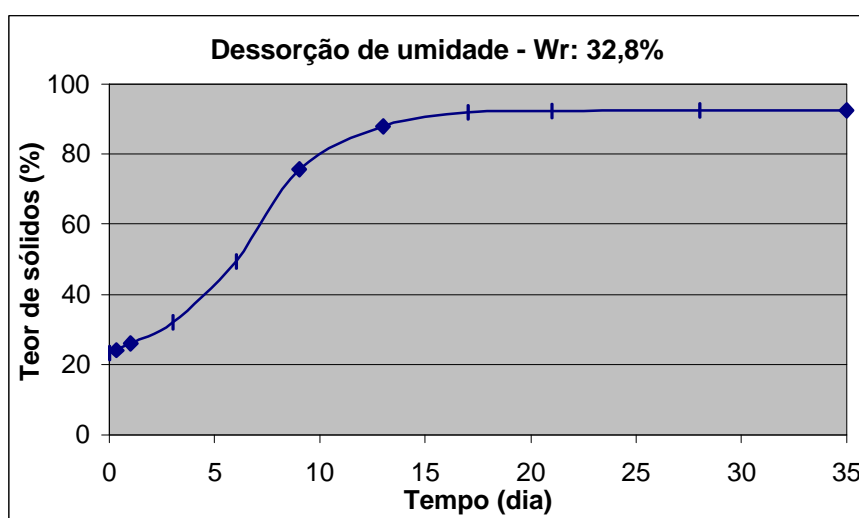


Figura B-1 – Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 32,8%.

**Experiência B-2** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.

Tabela B-2.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		43,2 %
			Sal:		K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			8	14	38
P <sub>0</sub>	10/09	8	88,8345	88,6241	94,9523
P <sub>1</sub>	11/09	15	128,165	124,7420	143,2793
P <sub>2</sub>	17/10	10	97,8240	96,7655	105,8793
P <sub>3</sub>	11/09	16	126,8110	123,5074	142,1273
P <sub>4</sub>	12/09	8	124,8073	121,6604	139,2525
P <sub>5</sub>	14/09	8	120,0454	117,2918	133,5062
P <sub>6</sub>	17/09	8	111,8591	108,5061	122,2530
P <sub>7</sub>	20/09	8	105,7202	103,8553	115,8654
P <sub>8</sub>	24/09	8	101,6145	99,8652	110,5232
P <sub>9</sub>	28/09	8	99,5532	98,2108	108,0357
P <sub>10</sub>	02/10	8	98,7095	97,5958	107,1863
P <sub>11</sub>	09/10	8	98,6877	97,5778	106,9810
P <sub>12</sub>	16/10	8	98,6851	97,5749	106,9770

Tabela B-2.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	8	14	38
Massa de sólido úmido (g)	39,3305	36,1179	48,3270
Massa de sólido seco (g)	8,9895	8,1414	10,9270
Teor de sólidos (%)	22,86	22,54	22,61

Tabela B-2.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	8	14	38	
t <sub>0</sub>	0	22,86	22,54	22,61	22,67
t <sub>1</sub>	0,33	23,67	23,34	23,16	23,39
t <sub>2</sub>	1	24,99	24,64	24,67	24,77
t <sub>3</sub>	3	28,80	28,40	28,34	28,51
t <sub>4</sub>	6	39,04	40,95	40,02	40,01
t <sub>5</sub>	9	53,24	53,45	52,25	52,98
t <sub>6</sub>	13	70,34	72,43	70,18	70,98
t <sub>7</sub>	17	83,87	84,92	83,52	84,10
t <sub>8</sub>	21	91,03	90,75	89,32	90,36
t <sub>9</sub>	28	91,23	90,93	90,84	91,00
t <sub>10</sub>	35	91,26	90,96	90,87	91,03

