## INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



## Renan Hiroshi Saito

Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, Piracicaba-SP

Trabalho de Graduação 2013

Civil

## Renan Hiroshi Saito

# ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO GERADO NA ETE-PIRACICAMIRIM, PIRACICABA-SP

Orientador Prof. Dr. Marcelo De Julio (ITA)

Engenharia Civil-Aeronáutica

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA

#### Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP) Divisão de Informação e Documentação

Saito, Renan H.

Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, Piracicaba-SP / Renan Hiroshi Saito.

São José dos Campos, 2013.

145f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013. Orientador: Prof. Dr. Marcelo De Julio.

1. Lodo de ETE 2. Disposição final 3. Sustentabilidade I. Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Divisão de Engenharia Civil. II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SAITO, Renan H. Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, Piracicaba-SP. 2013. 145f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

#### CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Renan Hiroshi Saito

TÍTULO DO TRABALHO: Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado

na ETE-Piracicamirim, Piracicaba-SP

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2013

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Reman Hirashi Saita

Renan Hiroshi Saito Rua Antonio Pereira Gaspar, 505 – Parque Universitário CEP 17607-350 – Tupã – SP

## ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO FINAL DO LODO GERADO NA ETE-PIRACICAMIRIM, PIRACICABA-SP

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação

Renan Hiroshi Saito
Autor

Prof. Dr. Marcelo De Julio (ITA)
Orientador

Prof. Dr. Eliseu Lucena Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Dedico este trabalho à minha família, aos meus amigos e aos meus professores.

## **AGRADECIMENTOS**

À empresa Águas do Mirante, que me recebeu de braços abertos, concedendo a oportunidade de desenvolver este trabalho de graduação e, em particular, ao Josélio, pelos esforços empreendidos para viabilizar esta oportunidade.

Ao Clayton e à sua equipe, por terem me auxiliado em minhas visitas de campo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo De Julio, por ter me guiado, com extrema motivação e empenho, durante todo o trabalho e pela dedicação e disponibilidade.

Ao meu relator Instrutor Dr. Márcio Antonio da Silva Pimentel, que contribuiu para o aperfeiçoamento deste trabalho com seu conhecimento e experiência na área.

À minha família, por ter me ajudado em todos os momentos.

A todos os meus amigos que me ajudaram e me acompanharam.

A todos os meus professores, pelos ensinamentos essenciais, por toda a dedicação e por terem compartilhado seus conhecimentos para a minha formação, não só profissional, mas também pessoal.



## **RESUMO**

Este trabalho de graduação teve como objetivo estudar as alternativas relacionadas ao tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, focando em soluções que envolvam um gerenciamento sustentável do lodo.

A partir da revisão da literatura, percebeu-se a importância da produção de lodo e suas características na concepção da fase líquida, uma vez que nos tratamentos anaeróbios a quantidade de lodo gerada é menor e ainda apresenta melhores características para o desaguamento se comparado aos processos aeróbios.

Das alternativas de disposição final pesquisadas, vale destacar a utilização na agricultura por ser adequada para o cenário brasileiro de clima tropical e extensas áreas. Foram levantados os parâmetros, de acordo com a legislação vigente, que contemplam desde o potencial agronômico do lodo, quanto à presença de patógenos, metais pesados e substâncias orgânicas poluentes. Um resumo dos parâmetros para caracterização do lodo para o uso agrícola é apresentado no Apêndice A.

Dessa forma, espera-se que o presente trabalho seja um instrumento de auxílio no gerenciamento sustentável do lodo em ETEs, podendo-se agregar valor a um resíduo sólido de forma a minimizar os impactos ambientais.

Palavras-chave: lodo; disposição final; sustentabilidade; tratamento anaeróbio; esgoto.

**ABSTRACT** 

This graduation work intended to study alternatives to treatment and final dispose of

WWTP-Piracicamirim sludge, mainly solutions involving a sustainable sludge management.

Based on bibliography research, it was possible to remark the importance of sludge

production and its characteristics in the liquid phase conception, since anaerobic treatments

have a minor sludge production and better dewatering characteristics in comparison with

conventional aerobic process.

Final disposal alternatives were researched and it is worth to emphasize the sludge use

in agriculture that is appropriate for the tropical weather and large areas Brazilian scenario.

The parameters were reviewed in accordance with the ruling legislation concerning sludge

agronomic potential, heavy metals and pollutants organic matter. A summary of parameters

for agricultural sludge characterization is presented in Appendix A.

Therefore, it is expected that this work can be used as an auxiliary instrument for

sustainable sludge management in WWTP, since value is aggregated in a solid residue in a

way that minimizes environmental impacts.

**Keywords:** sludge; final dispose; sustainability; anaerobic digestion; sewage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma da ETE-Piracicamirim.	21
Figura 1 – Gradeamento.	22
Figura 2 - Caixa de Areia Aerada.	22
Figura 3 – Sistema de Tratamento de Gases.	23
Figura 4 - Caixa de Distribuição.	24
Figura 5 – Reator UASB.	24
Figura 6 - Vista superior do Reator UASB.	24
Figura 7 – Tanque de Aeração.	26
Figura 8 - Decantadores Secundários.	26
Figura 9 - Calha Parshall: efluente final.	27
Figura 10 – Centrífuga.	28
Figura 11 – Lodo Desaguado	28
Figura 12 – Tanques de preparação de polímero	29
Figura 13 – Polímero utilizado para desaguamento.	29
Figura 15 – Esquema das unidades de lodos ativados.	35
Figura 16 – Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.	36
Figura 17 – Fluxograma de um sistema de aeração prolongada	37
Figura 18 – Fluxograma de um sistema de lodos ativados com operação intermitente	39
Figura 19 – Desenho esquemático de um reator UASB.	45
Figura 20 - Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios	47
Figura 21 - Fluxograma de um sistema composto por reator UASB seguido por lodos	
ativados	48
Figura 22 – Representação esquemática de modelos de leitos com diferentes coberturas	59
Figura 23 – Funcionamento da bag de geotêxtil	69
Figura 24 - Esquema de um secador por leito fluidizado.	72
Figura 25 - Secador tipo túnel.	73
Figura 26 – Exemplo genérico da evolução da temperatura de uma leira em compostagen	n 76
Figura 27 – Hierarquia na legislação.	86
Figura 28 – Compartimento de um aterro sanitário.	101
Figura 29 – Princípio da desintegração do lodo.	107
Figura 30 – Fluxograma do sistema para um gerenciamento sustentável do lodo	113

Figura 31 – Gaseificação do lodo e processo de produção de argila expandida	.114
Figura 32 – Pirólise do lodo e processo de produção do adsorvente	. 115
Figura 33 – Principais produtos gerados nos tratamento de efluentes.	.126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados típicos para diversos tipos de lodo desaguados em filtros prensa de	
esteira.	63
Tabela 2 – Comparação do filtro prensa de placas com outros equipamentos de	
desaguamento.	64
Tabela 3 - Dados típicos para diversos tipos de lodo desaguados em filtros prensa de	
placas.	65
Tabela 4 - Comparação da centrífuga com outros equipamentos de desaguamento	66
Tabela 5 – Características de desempenho da centrífuga.	66
Tabela 6 – Contaminantes em Condicionadores de solo.	84
Tabela 7 - Especificações dos fertilizantes orgânicos mistos e compostos	89
Tabela 8 – Teores mínimos de nutrientes em fertilizantes orgânicos	90
Tabela 9 – Parâmetros relativos ao potencial agronômico.	92
Tabela 10 - Limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos	93
Tabela 11 – Lodos de esgoto ou produto derivado – substâncias inorgânicas	93
Tabela 12 – Concentrações limites de metais no lodo	94
Tabela 13 - Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/	/kg,
base seca)	94
Tabela 14 – Concentrações permitidas de substâncias orgânicas em solos agrícolas	95
Tabela 15 – Poluentes Orgânicos Persistentes (POP's) no lodo.	96
Tabela 16 – Valor máximo admitido dos agentes patógenos.	97
Tabela 17 – Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patógenos	97
Tabela 18 - Classificação do Lodo quanto à presença de patógenos	98
Tabela 19 – Concentração máxima de agentes patógenos.	99
Tabela 20 - Parâmetros de projeto do sistema de lodos ativados como pós-tratamento de	
efluentes de reatores anaeróbios (esgotos domésticos).	117
Tabela 21 – Resultados Ensaios de Solubilização.	121
Tabela 22 – Resultados Ensaios de Lixiviação.	122
Tabela 23 – Resultados Ensaios de Massa Bruta.	122
Tabela 24 – Comparação dos parâmetros de potabilidade e da NBR 10.004.	123

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

APA - Áreas de Proteção Ambiental

APM - Área de Proteção ao Manancial

APP - Área de Preservação Permanente

ATP - Adenosina trifosfato

CE - Condutividade elétrica

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CRA - Capacidade de Retenção de Água

CTC - Capacidade de Troca Catiônica

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ETA - Estações de Tratamento de Água

ETE - Estações de Tratamento de Esgoto

ha - hectares

ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica

kg - kilograma

LETA - Lodo gerado em ETA

LETE - Lodo gerado em ETE

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

NMP - Número Mais Provável

OMS - Organização Mundial da Saúde

OSA – *Oxic-settling anaerobic* 

pH - Potencial hidrogeniônico

PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

POA - Processos oxidativos avançados

POP - Poluentes Orgânicos Persistentes

PPP – Parceria Público-Privada

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SANEPAR - Companhia de Saneamento do Paraná

SEMAE - Serviço Municipal de Água e Esgotos

SS - Sólidos Suspensos

SST - Sólidos Suspensos Totais

SSV - Sólidos Suspensos Voláteis

ST - Sólidos Totais

SV - Sólidos Voláteis

TG - Trabalho de graduação

ton - toneladas

UASB - Up-flow Anaerobic Sludge Blanket

UFC - Unidade Formadora de Colônia

UFF – Unidade Formadora de Foco

UFP – Unidade Formadora de Placa

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO		18
2 OBJETIVOS	••••••	31
2.1 OBJETIVO GERAL		31
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS		31
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	•••••	32
3.1 LODO: CARACTERÍSTICAS E PRODUÇÃO		32
3.2 TRATAMENTO AERÓBIO		33
3.2.1 Metabolismo Oxidativo		34
3.2.2 Lodos Ativados		34
3.2.2.1 Lodos ativados convencional	36	
3.2.2.2 Lodos ativados por Aeração prolongada	36	
3.2.2.3 Lodos ativados de fluxo intermitente (batelada)	38	
3.2.2.4 Lodos ativados de alta taxa	39	
3.3 TRATAMENTO ANAERÓBIO		40
3.3.1 Digestão anaeróbia		42
3.3.1.1 Hidrólise	43	
3.3.1.2 Acidogênese	43	
3.3.1.3 Acetogênese	43	
3.3.1.4 Metanogênese	43	
3.3.2 Reator UASB		44
3.4 TRATAMENTO ANAERÓBIO E AERÓBIO		46
3.4.1 Lodos ativados para o pós-tratamento de efluente de reator UASB		48
3.5 ADENSAMENTO DO LODO		49
3.5.1 Adensamento por gravidade		50
3.5.2 Adensamento por flotação		50
3.5.3 Adensamento por centrífugas		50
3.5.4 Adensadores de esteira ("belt-press")		51
3.5.5 Adensadores de tambor rotativo		51
3.6 ESTABILIZAÇÃO DO LODO		51
3.6.1 Estabilização com cal		52
3.6.1.1 Pré-tratamento	52	
3.6.1.2 Pós-tratamento	52	
3.6.2 Digestão anaeróbia		53
3.6.3 Digestão aeróbia		53
3.7 CONDICIONAMENTO DO LODO PARA DESAGUAMENTO		54

3.7.1 Fat	tores físicos que afetam o condicionamento		54
3.7.2 Fat	tores químicos que afetam o condicionamento		54
3.7.3 Fat	tores biológicos que afetam o condicionamento		55
3.8 DESA	GUAMENTO DE LODO		56
3.8.1 Mé	etodos de secagem natural		57
3.8.1.1	Leitos de secagem	57	
3.8.1.2	Leitos de secagem pavimentados	60	
3.8.1.3	Leitos de secagem rápida ou leitos de filtragem rápida	60	
3.8.1.4	Leitos de secagem com meio artificial	61	
3.8.1.5	Lagoas de secagem do lodo	61	
3.8.2 Mé	etodos mecânicos		62
3.8.2.1	Filtros prensa de esteira ("Belt-filter press")	62	
3.8.2.2	Filtros prensa de placas	63	
3.8.2.3	Centrifugas	65	
3.8.2.4	Prensa Parafuso ("Screw Press")	67	
3.8.2.5	Incineração	67	
3.8.2.6	Pirólise	68	
3.8.2.7	Bag, tubo ou membrana de geotêxtil (Geotube)	69	
3.8.3 Sec	cagem Térmica		70
3.8.3.1	Secadores rotativos	71	
3.8.3.2	Secadores por dispersão de ar	71	
3.8.3.3	Secadores de leito fluidizado	71	
3.8.3.4	Secadores tipo túnel	72	
3.8.3.5	Secadores mistos (direto e indireto)	73	
3.9 DESIN	NFECÇÃO DO LODO		73
3.9.1 Ca	leação		74
3.9.2 Co	mpostagem		74
3.9.2.1	Sistema Windrow ou Leiras Reviradas	77	
3.9.2.2	Sistema de Leiras Estáticas	77	
3.9.2.3	Reatores Biológicos (In-Vessel)	77	
3.9.3 Co	-compostagem		78
3.9.4 Ve	rmicompostagem		78
3.9.5 Ox	idação úmida		79
3.9.6 Ad	ição de ácidos orgânicos		80
3.10 DISPO	OSIÇÃO FINAL DO LODO		80
3.10.1 Us	o do lodo em Plantações Florestais		81
	o de lodo na Recuperação de Áreas Degradadas		
	Condicionador do solo		
3.10.3 Us	o de Lodo de esgoto na Produção de Substrato Vegetal		85
	o do lodo na Agricultura		
3.10 4 1	Potencial agronômico	87	

3.10.4.2	concentração de metais pesados	92	
3.10.4.3	concentração de material orgânico tóxico	95	
3.10.4.4	presença de patógenos	97	
3.10.4.5	estabilidade do lodo	99	
3.10.4.6	Restrições de uso do lodo ou produto derivado	99	
3.10.4.7	Fiscalização MAPA	100	
3.10.5 Cob	ertura diária e final de aterro sanitário		. 101
3.10.6 Uso	do lodo no controle de erosão hídricas		. 103
3.10.7 Con	strução Civil		. 103
3.10.7.1	Produtos Cerâmicos	104	
3.10.7.2	Agregado leve	104	
3.10.7.3	Matriz de Cimento Portland	105	
3.10.7.4	Componentes de Mistura Asfáltica	105	
3.10.8 Uso	do lodo na produção de biodiesel		. 105
3.11 MÉTO	DOS PARA MINIMIZAÇÃO DA GERAÇÃO DE LODO BI	IOLÓGICO	. 106
3.11.1 Mét	odos físico-químicos		. 107
3.11.1.1	Ultrassom	107	
3.11.1.2	Ozonização	108	
3.11.1.3	Adição de ácido/base	108	
3.11.1.4	Processos de oxidativo avançados (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /O <sub>3</sub> )	108	
3.11.1.5	Condição microaeróbia	109	
3.11.2 Trat	amento térmico		. 109
3.11.2.1	Hidrólise térmica	109	
3.11.3 Trat	amentos Biológicos		. 110
3.11.3.1	Hidrólise biológica por adição de enzimas	110	
3.11.3.2	Desacoplamento metabólico	110	
3.11.3.3	Eco-manipulação (predação de bactérias)	111	
3.12 GEREN	NCIAMENTO SUSTENTÁVEL DO LODO		. 112
3.12.1 Prod	dução de argila expandida		. 114
	dução de adsorvente		
4 CARACT	ERIZAÇÃO DO LODO	•••••	.117
4.1 PRODU	JÇÃO DE LODO		. 117
	dução mista de lodo		
	dução de lodo aeróbia e anaeróbia		
_	SE NBR 10.004		
	ultados		
5 RESULTA	ADO	•••••	. 124
6 DISCUSS	ÃO	•••••	.126

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
APÊNDICE A	142

## 1 Introdução

Saneamento, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), é o controle dos fatores que causam ou podem causar efeitos nocivos sobre o homem, efeitos tais que alterem sua saúde física, mental ou social (PHILIPPI JR e MALHEIROS, 2005). Sendo assim, o saneamento tem caráter preventivo e seu objetivo é promover um ambiente saudável em que as pessoas possam adoecer menos e produzir mais.

Dentre os procedimentos do saneamento podem-se citar o tratamento de água, redes de distribuição de água e coleta de esgoto, tratamento de esgotos, controle de vetores, limpeza pública, drenagem de águas pluviais, coleta e tratamento de resíduos orgânicos e materiais recicláveis.

É percebido um certo descaso por parte da sociedade com relação ao sistema de saneamento como um todo, dada sua "invisibilidade". Ou seja, como não é comum nas cidades deparar-se com estações de tratamento de água e esgoto, adutoras, reservatórios ou usinas de resíduos sólidos, o controle quanto a estes aspectos pelas autoridades competentes e até pela própria sociedade é bastante deficiente, principalmente em países emergentes, como o Brasil.

Os sistemas de tratamento de esgoto geram um resíduo do saneamento, denominado de lodo. O lodo é um resíduo de composição complexa, bastante variável – função das peculiaridades regionais e dos processos em que são gerados – e de disposição final problemática.

Em geral, apresentam em sua constituição elementos de grande valor, possibilitando seu uso como matéria-prima ou insumos de processos industriais, agrícolas e aproveitamento energético. O conceito da reciclagem exige a adoção de alternativas tecnológicas que maximizem os benefícios, mas considerando os riscos ambientais e sanitários decorrentes, de forma a gerar alternativas seguras e economicamente viáveis que garantam a sustentabilidade do processo (ANDREOLI e PEGORINI, 2006).

Por outro lado, alguns componentes como metais pesados, poluentes orgânicos persistentes e os patógenos são perigosos e indesejáveis, dificultando sua utilização e disposição final (ANDREOLI e PEGORINI, 2006).

Os processos e operações de tratamento de lodo visam reduzir o teor de material orgânico biodegradável, a concentração de patógenos e o teor de água para que se obtenha um

material sólido e estável, que não constitua perigo para a saúde e possa ser manipulado e transportado com facilidade e a baixo custo (ANDREOLI e PEGORINI, 2006).

No Brasil, as atividades de tratamento e disposição final do lodo gerado foram negligenciadas por muito tempo. Inicia-se o descaso na concepção do sistema que ignora a gestão de resíduos como, por exemplo, muitos estados que privilegiam o tratamento aeróbio do esgoto em detrimento do anaeróbio, e se estende pelos órgãos de licenciamento ambiental na implementação de obras, e por fim a falta de planejamento nas operações, causando grandes impactos ambientais e custos econômicos.

Estima-se que a produção de lodo no Brasil está entre 220 mil toneladas por ano (PEDROZA *et al.*, 2010) a 372 mil toneladas por ano (FEDRIZZI, 2012).

Quando o Brasil alcançar padrões e abrangência de tratamento de esgoto comparado a países desenvolvidos, a geração de lodo será na ordem de 4 milhões de toneladas por ano (BIOCICLO - USO AGRÍCOLA, 2011).

Dessa forma, deve-se dar a devida atenção ao gerenciamento da produção de lodo, assim como ao tratamento e disposição final. Vale ressaltar que a definição do tratamento do lodo se inicia na concepção da fase líquida (tipo de tratamento), ou seja, a adoção por tratamentos que geram menores quantidades de lodo deve ser buscada. A concepção da fase líquida deve levar em conta a geração de lodo e a suas características, uma vez que a fração dos custos destinados ao tratamento e disposição final do lodo tendem a aumentar dado o cenário atual e o aumento de fiscalização ambiental quanto a destinação de resíduos sólidos. Portanto, a inclusão do gerenciamento do lodo na concepção da fase líquida se torna imprescindível no projeto de qualquer Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

Na cidade de Piracicaba/SP, foi estabelecida uma PPP – Parceria Público-Privada entre a Prefeitura Municipal, por intermédio do SEMAE (Serviço Municipal de Água e Esgotos), e a empresa Águas do Mirante com contrato de 30 anos. A Águas do Mirante, uma empresa do Grupo Equipav, administrada pela holding Aegea Saneamento, foi constituída com o propósito de elevar o índice de tratamento de esgoto a 100% e operar todo o sistema de esgotamento sanitário do município de Piracicaba. O atual sistema apresenta 100% da população urbana atendida com serviços de coleta e afastamento de esgoto. Já o tratamento do esgoto alcança a margem de 70% de toda a produção.

Dentre as várias ETEs operadas pela Águas do Mirante, se destaca a ETE-Piracicamirim, implantada em 1997 pelo SEMAE e projetada para atender 100.000 habitantes. Atualmente, a ETE atende uma quantidade de habitantes superior ao que foi projetado além de receber efluentes industriais, apesar de não ter sofrido ampliações desde a inauguração.