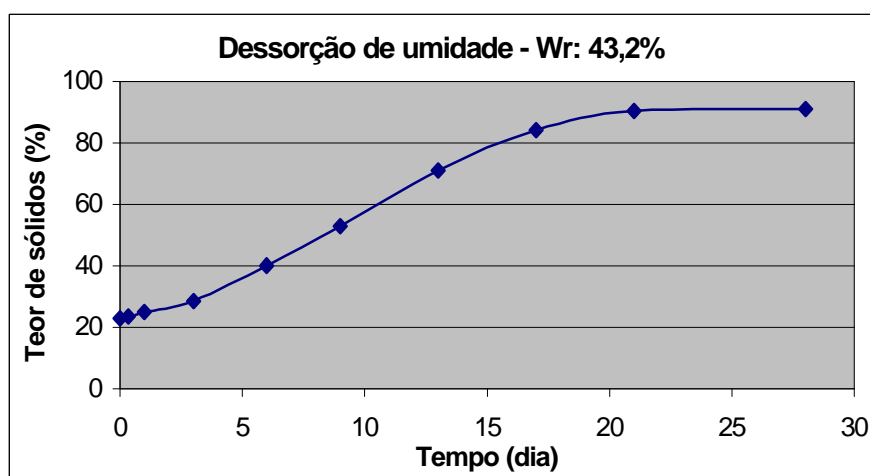


Figura B-2 – Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 43,2%.

**Experiência B-3** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.

Tabela B-3.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		
			57,6 %		
			Sal:		
			NaBr		
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			24	32	25
P <sub>0</sub>	10/09	8	94,3542	88,7421	94,4038
P <sub>1</sub>	11/09	15	125,9701	128,0598	135,6854
P <sub>2</sub>	17/10	10	101,4583	98,1664	104,2145
P <sub>3</sub>	11/09	16	125,0274	127,0138	134,5061
P <sub>4</sub>	12/09	8	123,4381	125,3149	132,0012
P <sub>5</sub>	14/09	8	118,9484	120,7563	126,3202
P <sub>6</sub>	17/09	8	111,1275	111,8952	118,1282
P <sub>7</sub>	20/09	8	107,0317	106,3752	112,1025
P <sub>8</sub>	24/09	8	103,9531	102,4006	107,7650
P <sub>9</sub>	28/09	8	102,8356	100,0257	105,9002
P <sub>10</sub>	02/10	8	102,3054	99,2847	105,3944
P <sub>11</sub>	09/10	8	102,2864	99,2586	105,3325
P <sub>12</sub>	16/10	8	102,2813	99,2531	105,3279

Tabela B-3.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	24	32	25
Massa de sólido úmido (g)	31,6159	39,3177	41,2816
Massa de sólido seco (g)	7,1041	9,4243	9,8107
Teor de sólidos (%)	22,47	23,97	23,77

Tabela B-3.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	24	32	25	
t <sub>0</sub>	0	22,47	23,97	23,77	23,40
t <sub>1</sub>	0,33	23,16	24,62	24,46	24,08
t <sub>2</sub>	1	24,43	25,77	26,09	25,43
t <sub>3</sub>	3	28,89	29,44	30,74	29,69
t <sub>4</sub>	6	42,35	40,70	41,35	41,47
t <sub>5</sub>	9	56,04	53,45	55,43	54,97
t <sub>6</sub>	13	74,01	69,00	73,43	72,15
t <sub>7</sub>	17	83,76	83,52	85,34	84,21
t <sub>8</sub>	21	89,35	89,39	89,26	89,33
t <sub>9</sub>	28	89,56	89,61	89,77	89,65
t <sub>10</sub>	35	89,62	89,66	89,81	89,70