Na ETE-Piracicamirim, são tratados os esgotos coletados por interceptores implantados às margens do Ribeirão Piracicamirim por meio de um tratamento moderno composto por sistema anaeróbio seguido de aeróbio. Esse efluente bruto passa por um gradeamento e medidor de vazão (Calha Parshall), instalados na estação elevatória que recalca o esgoto para ser encaminhado à estação de tratamento. Utiliza-se um sistema de tratamento anaeróbio como pré-tratamento e um sistema aeróbio para tratamento complementar.

O tratamento é realizado em reator UASB seguido de Lodos Ativados, composto pelas unidades de gradeamento mecanizado, caixa de areia aerada, reatores UASB, tanque de aeração (aerado superficialmente e por tubos perfurados no fundo, com retorno de lodo por meio de bombeamento), decantadores secundários, centrífuga para desaguamento do lodo, sistema de tratamento de gases, leito de drenagem para areia sedimentada proveniente da caixa de areia e queimadores de gases como ilustrado no fluxograma da Figura 1.

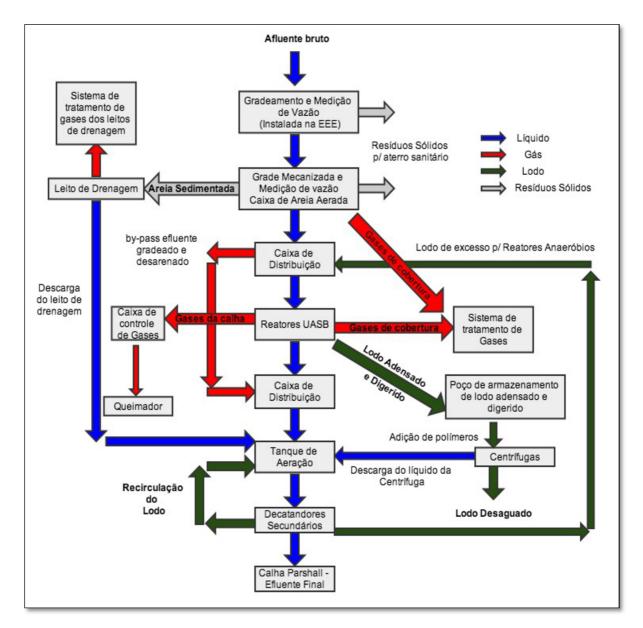


Figura 1 – Fluxograma da ETE-Piracicamirim.

O início do processo se dá pelo tratamento preliminar que consiste na remoção dos sólidos grosseiros e areia, por meio de um gradeamento mais fino e desarenador, respectivamente. A entrada do esgoto bruto é dada em dois canais, sendo um deles com grade inclinada e o outro com peneira rotativa como mostra a Figura 2.



Figura 2 - Gradeamento.

Após o gradeamento, os efluentes dos dois canais se encontram em um único canal que é direcionado para a caixa de areia aerada como mostrada na Figura 3.



Figura 3 - Caixa de Areia Aerada.

A remoção dos sólidos grosseiros é realizada para condicionar o esgoto para as partes componentes das instalações a jusante, uma vez que podem obstruir tubulações, peças especiais, aeradores, bem como dispositivos de entrada e saída. A areia é um material extremamente abrasivo, devendo ser retirada para evitar o desgaste nos equipamentos mecânicos.

Os sólidos grosseiros retirados são enviados para aterro sanitário, enquanto a areia sedimentada é descarregada no leito de drenagem coberto. Nesse leito de secagem são gerados gases que são enviados para o sistema de tratamento de gases e a água de descarga é

bombeada até o tanque de aeração. Na Figura 4 pode-se observar o sistema de tratamento de gases que se trata de um reator biológico de fluxo ascendente recheados com bagacilho de cana, inoculado na camada superior com 100 litros de lodo anaeróbio. O leito de bagacilho de cana recebe na camada superior 6 kg de adubo químico (N:P:K de 4:14:8), na camada intermediária 40 kg de cal hidratada e na camada inferior 10 kg de cloreto férrico.

Vale ressaltar que não há aproveitamento da areia retirada na caixa de areia, sendo que esta poderia ser lavada e utilizada na construção civil como, por exemplo, guias, sarjetas e bancos públicos.



Figura 4 – Sistema de Tratamento de Gases.

Normalmente, se utiliza o tratamento primário como etapa seguinte do tratamento, porém a separação de sólidos sedimentáveis em suspensão e sólidos flutuantes é realizada no Reator UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*) — também conhecido como reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo. Ou seja, o reator anaeróbio substitui o tratamento primário.

Dessa forma, o efluente da caixa de areia é enviado para caixa de distribuição que alimenta os três reatores UASB. Na Figura 5 pode-se observar a caixa de distribuição, na Figura 6 o reator UASB e na Figura 7 a vista superior do reator anaeróbio.



Figura 5 - Caixa de Distribuição.



Figura 6 – Reator UASB.



Figura 7 - Vista superior do Reator UASB.

A remoção da matéria orgânica (dissolvida e particulada) é realizada em reator UASB seguido de Lodos Ativados. No reator UASB ocorre a remoção inicial de matéria orgânica com geração de gases que são recolhidos e tratados. Os gases de cobertura seguem para o sistema de tratamento de gases (Figura 4), enquanto os gases da calha seguem para caixa de controle de gases para ser, posteriormente, queimado por uma chama piloto. A maior fração do gás gerado é formada por metano, porém não há reaproveitamento energético desse gás de alto poder calorífico.

A remoção restante da matéria orgânica é dada pelo processo de Lodos Ativados. O efluente do reator UASB segue para o tanque de aeração que possui aeração superficial juntamente com aeração dada por tubos perfurados no fundo e, em seguida, para os decantadores secundários. A tubulação inserida para complementar a aeração no tanque também tem a função de evitar a sedimentação de material no fundo do reator aeróbio.

O lodo dos decantadores secundários é bombeado de volta ao tanque de aeração (lodo de retorno), enquanto o lodo de excesso é bombeado para o reator UASB para que possa ser adensado e estabilizado. Desta forma, percebe-se que os reatores UASB substituíram os decantadores primários, adensadores e digestores de lodo, além de removerem em média 70% da DBO afluente, diminuindo a demanda por equipamentos de aeração, custos com energia elétrica, dentre outros.

Nos decantadores secundários ocorre a separação sólido-líquido final, com o objetivo de se obter um efluente clarificado e um lodo aeróbio pré-adensado com concentração satisfatória para ser recirculado ao tanque de aeração e o lodo de excesso encaminhado aos reatores UASB. Na Figura 8, pode-se observar o tanque de aeração e na Figura 9 os decantadores secundários.



Figura 8 - Tanque de Aeração.



Figura 9 - Decantadores Secundários.

O efluente final passa pela calha Parshall como mostra a Figura 10 e é lançado no rio Ribeirão-Piracicamirim sem aplicação de qualquer método de desinfecção.

A Estação de Tratamento de Esgoto possui um sistema de "*by-pass*" geral que permite o isolamento das unidades que compõem o sistema como reatores anaeróbios, tanque de aeração e decantadores secundários. O sistema de "*by-pass*" pode auxiliar na operação da estação em situação de colapso e também é útil durante a manutenção de diversas unidades de tratamento.



Figura 10 - Calha Parshall: efluente final.

O lodo proveniente do reator UASB, adensado e estabilizado, apresenta um teor de sólidos de aproximadamente 4% e, após ser desaguado por centrifugação resulta numa torta de constituição semissólida com teor de sólidos da ordem de 20%, porém ainda com presença de patógenos. Na Figura 11, pode-se observar a centrífuga e na Figura 12 o lodo já desaguado proveniente da centrífuga com um teor de sólidos de 20% e pronto para ser disposto em aterro.

O lodo é disposto no aterro BIOLAND®, que é um aterro da cidade de Piracicaba/SP. O custo total com o lodo, após o desaguamento, é de R\$ 107,00 reais o metro cúbico de lodo desaguado que inclui o transporte e disposição final no aterro. Todo o processo de tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim é de responsabilidade da empresa Águas do Mirante, assim como os custos envolvidos.



Figura 11 – Centrífuga.



Figura 12 – Lodo Desaguado.

Para melhorar o condicionamento do lodo a ser desaguado, adiciona-se polímero antes do processo de centrifugação, obtendo-se assim um teor de sólidos superior comparado ao mesmo processo de desaguamento sem polímeros. Na Figura 13 pode-se observar os tanques de preparação do polímero e na Figura 14 o polímero utilizado. O produto utilizado é o OPTILOC 8394 fabricado pela Kemira, que é um polímero catiônico e sintético sendo utilizado a uma concentração de 0,15%, ou seja, a cada litro de água são adicionados 1,5 gramas do polímero.



Figura 13 – Tanques de preparação de polímero.



Figura 14 – Polímero utilizado para desaguamento.

Uma das vantagens do uso de sistemas anaeróbio-aeróbio é que o lodo de excesso do sistema de pós-tratamento da fase líquida por meio de Lodos Ativados é encaminhado para o reator UASB, onde é adensado e estabilizado. Vale ressaltar que, atualmente, não há desinfeção do efluente líquido antes de ser lançado no rio.

A escolha de disposição final do lodo em aterro sanitário não é sustentável, uma vez que o cenário atual brasileiro já conta com falta de espaço nos aterros, sendo que apenas 28,5% dos municípios fazem tratamento do esgoto de acordo com a PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008).

Com o aumento da conscientização da população para as questões ambientais e das exigências dos órgãos de controle ambiental, o número de estações de tratamento de esgotos cresce rapidamente no país e, consequentemente, a produção de lodo aumenta. Isso sem contar com o lodo proveniente das Estações de Tratamento de Água (ETA) e a questão do

aumento de geração de resíduos sólidos urbanos pela população brasileira, que vem crescendo bastante, ou seja, o processo se torna cada vez mais não sustentável quanto ao ciclo de matérias-primas na natureza.

Além disso, deve-se considerar que na opção por destinar o lodo em aterros sanitários não há reaproveitamento econômico dos compostos provenientes do lodo (SPERLING *et al.*, 1999), porém é muitas vezes escolhida por não ser restritiva quanto as características do lodo, apresentando-se como a opção de menor custo atualmente.

## 2 Objetivos

## 2.1 Objetivo Geral

Este trabalho de graduação (TG) visou avaliar alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, no município de Piracicaba-SP. Para isto, compararam-se métodos de desaguamento e desinfecção do lodo apropriados e fez-se a proposição de uma disposição final sustentável.

## 2.2 Objetivos específicos

Em uma visão específica, o estudo teve como objetivo avaliar as potenciais soluções quanto ao desaguamento, comparando-se os métodos de leitos de secagem, lagoas de secagem de lodo, filtro prensa de esteira, filtro prensa de placas, centrifugação, prensa parafuso, incineração, pirólise, *bags* de geotêxtil e secagem térmica e quanto à desinfecção, comparando-se as alternativas de caleação, compostagem, vermicompostagem, oxidação úmida e adição de ácidos orgânicos.

Por fim, fez-se a proposição de uma ou mais soluções sustentáveis quanto à disposição final do lodo como, por exemplo, uso do lodo em plantações florestais, uso do lodo na recuperação de áreas degradadas, uso do lodo na produção de substrato vegetal, uso do lodo como material de cobertura diária e final de aterros sanitários, uso do lodo na agricultura, uso do lodo como matéria-prima na construção civil e uso do lodo na produção de biodiesel.

## 3 Revisão bibliográfica

O tratamento do lodo pode ser realizado de diversas maneiras, dependendo do sistema de tratamento adotado, das características e da produção do lodo. Nos itens a seguir são discutidos os principais aspectos de cada etapa do processo de tratamento e disposição final do lodo.

## 3.1 Lodo: Características e produção

Lodo é o termo utilizado para designar os subprodutos sólidos gerados durante o processo de tratamento de esgoto, excluindo-se os sólidos retirados como material gradeado, areia e escuma (SPERLING e ANDREOLI, 2001). O lodo se caracteriza por apresentar minerais, colóides e partículas oriundas de matéria orgânica decomposta em suspensão e dissolvida no meio aquoso, além de metais pesados, patógenos e contaminantes orgânicos altamente prejudiciais ao homem e ao meio ambiente em geral (JUNIOR e RODRIGUEZ, 2005).

O lodo, em função de suas características intrínsecas, pode ser classificado em lodo primário, lodo secundário ou biológico e lodo químico (SPERLING e GONCALVES, 2001).

O lodo primário é constituído do material sedimentável do esgoto bruto e gerado nos processos de tratamento primário (decantadores primários). O lodo secundário é produzido na degradação da matéria orgânica que ocorre em sistemas de tratamento biológico, podendo ser obtidos em decantadores secundários (no trabalho em questão este lodo é obtido no reator UASB). Por fim, o lodo químico origina-se da precipitação química com sais metálicos, cal ou polímeros. As frações do lodo podem ser divididas em quatro partes (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006):

- Não biodegradável e solúvel; descarregada junto com o efluente;
- Não biodegradável e particulado; é floculada, fazendo parte da fração inerte do lodo;
- Biodegradável e solúvel;
- Biodegradável e particulado.

Vale ressaltar que as frações não biodegradáveis não são metabolizadas nos sistemas aeróbios e nem nos anaeróbios.

Em sistemas biológicos de tratamento de esgoto há uma massa de microrganismos responsável pela degradação ou estabilização da fração biodegradável do lodo, principalmente as bactérias, mas também vírus, arqueas, protozoários, rotíferos e ciliados (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006).

As bactérias heterotróficas usam o material orgânico tanto como fonte de material celular como, também, fonte de energia. Os processos de utilização da matéria orgânica são denominados de anabolismo ou assimilação e catabolismo ou dissimilação. O anabolismo depende da disponibilidade de energia química liberada no catabolismo. A natureza dos produtos estabilizados depende do tipo de bactéria e do ambiente prevalecente no sistema de tratamento. Quanto ao catabolismo, distinguem-se dois processos distintos que são o processo oxidativo e fermentativo. Há ainda que se considerar o processo de decaimento bacteriano, no qual uma parte da própria massa celular serve como fonte de material orgânico para o metabolismo bacteriano, representando uma perda de massa celular.

O metabolismo bacteriano envolve processos que dependem fundamentalmente do ambiente que se desenvolvem as bactérias. Dessa forma, são tratados nos próximos itens os principais aspectos do tratamento aeróbio e anaeróbio como também as particularidades na geração de lodo.

## 3.2 Tratamento Aeróbio

Os sistemas aeróbios para tratamento de esgoto são amplamente utilizados, pois se trata de processo amplamente conhecido e difundido, confiável, sem odor, alta eficiência de tratamento e flexibilidade de operação. Na Europa, desde o início do século XIX já se realizavam experiências sobre a oxidação de esgoto como forma de tratamento para evitar o surgimento de diversas epidemias e doenças que tiveram causas apontadas por falta de saneamento.

Em contrapartida, requerem maior área comparado aos processos associados a reatores UASB, há maior necessidade de controle dos parâmetros medidos em laboratório, alto custo de implantação e operação devido aos gastos com energia para aeração e maior produção de lodo do que em tratamento anaeróbio, além disso, o lodo apresenta características menos propensas ao desaguamento.

O tratamento biológico por lodos ativados é o mais utilizado para a depuração, por vias aeróbias, de efluentes sanitários e industriais caracterizados por contaminação de carga orgânica e produtos nitrogenados, representando um sistema de tratamento com alta taxa de

eficiência de remoção de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO).

O princípio geral deste processo consiste em acelerar o processo de oxidação e decomposição natural da matéria orgânica que aconteceria nos corpos hídricos receptores.

#### 3.2.1 Metabolismo Oxidativo

No processo oxidativo o material orgânico é oxidado por um oxidante extracelular presente no sistema de tratamento. A maior parte da matéria orgânica é convertida em biomassa bacteriana (separada por simples decantação) e em parte mineralizada para CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O. Os oxidantes naturalmente encontrados em sistemas biológicos de tratamento de esgoto são oxigênio, nitrato e sulfato.

Em sistemas aeróbios, o decaimento bacteriano se desenvolve com uma taxa apreciável e parte da massa bacteriana decaída que não é biodegradável, denominada de resíduo endógeno, se acumula no sistema de tratamento. A oxidação da massa celular se chama respiração endógena, enquanto a oxidação de material orgânico se chama respiração exógena.

### 3.2.2 Lodos Ativados

O sistema de lodos ativados é amplamente utilizado, em nível mundial, para o tratamento de águas residuárias domésticas e industriais, em situações em que uma elevada qualidade do efluente é necessária e a disponibilidade de área é limitada (SPERLING *et al.*, 2001). Essas duas situações são típicas para a maioria dos países europeus que são os pioneiros no tratamento por lodos ativados. No Brasil, o processo de lodos ativados foi amplamente difundido pela Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) que trata efluentes domésticos e industriais por lodos ativados desde a década de 70. Por ser a maior companhia de saneamento do país e apresentar bons resultados quanto ao tratamento de efluentes, outras companhias de saneamento acabaram seguindo o mesmo caminho, ou seja, utilizam lodos ativados para o tratamento dos efluentes.

Existem diversas variantes para o processo de lodos ativados, sendo que as partes integrantes e a essência de qualquer sistema de lodos ativados podem ser observados na Figura 15. As duas unidades principais de tratamento são o tanque de aeração como reator aerado e decantadores secundários para sedimentação da parte sólida.

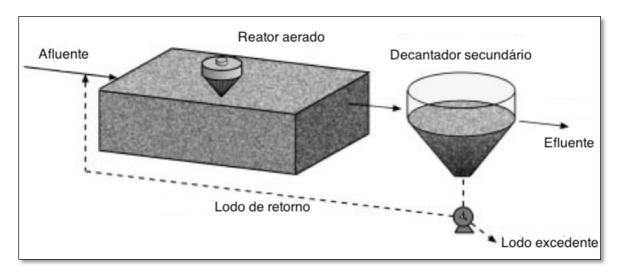


Figura 15 – Esquema das unidades de lodos ativados.

Fonte: HAANDEL et al. (2001).

No sistema de Lodos Ativados, mantém-se elevada a concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração de forma a elevar o tempo de retenção celular ou idade do lodo. A idade do lodo é definida como a relação entre a quantidade de lodo biológico existente no reator e a quantidade de lodo biológico removida do sistema de lodos ativados por dia (HAANDEL *et al.*, 2001). Assim, garante-se a elevada eficiência dos sistemas de lodos ativados, uma vez que a biomassa tem tempo suficiente para metabolizar praticamente toda a matéria orgânica dos esgotos.

Para manter uma concentração desejada de biomassa no tanque de aeração, promovese a recirculação do lodo formado pelos sólidos sedimentados no fundo do decantador secundário, para o reator aeróbio. Essa recirculação é realizada por meio de bombeamento, o que demanda consumo de energia elétrica e manutenção periódica.

A biomassa é separada no decantador secundário devido à sua propriedade de flocular e de sedimentar. A produção de uma matriz gelatinosa permite a aglutinação das bactérias, protozoários e outros microrganismos, responsáveis pela remoção da matéria orgânica, em flocos macroscópicos (HAANDEL *et al.*, 2001).

Para não sobrecarregar os decantadores secundários e evitar o arraste de sólidos no efluente final é necessário que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução. O lodo retirado é chamado de lodo biológico excedente que ainda precisa ser adensado e estabilizado antes de se realizar o desaguamento para a disposição final escolhida.

As variantes do processo de lodos ativados são relacionadas à idade do lodo, ao fluxo e ao afluente à etapa biológica de lodos ativados. Para sistemas com idade do lodo reduzida

(entre 4 e 10 dias), denomina-se processo de Lodos ativados convencional e, usualmente, recebe efluentes de decantadores primários ou efluentes de reatores anaeróbios com fluxo contínuo. Já em sistemas com idade do lodo mais elevadas (entre 18 e 30 dias), denomina-se processo de Aeração prolongada, sendo frequentes para os sistemas de fluxo intermitente que recebem esgotos brutos.

#### 3.2.2.1 Lodos ativados convencional

No sistema convencional, utiliza-se o decantador primário para retirar parte da matéria orgânica em suspensão e sedimentável e, assim, reduzir o volume do tanque de aeração de forma a economizar energia durante a operação. Como a idade do lodo é baixa, a biomassa retirada do sistema no lodo excedente requer ainda estabilização por conter um elevado teor de matéria orgânica armazenada nas suas células. Geralmente, utilizam-se digestores anaeróbios para estabilização (ou seja, no tratamento aeróbio utiliza-se um digestor anaeróbio para o lodo), sendo necessário adensar o lodo previamente para retirada de parte da umidade. Na Figura 16 estão apresentadas as unidades do tratamento envolvendo as fases líquida e sólida na modalidade de lodos ativados convencional.

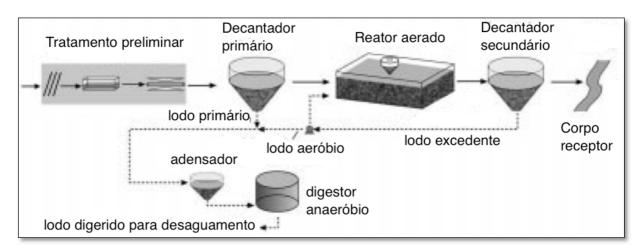


Figura 16 – Fluxograma típico do sistema de lodos ativados convencional.