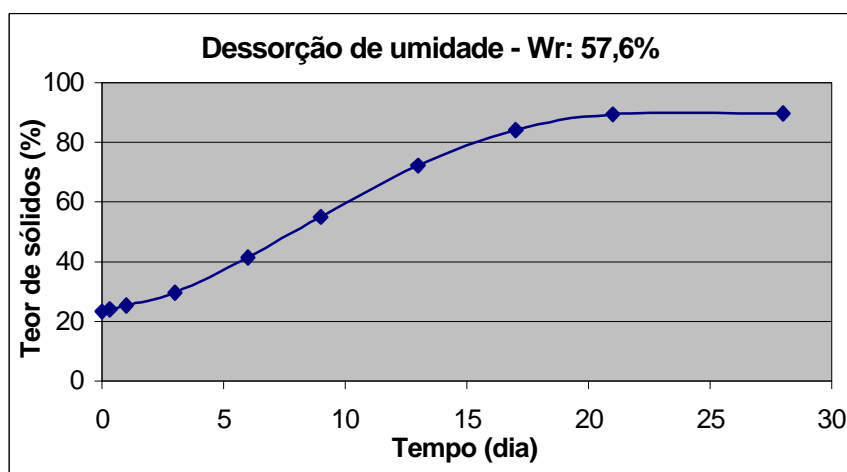


Figura B-3 – Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 57,6%.

**Experiência B-4** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.

Tabela B-4.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		75,3 %
			Sal:		NaCl
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			7	9	21
P <sub>0</sub>	10/09	8	88,3934	76,8906	90,3247
P <sub>1</sub>	11/09	15	117,7314	106,1031	132,5046
P <sub>2</sub>	17/10	10	95,0882	83,645	100,0453
P <sub>3</sub>	11/09	16	117,1308	105,5513	131,1745
P <sub>4</sub>	12/09	8	116,0588	104,4391	129,2937
P <sub>5</sub>	14/09	8	113,4550	101,6832	124,9853
P <sub>6</sub>	17/09	8	108,9322	96,5845	118,4562
P <sub>7</sub>	20/09	8	104,3871	93,0392	114,0041
P <sub>8</sub>	24/09	8	100,9121	89,9315	108,7834
P <sub>9</sub>	28/09	8	98,3591	87,4536	104,7202
P <sub>10</sub>	02/10	8	97,2357	85,9417	103,2505
P <sub>11</sub>	09/10	8	96,8446	85,4101	102,5322
P <sub>12</sub>	16/10	8	96,6843	85,2706	102,3304

Tabela B-4.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	7	9	21
Massa de sólido úmido (g)	29,338	29,2125	42,1799
Massa de sólido seco (g)	6,6948	6,7544	9,7206
Teor de sólidos (%)	22,82	23,12	23,05

Tabela B-4.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	7	9	21	
$t_0$	0	22,82	23,12	23,05	23,00
$t_1$	0,33	23,30	23,57	23,80	23,55
$t_2$	1	24,20	24,52	24,94	24,55
$t_3$	3	26,71	27,24	28,05	27,33
$t_4$	6	32,60	34,30	34,55	33,82
$t_5$	9	41,86	41,83	41,05	41,58
$t_6$	13	53,48	51,79	52,66	52,64
$t_7$	17	67,18	63,94	67,53	66,22
$t_8$	21	75,71	74,63	75,20	75,18
$t_9$	28	79,22	79,28	79,63	79,38
$t_{10}$	35	80,75	80,60	80,97	80,77

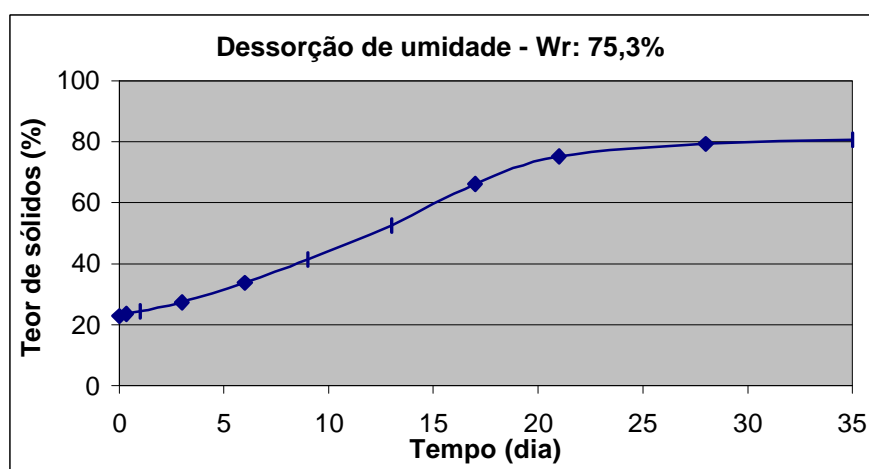


Figura B-4 – Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 75,3%.