Fonte: SOBRINHO e JORDÃO (2001)

# 3.2.2.2 Lodos ativados por Aeração prolongada

Na modalidade de aeração prolongada, a biomassa permanece no sistema por um período de tempo maior recebendo a mesma carga orgânica de esgoto bruto que o sistema convencional, ou seja, haverá menor disponibilidade de alimento para as bactérias. Além

disso, o volume do reator aeróbio é maior, caracterizando menor quantidade de matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração.

Essa concepção de lodos ativados mantém um ambiente em que as bactérias, para sobreviver, passam a utilizar nos seus processos metabólicos a própria matéria orgânica biodegradável componente das suas células. Dessa forma, há conversão de matéria orgânica celular em gás carbônico e água por meio da respiração, correspondendo e estabilização da biomassa no próprio tanque de aeração. Vale ressaltar que o consumo adicional de oxigênio para a estabilização do lodo (respiração endógena) é significativo e inclusive pode ser maior que o consumo para metabolizar o material orgânico do afluente (respiração exógena) (SPERLING et al., 2001).

Como o lodo excedente não necessita da etapa de estabilização, não se utiliza decantadores primários, simplesmente para evitar a geração de qualquer forma de lodo que a estabilização seja requerida. Desta forma, a digestão de todo o lodo gerado passa a ser aeróbia, caracterizando-se em uma produção de lodo ainda maior, acarretando em elevados custos de tratamento.

Na Figura 17, pode-se observar algumas simplificações no fluxograma do sistema, como a ausência dos decantadores primários e dos digestores anaeróbios. Em contrapartida, há maiores gastos de energia com aeração (além da aquisição de aeradores de maior capacidade) para atingir a estabilização do lodo aerobiamente e altas eficiências de tratamento.

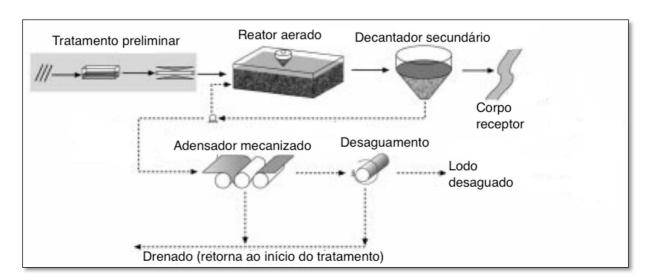


Figura 17 – Fluxograma de um sistema de aeração prolongada.

Fonte: HAANDEL et al. (2001).

## 3.2.2.3 Lodos ativados de fluxo intermitente (batelada)

Uma outra variante do processo de lodos ativados difere no modo de operação quanto ao fluxo nos reatores. Nesse sistema há incorporação das unidades de decantação primária, oxidação biológica e decantação secundária do sistema tradicional de lodos ativados em um único tanque. O processo de lodos ativados com fluxo intermitente pode ser utilizado tanto na modalidade convencional quanto na de aeração prolongada. Nesta última, o tanque único passa a incorporar também a unidade de digestão do lodo.

Dessa forma, o princípio dos lodos ativados com operação intermitente consiste na operação sequencial dos processos, conseguido por meio do estabelecimento de ciclos de operação, com durações definidas, como descritos a seguir (SPERLING *et al.*, 2001):

- Enchimento (entrada de esgoto bruto, decantado ou anaeróbio no reator);
- Reação (aeração e/ou mistura da massa líquida contida no reator);
- Sedimentação (sedimentação e separação dos sólidos em suspensão do esgoto tratado);
- Descarte do efluente tratado (retirada do esgoto tratado do reator);
- Repouso (ajuste de ciclos e remoção do lodo excedente).

A massa biológica permanece no reator durante todos os ciclos, eliminando, dessa forma, a necessidade de decantadores separados, como mostrado na Figura 18, em que um mesmo reator passa por diferentes estágios: decantação e reação.

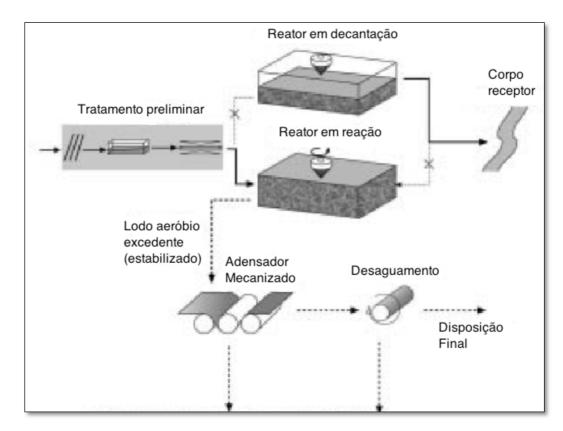


Figura 18 – Fluxograma de um sistema de lodos ativados com operação intermitente.

Fonte: (SPERLING et al., 2001).

O fluxograma do processo é simplificado comparado aos sistemas de lodos ativados de fluxo contínuo devido à eliminação de algumas unidades do tratamento como, por exemplo, os decantadores primário e secundário.

Há algumas variantes nos sistemas de fluxo intermitente, relacionadas, tanto à forma de operação (alimentação contínua e esvaziamento descontínuo), quanto à sequência e duração dos ciclos associados a cada fase do processo. Estas variantes permitem simplificações adicionais no processo ou a remoção biológica de nutrientes (SPERLING, HAANDEL, *et al.*, 2001).

A grande preocupação quanto ao processo de lodos ativados com fluxo intermitente é o controle dos processos, uma vez que variações maiores de vazão podem impactar de forma negativa nos processos de desinfecção e disposição final do esgoto tratado.

#### 3.2.2.4 Lodos ativados de alta taxa

Diferentes opiniões podem ser encontradas na literatura a respeito do efeito da concentração de oxigênio na produção de lodo. Geralmente, as aplicações de oxigênio dissolvido em processos de lodo ativado em escala industrial são limitadas, devido ao

aumento do custo operacional do processo (PONEZI, 2005). No processo de lodos ativados de alta taxa, a quantidade de oxigênio dissolvido é elevada, proporcionando uma redução na área em planta na unidades de tratamento, devido a maior transferência de oxigênio na fase líquida.

Resultados de aplicação de oxigênio puro em processos de lodo ativado mostraram que o crescimento e rendimento celular podem ser reduzidos em até 54% quando comparado com sistema de lodo convencional, até mesmo para lodos com altas taxas de carga (CHUDOBA, CHUDOBA e CAPDEVILLE, 1992).

Geralmente, as aplicações de oxigênio dissolvido em processos de lodo ativado em escala industrial são limitadas, devido ao aumento do custo operacional do processo. A ETE Lavapés de São José dos Campos/SP utiliza o processo de lodos ativados de alta taxa e conta com fábricas de oxigênio puro própria, tornando o processo ainda mais caro. É a primeira ETE da SABESP que utiliza oxigênio puro, constituindo-se uma instalação de referência. No entanto, atualmente se encontra em ampliação e passará a contar com a compra do oxigênio, pois os custos de operação e manutenção com a central de produção de oxigênio se mostraram inviáveis.

ABBASSI, DULLSTEIN e RÄBIGER (2000) propuseram que o aumento da concentração de oxigênio em um líquido resulta em uma melhor difusão de oxigênio no mesmo e, subsequentemente, conduz a uma amplificação do volume aeróbio dentro dos flocos. Como resultado, a biomassa da matriz do floco é hidrolisada e pode ser então oxidada e reduzida à quantidade de lodo produzida.

Quando se comparou a aeração convencional com o processo de oxigênio puro, o oxigênio apresentou vantagem em manter uma concentração mais alta de SSV no tanque de aeração, melhor sedimentação, adensamento, menor área em planta da estação, menor produção de lodo, melhor eficiência de transferência de oxigênio e operação mais estável (RICHARD, HAO e JENKINS, 1985).

# 3.3 Tratamento Anaeróbio

O tratamento anaeróbio consiste na remoção de matéria orgânica num ambiente sem oxigênio. Nesse processo biológico ocorre a digestão anaeróbia, na qual a interação material orgânico-lodo se diferencia dos sistemas aeróbios. Enquanto nos sistemas aeróbios as bactérias utilizam quase todo tipo de material biodegradável, nos sistemas anaeróbios, a massa bacteriana forma um consórcio de microrganismos específicos para cada uma das

quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Os grupos de microrganismos responsáveis por cada etapa se estabelecem de acordo com a concentração de substrato disponível no afluente ou gerado no reator. Os processos citados são melhor explicados posteriormente.

Vale ressaltar que a formação de metano é desejável, já que a matéria orgânica, geralmente medida como DQO ou DBO, é efetivamente removida da fase líquida. Além disto, o metano gerado apresenta possibilidade de aproveitamento energético, em detrimento do tratamento aeróbio que gera apenas a gás carbônico, sem possibilidade de aproveitamento com fins energéticos.

Entende-se que, no Brasil, os sistemas anaeróbios encontram uma grande aplicabilidade. As diversas características favoráveis destes sistemas como o baixo consumo de energia (geralmente associada a uma elevatória), simplicidade operacional e tolerância a elevadas cargas orgânicas, aliadas às condições ambientais no Brasil, onde há a predominância de elevadas temperaturas, têm contribuído para a colocação dos sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos em posição de destaque, particularmente os reatores UASB (CHERNICHARO, 2007).

Vale ressaltar que abaixo de uma temperatura de 15°C (do esgoto), a taxa de hidrólise se torna tão baixa que o tratamento anaeróbio tende a se tornar inviável (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006). Porém, mesmo em regiões mais frias do Brasil como na Região Sul, observa-se um bom funcionamento dos sistemas anaeróbios, a exemplo da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) que trata seus efluentes, preponderantemente, via tratamento anaeróbio, com reatores UASB.

Outra importante vantagem do sistema de tratamento anaeróbio é a baixa produção de lodo, cerca de 5 a 10 vezes inferior a que ocorre nos processos aeróbios, ou seja, economia considerável no manejo e destinação final desse tipo de resíduo dos sistemas de tratamento. Vale ressaltar que além da redução da produção de sólidos, o lodo gerado é estabilizado e adensado, podendo ser simplesmente desaguado (VON SPERLING, 1995), uma vez que o lodo anaeróbio é mais propenso ao desaguamento do que o lodo aeróbio (consumindo menor quantidade de polímero). Além disso, é gerado o biogás com poder calorífico e possibilidade de recuperação e utilização do gás metano como combustível.

A tendência do uso do reator anaeróbio como principal unidade de tratamento biológico de esgoto se deve a remoção considerável do material orgânico com baixo dispêndio de energia e sem adição de substâncias químicas auxiliares. Além disso, as unidades de tratamento via aeróbia podem ser utilizados como unidades de pós-tratamento

para remoção de parcela da fração remanescente de material orgânico (cerca de 30%), a fim de produzir um efluente final com qualidade compatível com as necessidades que se impõem pelos padrões legais de emissão de efluente e a preservação do meio ambiente.

#### 3.3.1 Digestão anaeróbia

O catabolismo fermentativo é um processo que resulta na transferência intramolecular de elétrons de tal maneira que o composto catabolizado se decompõe em pelo menos duas partes, sendo uma mais oxidada e a outra mais reduzida do que o composto original. A digestão anaeróbia, de grande interesse para engenharia sanitária e ambiental, tem como produtos finais, principalmente, o metano e o dióxido de carbono.

A digestão anaeróbia é uma das práticas mais antigas na história do saneamento e, normalmente, é a opção preferida de estabilização, já que possui baixo custo operacional e gera gás de alto poder calorífico. Vale ressaltar que a digestão anaeróbia é a opção preferida de estabilização a um custo operacional baixo para países de clima tropical, como o Brasil, onde a temperatura média do esgoto é acima de 15°C, pois caso contrário é necessário o aquecimento dos reatores anaeróbios como ocorre nos países do hemisfério norte.

Os objetivos desse processo são (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006):

- Redução substancial dos sólidos voláteis;
- Redução significativa do número de organismos patógenos;
- Estabilização das substâncias instáveis, naturais orgânicas, presentes no lodo;
- Redução do volume do lodo por meio dos fenômenos de liquefação, gaseificação e adensamento.

No digestor anaeróbio, o lodo, rico em material biodegradável, é transformado em biogás pelas populações de bactérias e arqueas anaeróbias. Cada um dos grupos de bactérias cresce à medida que há disponibilidade de substrato para sua "especialidade" específica, ou seja, de acordo com a concentração de substrato disponível no afluente ou gerado no reator. Cada grupo de bactérias e arqueas anaeróbias realiza um dos quatro processos sequenciais (FORESTI, FLORÊNCIO, *et al.*, 1999): hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

#### 3.3.1.1 Hidrólise

Solubilização do material biodegradável e particulado, gerando produtos solúveis de menor peso molecular como aminoácidos, açúcares, peptidas e ácidos orgânicos de cadeia longa (estearato, palmitato) pela ação de exo-enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas.

## 3.3.1.2 Acidogênese

Transformação dos compostos solubilizados em precursores de acetato, tais como álcoois, ácidos graxos de cadeia curta (propionato, butirato) e compostos minerais como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S. A fermentação acidogênica é realizada por um grupo diversificado de bactérias dentre as quais a maioria é anaeróbia obrigatoriamente, mas algumas espécies são facultativas e podem metabolizar material orgânico por via oxidativa (utilizando o nitrato como oxidante).

# 3.3.1.3 Acetogênese

Transformação dos produtos de acidogênese em compostos que formam os substratos para produção de metano: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono.

# 3.3.1.4 Metanogênese

O metano é produzido pelas arqueas acetotróficas, a partir da redução de ácido acético, ou pelas bactérias hidrogenotróficas, a partir da redução de dióxido de carbono.

Cada uma dessas etapas deve ser mantida em equilíbrio dinâmico a fim de que a metanogênese ocorra em taxa máxima. A manutenção desse equilíbrio está relacionada à natureza do afluente e à intensidade e disponibilidade de H<sub>2</sub> (hidrogênio), pois este deve ser continuamente removido do meio para assegurar que a produção de ácido acético, não seja interrompida ou diminua drasticamente. Essa condição é essencial para que a fermentação metanogênica prevaleça, sendo H<sub>2</sub> e ácido acético, os mais importantes, responsáveis por cerca de 70% do gás metano gerado em reatores anaeróbios (CASSINI, CHERNICHARO, *et al.*, 2003).

A digestão anaeróbia pode ser considerada como a última fermentação, uma vez que os produtos da digestão anaeróbia são estáveis e não mais suscetíveis de outras fermentações.

A utilização de material orgânico em sistemas anaeróbios é incompleta devido à ineficiência da hidrólise (geralmente o processo limitante da digestão anaeróbia), ainda que o material não hidrolisado seja floculado e não apareça no efluente (FORESTI, FLORÊNCIO,

et al., 1999). Mas também os produtos solúveis do processo de transformação como material hidrolisado, ácidos intermediários e acetatos não tem utilização completa e aparecem no efluente. Dessa forma, há resíduos de material orgânico biodegradável tanto no lodo (material não hidrolisado) como no efluente (material hidrolisado, ácidos e acetato).

#### 3.3.2 Reator UASB

Os primeiros avanços substanciais no campo da tecnologia da clarificação de águas residuárias para o desenvolvimento dos reatores UASB foi dado na Holanda no final da década de 70. Na década de 70, foi desenvolvido pelo Prof. Gatze Lettinga e sua equipe a tecnologia UASB na Universidade Wageningen, também na Holanda.

A partir desse marco, muitos estudos realizados em países em desenvolvimento e, principalmente, em climas tropicais devido a melhor eficiência da digestão anaeróbia em temperaturas mais elevadas.

No Brasil, a utilização de reatores UASB para o tratamento de esgotos domésticos já é uma realidade desde a década de 90, com o início da operação das primeiras ETEs.

O processo anaeróbio por meio de reatores UASB apresenta inúmeras vantagens em relação aos processos aeróbios convencionais, notadamente quando aplicado em locais de clima quente, como é o caso dos municípios brasileiros. Em geral, são sistemas compactos que demandam pouca área, com baixo custo de implantação e de operação, baixa produção de lodo, baixo consumo de energia (sendo, muitas vezes, associado apenas a elevatória de chegada), satisfatória eficiência de remoção de DBO (da ordem de 70%), possibilidade de rápido reinício, elevada concentração de sólidos no lodo excedente com boas características de desaguamento. Como desvantagem, cita-se a possibilidade de emanação de odores (porém controláveis), baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas, elevado intervalo de tempo necessário para a partida do sistema e necessidade de uma etapa de pós-tratamento (CHERNICHARO, HAANDEL, et al., 1999).

Na Figura 19 observa-se, no desenho esquemático de um reator UASB, a existência das fases líquida, sólida e gasosa, que são separadas pelo separador trifásico. Isso garante o retorno do lodo e a elevada capacidade de retenção de grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, sem a necessidade de qualquer tipo de meio suporte. As idades do lodo em reatores UASB superam os 30 dias, propiciando ao lodo excedente, descartado do sistema, alto grau de estabilização. Vale ressaltar que o retorno do lodo no reator UASB é feito por

gravidade, ou seja, sem necessidade de recirculação forçada por meio de equipamentos como no processo de lodos ativados.

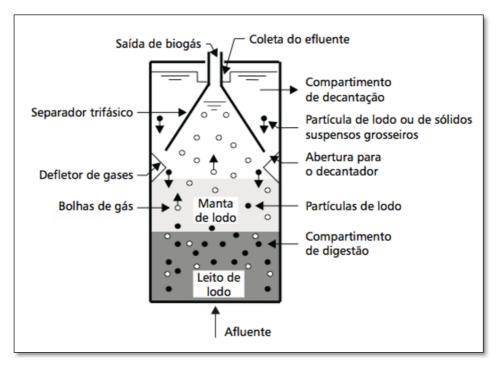


Figura 19 – Desenho esquemático de um reator UASB.

Fonte: CHERNICHARO, HAANDEL, et al. (1999).

No interior do reator UASB, após o período de inoculação do reator, desenvolve-se um leito de lodo bastante concentrado e com excelentes características de sedimentação junto ao fundo do reator, caracterizando o compartimento de digestão. Logo acima, encontra-se uma zona de lodo mais dispersa, denominada manta de lodo, em que os sólidos apresentam velocidades de sedimentação mais baixas e são automisturados pelo movimento ascendente das bolhas do biogás e do fluxo ascendente de esgotos por meio do reator. A retenção e o retorno do lodo carreado pelo movimento ascendente das bolhas de gás e do líquido deve-se ao separador trifásico. O compartimento de decantação compreende o entorno e acima do separador trifásico, onde o lodo mais denso é removido da massa líquida e retornado ao compartimento de digestão, enquanto as partículas mais leves são perdidas do sistema juntamente com o efluente final.

O reator UASB é capaz de aceitar altas taxas de carga orgânica e a grande diferença, quando comparado com outros reatores de mesma geração, é a simplicidade construtiva e os baixos custos operacionais.

Vale ressaltar que a digestão anaeróbia é empregada em alguns processos biológicos para estabilização do lodo, como no processo de lodos ativados convencional. No caso do

processo de lodos ativados como pós-tratamento de reator UASB, a estabilização do lodo ocorre no reator UASB, eliminando a necessidade de uma etapa de digestão anaeróbia no tratamento do lodo.

#### 3.4 Tratamento anaeróbio e aeróbio

Analisando as características apresentadas em relação ao tratamento anaeróbio e aeróbio, fica evidente que, antigamente, o processo de lodos ativados de fato era o mais indicado. Sua origem no hemisfério norte, no início do século XX, justifica sua utilização até hoje, sendo o mais indicado devido ao clima.

No Brasil, as primeiras ETEs foram implementadas pela SABESP que adotou o sistema de lodos ativados, uma vez que, na época, os sistemas anaeróbios não eram robustos e confiáveis. Desde então a SABESP têm empregado lodos ativados por ser um processo eficiente, não gerar problemas de odor, não requerer pós-tratamento, dentre outros. Dessa forma, o processo se difundiu e sacramentou dentro da empresa.

A partir do desenvolvimento dos reatores UASB, no final da década de 70, esses são os mais indicados para temperatura do efluente acima de 15°C. No Brasil, essa tecnologia foi implementada com sucesso a partir da década de 90 com a operação das primeiras ETEs. Apesar das condições favoráveis para aplicação dos reatores UASB no Brasil, não se difundiu a operação significativamente devido em grande parte a influência da SABESP que é a maior companhia de saneamento do país e opera suas estações pelo processo de lodos ativados. Além disso, na década de 90 não havia tanta preocupação com a produção, tratamento e disposição final do lodo e as fiscalizações não eram tão rigorosas como atualmente. A conscientização quanto aos custos de implantação, operação e manutenção relativos a quantidade e características do lodo gerado no tratamento de efluentes tornou-se necessária para incluir o tratamento do lodo já na concepção do tratamento da fase líquida.