**Experiência B-5** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.

Tabela B-5.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		
			Sal:		
			<b>84,3 %</b>		
			KCl		
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			<b>26</b>	<b>41</b>	<b>37</b>
P <sub>0</sub>	10/09	8	84,9336	82,7456	86,5255
P <sub>1</sub>	11/09	15	119,3798	121,5353	144,9894
P <sub>2</sub>	17/10	10	92,9029	91,6045	99,9556
P <sub>3</sub>	11/09	16	118,9173	121,0780	143,9204
P <sub>4</sub>	12/09	8	118,1329	120,1809	142,3434
P <sub>5</sub>	14/09	8	116,0616	117,3024	138,0000
P <sub>6</sub>	17/09	8	112,6387	115,0263	134,4802
P <sub>7</sub>	20/09	8	109,4853	111,1382	128,9678
P <sub>8</sub>	24/09	8	105,1201	106,5506	122,9582
P <sub>9</sub>	28/09	8	102,0734	102,6114	116,6246
P <sub>10</sub>	02/10	8	99,8846	99,5988	112,2553
P <sub>11</sub>	09/10	8	97,5893	96,8668	107,9613
P <sub>12</sub>	16/10	8	97,1028	96,4435	106,8859

Tabela B-5.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	<b>26</b>	<b>41</b>	<b>37</b>
Massa de sólido úmido (g)	34,4462	38,7897	58,4639
Massa de sólido seco (g)	7,9693	8,8589	13,4301
Teor de sólidos (%)	23,14	22,84	22,97

Tabela B-5.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	26	41	37	
t <sub>0</sub>	0	23,14	22,84	22,97	22,98
t <sub>1</sub>	0,33	23,45	23,11	23,40	23,32
t <sub>2</sub>	1	24,00	23,66	24,06	23,91
t <sub>3</sub>	3	25,60	25,64	26,09	25,78
t <sub>4</sub>	6	28,76	27,44	28,01	28,07
t <sub>5</sub>	9	32,46	31,20	31,64	31,77
t <sub>6</sub>	13	39,48	37,21	36,86	37,85
t <sub>7</sub>	17	46,50	44,59	44,62	45,24
t <sub>8</sub>	21	53,30	52,57	52,20	52,69
t <sub>9</sub>	28	62,97	62,73	62,65	62,79
t <sub>10</sub>	35	65,49	64,67	65,96	65,37

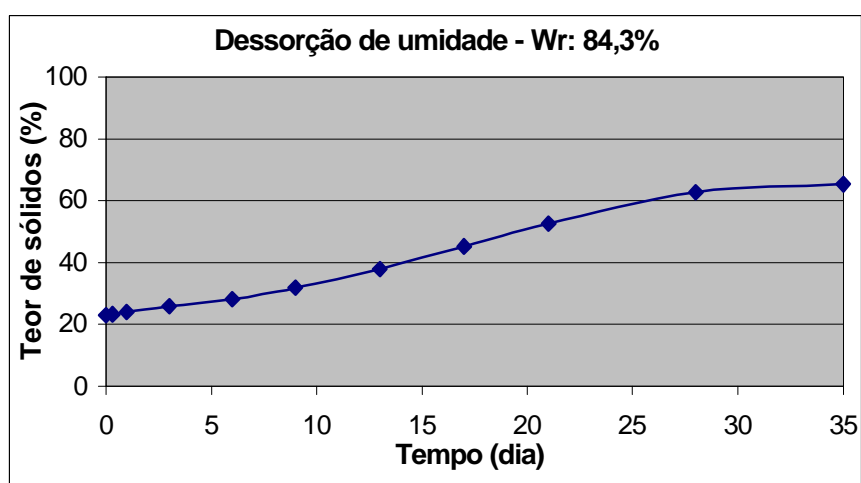


Figura B-5 – Curva de desorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 84,3%.