O gerenciamento correto do lodo deve ser realizado numa ETE, sendo considerados a produção, o tratamento e a disposição final do lodo gerado no tratamento. Dessa forma, considerando-se as possibilidades de tratamento de esgotos pela via aeróbia, pela via anaeróbia e pela via físico-química, observa-se que a menor produção de lodos é obtida por meio do tratamento anaeróbio, equivalendo a cerca de 20% da produção relativa ao aeróbio. É necessária a etapa aeróbia complementar ao tratamento anaeróbio para a garantia de um efluente com o mesmo padrão de qualidade. A massa total de lodo digerido produzido na

associação anaeróbio-aeróbio corresponde a cerca de 60% da produzida no aeróbio simples (CASSINI, CHERNICHARO, *et al.*, 2003).

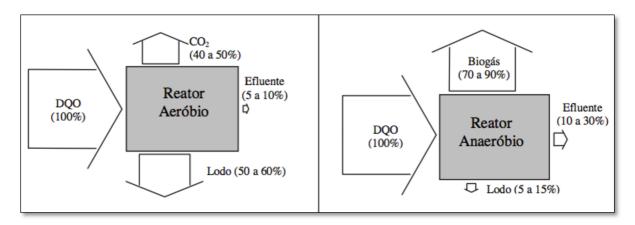


Figura 20 - Conversão biológica nos sistemas aeróbios e anaeróbios.

Fonte: CHERNICHARO, HAANDEL et al. (2001).

O efeito energético do catabolismo fermentativo é muito menos expressivo do que o catabolismo oxidativo, uma vez que grande parte da energia química, originalmente presente no material fermentado, permanece contida no metano.

O efeito energético no metabolismo fermentativo é muito menor do que no processo oxidativo, sendo, portanto, necessário fermentar relativamente muito material orgânico para obter a energia necessária para o anabolismo (síntese de novas células). Dessa maneira, a fração da DQO catabolizada no metabolismo fermentativo será muito maior do que no metabolismo oxidativo. Na prática tem-se que na digestão anaeróbia 90 a 95% do material orgânico metabolizado se transforma em metano (biogás) e somente 5 a 10% é sintetizado como massa bacteriana - lodo já estabilizado. Em contraste, no metabolismo aeróbio a fração catabolizada é de 33% somente (gás formado CO<sub>2</sub>) e 67% é sintetizado em massa bacteriana - lodo que ainda precisa ser estabilizado (VAN HAANDEL e ALEM SOBRINHO, 2006).

Vale ressaltar que grande parte da energia química, originalmente presente no material orgânico fermentado, permanece contido no metano. Por isso, a energia disponível para o processo anabólico é maior para bactérias que usam o catabolismo oxidativo, tendendo a crescer mais que as bactérias anaeróbias por unidade de massa do material orgânico.

## 3.4.1 Lodos ativados para o pós-tratamento de efluente de reator UASB

O processo de lodos ativados utilizado para o pós-tratamento de efluente de reatores anaeróbios é o mesmo do modelo de lodos ativados convencional, uma vez que se utilizam, em geral, os mesmos parâmetros de projeto.

Na Figura 21 pode-se observar as simplificações quanto ao fluxograma do tratamento em que não há necessidade das unidades de decantador primário como nos lodos ativados convencional e nem das unidades de adensamento de lodo e digestão anaeróbia, uma vez que os reatores UASB, além da função de tratamento biológico com a redução da matéria orgânica, realizam também a sedimentação dos sólidos suspensos, gerando um lodo estabilizado, adensado e com melhores condições de desaguamento. O lodo final oriundo do UASB é um lodo de origem mista, sendo composto por lodo anaeróbio e lodo aeróbio excedente gerado nos lodos ativados que ainda não está estabilizado. Vale ressaltar que como a vazão de retorno do lodo aeróbio excedente é bem baixa se comparada a vazão afluente, não há ocorrências de distúrbios operacionais no reator UASB (SPERLING et al., 2001).

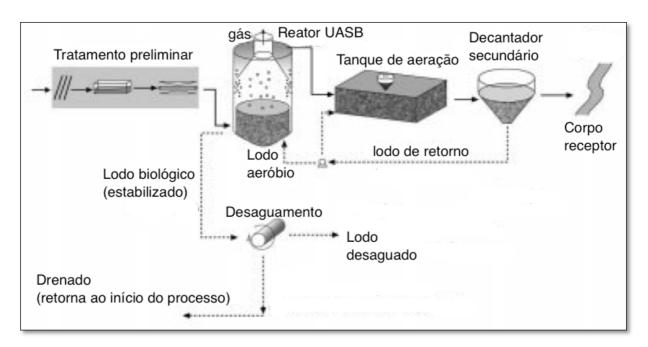


Figura 21 - Fluxograma de um sistema composto por reator UASB seguido por lodos ativados.

Fonte: SPERLING et al. (2001).

Inúmeras são as vantagens do sistema UASB/lodos ativados com relação à concepção tradicional do sistema de lodos ativados convencional.

Há redução da produção de lodo de 50 a 60% do total produzido a ser tratado, além disso apresenta-se mais concentrado e com melhores condições de desaguamento

(SPERLING, HAANDEL, *et al.*, 2001), consumindo menores quantidades de produtos químicos (como coagulantes e polímeros), o que também colabora para a redução no volume de lodo a ser disposto.

O volume total das unidades do tratamento, assim como a quantidade total de unidades são inferiores devido a utilização do reator UASB que substitui o decantador primário, adensador e digestor. Vale ressaltar ainda que essas unidades utilizam equipamentos eletromecânicos (consumindo energia) que demandam gastos com implantação, operação e manutenção. Dessa forma, caracteriza-se um sistema de maior simplicidade operacional.

Quanto a operação, destaca-se o consumo de energia para aeração que é inferior ao sistema tradicional, uma vez que o oxigênio é utilizado apenas para a DBO remanescente e para a nitrificação ou ainda desnitrificação (caso seja implementada na ETE). Além disso, há redução no consumo de produtos químicos para o desaguamento em função das melhores características do lodo.

A remoção biológica de nutrientes como nitrogênio e fósforo apresenta-se com menor capacitação devido a falta de material orgânico (DQO), apresentando-se em concentração menor do que a mínima necessária para a desnitrificação e desfostação. Contudo, este problema pode ser contornado empregando-se *by-pass* do esgoto da caixa de areia para o tanque de aeração, de forma similar ao apresentado no fluxograma da ETE Piracicamirim (Figura 1).

Também há a possibilidade de aproveitamento energético do biogás gerado nos reatores UASB por meio da aplicação da energia obtida no próprio processo de tratamento de efluentes ou ainda no tratamento do lodo para sua disposição final adequada.

# 3.5 Adensamento do Lodo

Normalmente, numa estação convencional de nível secundário, o lodo gerado ainda possui quantidade muito grande de água, como exemplo pode-se citar o lodo primário originado no decantador primário e o lodo secundário gerado nos processos de lodos ativados, filtro biológico, dentre outros de via aeróbia. Dessa forma, a fim de obter a redução da capacidade volumétrica das unidades subsequentes de tratamento (volume dos digestores, capacidade das bombas, dentre outros) e redução do consumo de produtos químicos no desaguamento, necessita-se uma redução de água dos resíduos por meios físicos.

Os tipos de adensamento mais comuns são: por gravidade, flotação com ar dissolvido, e mecanizados, descritos a seguir.

Vale ressaltar que a etapa de adensamento não é necessária no tratamento com reator UASB (sem o emprego de produtos químicos, usuais nos adensadores empregados na prática) com pós tratamento por lodos ativados, uma vez que o adensamento ocorre no interior do reator UASB, juntamente com a estabilização e a digestão do lodo.

## 3.5.1 Adensamento por gravidade

Os lodos primários são de fácil adensamento, sendo mais utilizado o adensamento por gravidade para remoção física de água. Os tanques de sedimentação circulares, equipados com braços raspadores de lodo são os mais utilizados no processo de sedimentação e compactação do lodo.

O lodo adensado é retirado do fundo do tanque e encaminhado para o próximo processo do tratamento do lodo (digestão anaeróbia e desaguamento) e o líquido sobrenadante retorna ao início do processo de tratamento de esgotos.

## 3.5.2 Adensamento por flotação

A separação das partículas sólidas ou líquidas da fase líquida é obtida por meio da introdução de bolhas de ar finamente divididas na fase líquida. Dessa forma, há diminuição da densidade da partícula pela combinação com as bolhas de ar, resultando num empuxo suficiente para levar essas partículas até a superfície, sendo removidas por meio de um raspador.

A formação de microbolhas na unidade de flotação é possível realizando o reciclo pressurizado do efluente do tanque do adensador e, dissolvendo-se ar comprimido. A despressurização do reciclo leva a formação das bolhas de ar para flotação. Além do raspador para remoção das partículas que sofreram flotação, necessita-se também de um mecanismo para remoção dos sólidos mais pesados que são depositados no fundo do tanque.

## 3.5.3 Adensamento por centrífugas

As centrífugas são utilizadas tanto para o adensamento quanto para o desaguamento do lodo. Recomenda-se a utilização do adensamento por centrifugação somente para o lodo biológico de descarte.

## 3.5.4 Adensadores de esteira ("belt-press")

O adensador de esteira para adensamento surgiu junto com a evolução para o desaguamento do lodo, sendo algumas vezes utilizadas unidade de adensamento e desaguamento combinadas em série.

#### 3.5.5 Adensadores de tambor rotativo

O adensador possui em seu interior um tambor rotativo de aço e uma tela de filtração, que filtra o lodo através das perfurações da tela. O lodo filtrado é direcionado para a calha de drenagem e os sólidos adensados são transportados ao longo do tambor através de uma rosca parafuso.

# 3.6 Estabilização do Lodo

Os principais objetivos da estabilização do lodo são (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006):

- reduzir a quantidade de patógenos;
- eliminar os maus odores;
- inibir, reduzir ou eliminar o potencial de putrefação.

Os meios para atingir a estabilização do lodo são:

- redução biológica do conteúdo de sólidos voláteis;
- oxidação química da matéria orgânica;
- adição de produtos químicos no lodo de modo a impedir a sobrevivência dos microrganismos;
- aplicação de calor para desinfetar ou esterilizar o lodo.

As tecnologias mais conhecidas e empregadas por estações de tratamento de média a grande porte estão descritas nos itens a seguir.

## 3.6.1 Estabilização com cal

A estabilização química com adição de cal é conseguida por meio da elevação do valor de pH para valores iguais ou superiores a 12. Dessa forma, cria-se um meio que não permite a sobrevivência de microrganismos, impedindo a putrefação do lodo, evitando a geração de maus odores e reduzindo os riscos à saúde.

Pode-se utilizar a cal virgem (CaO) ou a cal hidratada Ca(OH)<sub>2</sub>, obtendo maiores valores de pH para dosagens maiores de cal.