**Experiência B-6** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.

Tabela B-6.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		93,6 %
			Sal:		KNO <sub>3</sub>
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			3	18	43
P <sub>0</sub>	10/09	8	86,9003	89,1538	90,1231
P <sub>1</sub>	11/09	15	132,7381	136,1844	144,8195
P <sub>2</sub>	17/10	10	97,4826	99,8852	102,8264
P <sub>3</sub>	11/09	16	132,4753	135,8573	144,2582
P <sub>4</sub>	12/09	8	132,4474	135,1726	143,3434
P <sub>5</sub>	14/09	8	128,9975	132,7965	140,1848
P <sub>6</sub>	17/09	8	126,3865	128,8974	136,6837
P <sub>7</sub>	20/09	8	121,9832	124,8839	132,3532
P <sub>8</sub>	24/09	8	116,9702	119,9893	126,0191
P <sub>9</sub>	28/09	8	112,8893	116,0572	121,7554
P <sub>10</sub>	02/10	8	110,7226	113,6356	118,6982
P <sub>11</sub>	09/10	8	109,8143	112,2228	116,3852
P <sub>12</sub>	16/10	8	108,5956	111,1353	115,1162

Tabela B-6.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	3	18	43
Massa de sólido úmido (g)	45,8378	47,0306	54,6964
Massa de sólido seco (g)	10,5823	10,7314	12,7033
Teor de sólidos (%)	23,09	22,82	23,23

Tabela B-6.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	3	18	43	
t <sub>0</sub>	0	23,09	22,82	23,23	22,95
t <sub>1</sub>	0,33	23,22	22,98	23,47	23,10
t <sub>2</sub>	1	23,23	23,32	23,87	23,28
t <sub>3</sub>	3	25,14	24,59	25,38	24,86
t <sub>4</sub>	6	26,80	27,00	27,28	26,90
t <sub>5</sub>	9	30,16	30,03	30,08	30,10
t <sub>6</sub>	13	35,19	34,80	35,39	35,00
t <sub>7</sub>	17	40,72	39,89	40,16	40,30
t <sub>8</sub>	21	44,42	43,83	44,46	44,13
t <sub>9</sub>	28	46,18	46,52	48,37	46,35
t <sub>10</sub>	35	48,78	48,82	50,83	48,80

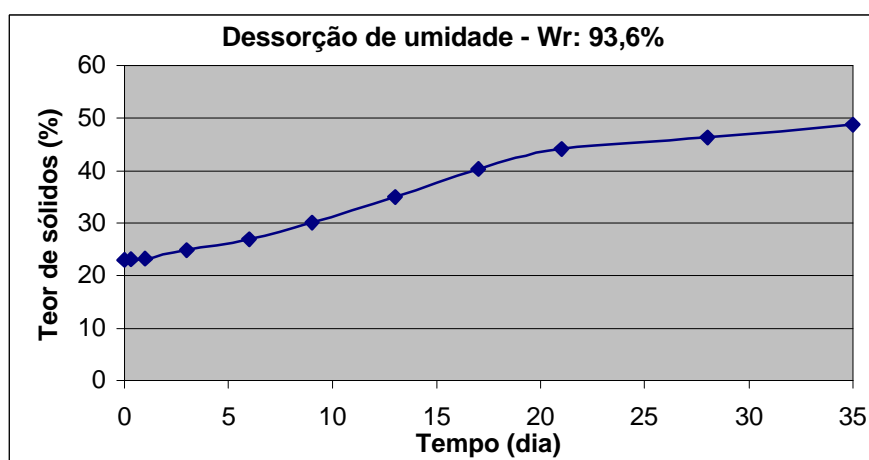


Figura B-6 – Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) de 93,6%.

**Experiência B-7** – Dessorção de umidade de amostras de lodo desidratado, condicionadas em ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.

Tabela B-7.1 – Planilha de resultados das pesagens das amostras de lodo.

Umidade de equilíbrio			Umidade relativa ( $W_r$ ):		~100 %
			Sal:		-
Massas das amostras de lodo (g)					
P	Data (2001)	Hora	Identificação das cápsulas		
			44	47	48
P <sub>0</sub>	10/09	8	89,5939	87,3059	91,7689
P <sub>1</sub>	11/09	15	123,734	117,1197	138,5682
P <sub>2</sub>	17/10	10	97,2507	94,0302	102,4326
P <sub>3</sub>	11/09	16	123,5533	116,9852	138,4564
P <sub>4</sub>	12/09	8	123,3080	116,7923	138,2884
P <sub>5</sub>	14/09	8	122,9770	116,5829	138,0036
P <sub>6</sub>	17/09	8	122,5505	116,1876	137,6112
P <sub>7</sub>	20/09	8	122,2427	115,8951	137,1863
P <sub>8</sub>	24/09	8	121,9801	115,5897	136,6379
P <sub>9</sub>	28/09	8	121,7206	115,4352	136,3475
P <sub>10</sub>	02/10	8	121,5404	115,2415	136,0483
P <sub>11</sub>	09/10	8	121,4560	115,1083	135,8323
P <sub>12</sub>	16/10	8	121,4312	115,0872	135,7696

Tabela B-7.2 – Massas e teores de sólidos das amostras de lodo do experimento de dessorção de umidade.

	Identificação das cápsulas		
	44	47	48
Massa de sólido úmido (g)	34,1401	29,8138	46,7993
Massa de sólido seco (g)	7,6568	6,7243	10,6637
Teor de sólidos (%)	22,43	22,55	22,79

Tabela B-7.3 – Teores de sólidos das amostras de lodo para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.

tempo		Teor de sólidos (%)			Média
		Cápsulas			
	(dia)	44	47	48	
t <sub>0</sub>	0	22,43	22,55	22,79	22,49
t <sub>1</sub>	0,33	22,55	22,66	22,84	22,60
t <sub>2</sub>	1	22,71	22,80	22,92	22,76
t <sub>3</sub>	3	22,94	22,97	23,06	22,95
t <sub>4</sub>	6	23,23	23,28	23,26	23,26
t <sub>5</sub>	9	23,45	23,52	23,48	23,49
t <sub>6</sub>	13	23,64	23,77	23,77	23,71
t <sub>7</sub>	17	23,83	23,90	23,92	23,87
t <sub>8</sub>	21	23,97	24,07	24,08	24,02
t <sub>9</sub>	28	24,03	24,19	24,20	24,11
t <sub>10</sub>	35	24,05	24,20	24,24	24,13

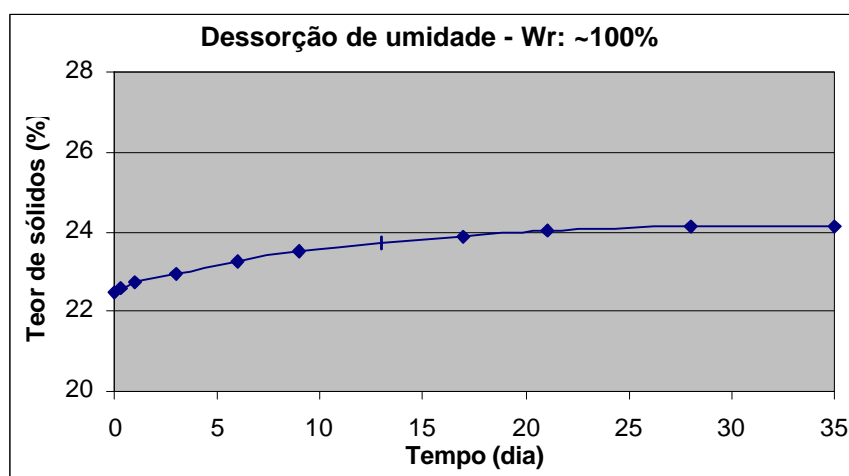


Figura B-7 – Curva de dessorção de umidade para ambiente com umidade relativa ( $W_r$ ) próxima a 100%.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEM SOBRINHO, P. - Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Capítulo 1. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 1999.

ALEM SOBRINHO, P. - Tratamento de esgoto e geração de lodo. In: **Biossólidos na agricultura**. Capítulo 7. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.

ANDREOLI, C.V.; LARA, A.I.; FERNANDES, F. – **Reciclagem de biossólidos – transformando problemas em soluções**. Sanepar, Finep, 1999.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O.A. – **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Embrapa, 2000.

CARVALHO, P.C.T.; CARVALHO, F.J.P.C. – Legislação sobre biossólidos. In: **Biossólidos na agricultura**. Capítulo 7. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.

CARVALHO, P.C.T. **Uso agrícola do biossólido gerado na ETE de Franca**. NUPEGEL/USP, Piracicaba, 1999.

CARVALHO, P.C.T. **Utilização de lodo de esgoto na agricultura**. ESALQ/USP, Piracicaba e IPT/CEFEP, São Paulo.

CARVALHO, P.C.T.; BARRAL, M.F. **Aplicação de lodo de esgoto como fertilizante**. Fertilizantes, 3(2):3-5. São Paulo, 1981.

CETESB Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – **Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas – Critérios para projeto e operação – P 4.230**. Manual Técnico, CETESB, São Paulo, 1999.

CEEJ - Consórcio ETEP-ESTÁTICA-JNS. **Diretrizes para implantação da desidratação mecânica nas ETEs PNM e SMG e secagem térmica na ETE SMG**. Relatório do contrato SABESP 14.002/93, Rev 3. Maio, 1996.

CEEJ - Consórcio ETEP-ESTÁTICA-JNS. **Plano diretor de uso/disposição dos lodos das ETEs da RMSP**. São Paulo, 1998.

DEGREMONT. **Filtro Prensa de Esteira**. São Paulo, 1995. (catálogo).

FERNANDES, F. Estabilização e higienização de biossólidos. In: **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Capítulo 3. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 1999.

FERTIPAR – Fertilizantes do Paraná. **Características de qualidade dos fertilizantes**. Curitiba – PR: Disponível em: <[www.fertipar.com.br](http://www.fertipar.com.br)>. Acesso em 04 dez. 2001.

FOUST, A.S.; WENZEL L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias**. 2<sup>nd</sup>.ed. Trad. Macedo H. e outros, UFRJ, LTC Editora. 1979.

FROST, R.; POWLESLAND, C.; HALL, J.E.; NIXON, S.C.; IOUNG C.P. **Review of sludge treatment and disposal techniques**. Report n° DoE 2306-M/1, Water Research Centre, 1990.

GOMIDE, R. – **Operações unitárias com sistemas sólidos granulares**. 1º volume. Câmara Brasileira do Livro. São Paulo, 1983.

GRANDIN, S.R. – **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

IPT/CEFER – **Manual de fertilizantes**. segunda edição. São Paulo, 1976.

IPT/SABESP – **Aproveitamento de lodo de esgoto como fertilizante**. Projeto IPT n° 1598010. São Paulo, 1983.

LABUZA, T. P. **Standard procedure for isotherm determination**. Cereal Foods World, v.28, n.4, p258, 1983.

LABUZA, T. P. **Moisture sorption: Practical aspects of isotherm measurement and use**. American Association of Cereal Chemists, Minneapolis, 1984.

MALAVOLTA, E. **Fertilizantes e seu impacto ambiental: micronutrientes e metais pesados, mitos, mistificações e fatos**. São Paulo: Produquímica, 1994.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 4<sup>th</sup>.ed. McGraw-Hill, 1988.

MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; MELO, V.P. O uso agrícola do biossólido e as propriedades do solo. In: **Biossólidos na agricultura**. Capítulo 12. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.



MELO, W.J.; MARQUES, M.O.; MELO, V.P. Potencial do lodo de esgoto como fonte de nutrientes para as plantas. In: **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto**. Capítulo 5. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 1999.

METCALF & EDDY, INC. - **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill, 1991.

MIKI, M.K. – **Utilização de polímeros para condicionamento de lodo de ETE para desidratação em filtro prensa de placas**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.

NETZSCH. **Desaguamento e secagem**. Pomerode, 1999. (catálogo).

NETZSCH. **Filtro prensa tipo diafragma para desaguamento de lodos**. Pomerode, s.d. (Informativo técnico).

PACHECO, C.R.F. **Fundamentos de Processos de Secagem**. Apostila. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 1995.

PERRY, R.H.; CHILTON, C.H. **Manual de engenharia química**. 5<sup>a</sup> ed. Trad. Macedo H. e outros, UFRJ, ed. Guanabara Dois. 1979.

PIVELI, R.P.; MORITA, D.M. – **Caracterização de águas residuárias – Sólidos**, Apostila, Janeiro, 1996.

QASIN S.R. – **Wastewater treatment plants – Planning, design, and operation**. CBS College Publishing, New York, 1985.

ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários**. Ed. Shigueo Watanabe, Publicação ACIESP nº 22, 1980.

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – **Manual de utilização do bio sólido na agricultura**. Sabesp-UN Pardo e Grande, Franca, 2000.

SEGHERS. **Instalação de secagem de lodos de São Miguel – Manual de operação**. Seghers Better Technology, SBT-SML1-04-01. São Paulo, 2001.

SEGHERS. **Seghers pellets, the best pellets in the world**. Willebroek, s.d. (catálogo).

SEGHERS. **Sludge dryer & pelletizer**. Willebroek, s.d. (catálogo).

SPIESS, W. E. L.; WOLF, W. R. **Critical evaluation of methods to determine moisture sorption isotherms**. In: ROCKLAND, L.B.; BEUCHAT, L.R. *Water Activity: Theory and Applications to Food*. New York, Marcel Dekker Inc., New York, p. 215-233. 1987.

STOLOFF, L. **Calibration of water activity measuring instruments and devices: collaborative study.** Journal of the Association of Official Analytical Chemists, v.61,n.5, p. 1166-1178, 1978.

STRAUS, E.L. Normas da utilização de lodos de esgoto na agricultura. In: **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Capítulo 13. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 1999.

TIZI, R.; CRAEN M.V. **Production of biossolids by thermal sludge drying – Pelletizing,** SEGHERSbetter technology, Willebroek, s.d.

TSUTIYA M.T. Alternativas de disposição final de biossolídos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: **Impacto ambiental do uso agrícola do lodo de esgoto.** Capítulo 4. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariuna, 1999.

TSUTIYA M.T. Características de biossolídos gerados em estações de tratamento de esgotos. In: **Biossolídos na agricultura.** Capítulo 4. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.

TSUTIYA M.T. Alternativas de disposição final de biossolídos. In: **Biossolídos na agricultura.** Capítulo 5. Sabesp, Escola Politécnica-USP, ESALQ-USP/Nupegel, UNESP-Jaboticabal. São Paulo, 2001.

TSUTIYA M.T. – **Alternativas de disposição final de biossolídos gerados em estações de tratamento de esgotos.** Revista Saneas, n.10, set. 1999.

TSUTIYA M.T. – **Metais pesados: O principal fator limitante para o uso agrícola de biossolídos das estações de tratamento de esgotos.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Rio de Janeiro, 1999.

TSUTIYA M.T. – **Tecnologias emergentes para a disposição final de biossolídos das estações de tratamento de esgotos.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Rio de Janeiro, 1999.

TSUTIYA M.T. – **Uso agrícola de biossolídos de estações de tratamento de esgotos sanitários do Estado de São Paulo.** 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES, Rio de Janeiro, 1999.

UNIDO – United Nations Industrial Development Organization – **Fertilizer manual.** Development and transfer of technology – series n.13, New York, 1980.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. **Process design manual for sludge treatment and disposal,** EPA 625/1-79-011, Washington, September, 1979.

WEBBER, M.D. **Land utilization of sewage sludge – A discussion paper.** Expert Committee on Soil and Water Management. Canada, 1984.

WEBBER, M.D.; BATES, T.E. **Municipal sludge (biossolids) use on agricultural land.** Water Technology Corporation. Canada, 1997.

WEF - Water Environment Federation. **Operation of municipal wastewater treatment plants.** Manual of practice. 5<sup>a</sup> ed. Alexandria, 1996.

WEF - Water Environment Federation. **Wastewater residuals stabilization.** WEF Manual of practice, FD-9, Alexandria, 1995.

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.