Os métodos utilizados na estabilização com cal são com adição de cal antes ou depois do desaguamento, denominados de pré-tratamento e pós-tratamento, respectivamente (METCALF & EDDY, INC., 1991).

#### 3.6.1.1 Pré-tratamento

A dosagem de cal requerida por kg de lodo processado é maior do que a quantidade necessária para o método após desaguamento. Tal prática envolve altos custos com produtos químicos e geração de lodo, uma vez que se recomenda um tempo de contato mínimo de 2 horas e pH acima de 12 para redução dos patógenos (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

#### 3.6.1.2 Pós-tratamento

Adição de cal após o processo de desaguamento de lodo é feita por meio de equipamentos especiais de mistura. O pós-tratamento é uma alternativa de estabilização indicada para estações de tratamento de esgoto que não possuem a digestão anaeróbia para atender aos critérios microbiológicos do biossólido.

A reação exotérmica da cal virgem com a água libera energia de forma que a mistura do lodo com a cal atinge temperaturas acima de 50°C, ou seja, alta o suficiente para inativar os ovos de vermes.

Para garantir a eliminação dos patógenos deve-se manter as condição de alta temperatura por dois a três meses. Essa alternativa para fins de desinfecção será abordada posteriormente.

## 3.6.2 Digestão anaeróbia

Os sistemas convencionais de tratamento de esgotos que utilizam processos biológicos como lodos ativados, filtros biológicos, valos de oxidação, biodiscos, dentre outros processos que geram lodo não estabilizado, promovem a estabilização e redução da matéria orgânica do lodo retirado dos decantadores primários e secundários por meio, primordialmente, de reatores anaeróbios com altos tempos de detenção hidráulica. Usualmente, essas unidades são as maiores de toda a estação de tratamento, aumentando sobremaneira os custos de implantação e operação das ETEs (JUNIOR, MORAES, *et al.*, 2003).

Em sistemas de tratamento de esgotos que possuem unidade anaeróbia para o tratamento biológico do efluente permitem também que a estabilização do lodo seja realizada nessa mesma unidade.

Dessa forma, percebe-se a relevância de se considerar o tratamento do lodo já na concepção da fase líquida, com o objetivo de maximizar as funções das unidades de tratamento como ocorre nos reatores UASB.

## 3.6.3 Digestão aeróbia

O processo de digestão aeróbia poderia ser indicado apenas para ETEs de pequeno porte, uma vez que o custo operacional com a energia necessária para a aeração é alto. Para os países tropicais como o Brasil, por conta da viabilidade da digestão anaeróbia nas condições ambiente, o mais indicado é a utilização do reator UASB.

Para os países do hemisfério Norte, há maior utilização da digestão aeróbia para estabilização do lodo devido a problemas com baixas temperaturas para utilização da digestão anaeróbia. Porém, a possibilidade de utilizar o biogás para aquecer os digestores na digestão anaeróbia pode tornar o processo mais viável economicamente se comparado ao gasto com energia na aeração da digestão aeróbia.

Em menores escalas de tratamento, percebe-se algumas vantagens como: simplicidade operacional, baixo custo de investimento, lodo digerido apresenta odor menos ofensivo e é mais estável biologicamente e o sobrenadante possui baixa concentração de matéria orgânica (FORESTI *et al.*, 1999).

# 3.7 Condicionamento do Lodo para Desaguamento

O condicionamento é um processo para melhorar as características de separação das fases sólida-líquida do lodo, seja por meios físicos ou químicos, principalmente para auxiliar no adensamento e no desaguamento. Vale ressaltar que é por meio do condicionamento do lodo que a operação de desaguamento consegue reduzir significativamente a umidade do lodo.

No condicionamento, há neutralização ou desestabilização das forças químicas ou físicas atuantes nas partículas coloidais e no material particulado em suspensão imersos no líquido. Dessa maneira, as partículas pequenas podem se juntar para formação dos agregados maiores, ou seja, os flocos (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

No método de condicionamento químico, utilizam-se produtos químicos orgânicos (grupo de polieletrólitos orgânicos - polímeros) e inorgânicos (sais férricos, ferrosos e de alumínio, óxido ou hidróxido de cálcio ou polímero inorgânico).

## 3.7.1 Fatores físicos que afetam o condicionamento

A distribuição e o tamanho das partículas afetam o condicionamento, uma vez que quanto menor for o tamanho da partícula, maior será a área superficial que implica maior capacidade de hidratação, maior consumo de produtos químicos e um aumento na resistência ao desaguamento (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006). Os esgotos sanitários possuem quantidades significativas de coloides e finos que não são removidos no tratamento primário caso não seja feito nenhum pré-tratamento químico para ocorrer a coagulação e floculação.

Outro fator de importância no condicionamento do lodo é o grau de mistura que é responsável pela dispersão do polímero no lodo. A intensidade na mistura deve ser suficiente para abertura e não fragmentação das cadeias.

## 3.7.2 Fatores químicos que afetam o condicionamento

O pH e alcalinidade são parâmetros que influenciam na natureza da carga superficial e na carga do coagulante, sendo que o pH ainda determina que espécies químicas estão presentes. Vale ressaltar que são parâmetros fáceis de medir e de fundamental importância para o condicionamento do lodo.

As partículas de lodo de maneira geral se repelem umas às outras devido aos efeitos elétricos ou de hidratação. O condicionamento serve para superar esses efeitos, permitindo a aderência entre as partículas.

Como o principal objetivo do condicionamento é promover melhores condições para retirada da água no lodo, torna-se importante o estudo da natureza da associação água-sólidos no lodo, mesmo que não existam técnicas capazes de caracterizar os tipos de água presentes no lodo. A água presente nos lodos pode se dividir, teoricamente, em (GRANDIN, 1992):

<u>Água livre</u>: parcela de água que fica separada quando os flocos de lodo, de maior peso específico, sofrem sedimentação ou adensamento por gravidade depois de um determinado tempo de repouso;

<u>Água interflocos</u>: parcela de água que permanece presa entre os flocos após o término do período de sedimentação ou adensamento por gravidade, sendo facilmente retirada por aplicação de pressão ou vácuo através dos flocos;

<u>Água adsorvida nos flocos</u>: parcela de água adsorvida sobre a superfície do floco por tensão superficial e rigidez estrutural dos flocos, sendo retirada sem ruptura dos flocos com a aplicação de uma pressão adequada ou vácuo;

<u>Água interpartículas</u>: parcela de água presa dentro das partículas, sendo retirada por meio da ruptura dos flocos de lodo com aplicação de pressão elevada ou vácuo às partículas fragmentadas;

<u>Água adsorvida na partícula</u>: parcela de água adsorvida sobre a superfície da partícula por tensão superfícial ou sucção capilar, sendo difícil de retirar mecanicamente;

<u>Água de partícula</u>: parcela de água íntima e quimicamente ligada às partículas inorgânicas, quimicamente ligada às células, ou fisicamente ligadas às partículas orgânicas, sendo retirado apenas por combustão.

# 3.7.3 Fatores biológicos que afetam o condicionamento

A fonte do lodo e a natureza dos sólidos originados de um processo afetam o condicionamento. A fonte de lodo é um bom indicador de consumo de produtos químicos para o condicionamento.

O lodo primário consome quantidades menores de produtos químicos do que os lodos secundários, enquanto que os lodos secundários originados de filtros biológicos anaeróbios consomem quantidades menores do que os lodos originados de lodos ativados (HAANDEL *et al.* 2006).

O estudo de NOVAK e PARK (2004) na Virginia Tech demonstra a relação existente entre a eficiência do processo de digestão – caracterizado pela destruição de sólidos voláteis – e a influência na dosagem química necessária para o condicionamento. Dessa relação, tem-se que à medida que a destruição de sólidos voláteis aumenta, os requisitos químicos para o condicionamento é reduzido. Ou seja, o lodo mal digerido possui piores condições de desaguamento e requer mais condicionamento químico do que aqueles com maior destruição de sólidos voláteis. Portanto, o lodo anaeróbio possui melhor caraterísticas de desaguamento do que os lodos aeróbios.

# 3.8 Desaguamento de lodo

O desaguamento do lodo é uma operação unitária física (mecânica) que reduz o volume do lodo por meio da redução do seu teor de água.

De acordo com (METCALF & EDDY, INC., 1991) os motivos que justificam esta redução de volume são:

- redução significativa dos custos de transporte para disposição final do lodo;
- facilidade de manipulação;
- permite incineração mais eficiente;
- redução na quantidade de adição de produtos na compostagem;
- pode garantir redução na geração de maus odores ou torná-los menos ofensivos;
- diminuição na produção de chorume quando se utiliza aterro sanitário como disposição final.

Os métodos de desaguamento mais comuns são os métodos de secagem natural e os métodos mecânicos que são apresentados nos itens a seguir. Além disso, por fim, é apresentado o método de secagem térmica.

O princípio do desaguamento natural é baseado na evaporação e percolação, enquanto os processos mecanizados baseiam-se em mecanismos de centrifugação, filtração e compactação. Já a secagem é uma operação realizada por meio da aplicação de calor por convecção, condução ou radiação (VANZETTO, 2012).

## 3.8.1 Métodos de secagem natural

# 3.8.1.1 Leitos de secagem

Os leitos de secagem funcionam como filtros granulares de bateladas de lodo, podendo ser descarregadas sem nenhuma adição de coagulantes ou polieletrólitos. A água é removida por percolação que cessa quando o lodo atinge umidade de 80%, aproximadamente, e para se atingir umidade menor é necessária a evaporação da água.

A percolação depende da filtrabilidade do lodo, da carga de sólidos aplicada e da natureza do lodo (quanto mais estabilizado, maiores e mais densos os flocos, favorecendo a separação de fases), enquanto a taxa de evaporação depende das condições meteorológicas – notadamente temperatura, vento, umidade do ar e índice pluviométrico – da taxa de aplicação de sólidos utilizada e da umidade final desejada para o lodo.

Esse método de secagem natural é simples, com custo de instalação e de operação geralmente muito inferiores aos métodos mecânicos e com possibilidade de se obter umidade final do lodo mais baixas. Entretanto, a demanda de área (dependente da velocidade dos processos de percolação e evaporação) é superior à destinada aos reatores biológicos e há dependência de intensiva mão de obra para operação os leitos.

Como os processos envolvidos são complexos e o número de variáveis que interferem no processo é grande, dificulta-se o trabalho de otimização dos leitos, restando os métodos empíricos para se projetar racionalmente. A partir de dados experimentais, comprovaram-se algumas relações que possibilitam o cálculo do tempo total do ciclo de secagem de lodo num leito que pode ser decomposto em períodos sequenciais: tempo de preparação do leito e descarga do lodo, tempo de percolação, tempo de evaporação para se atingir a umidade desejada e tempo de remoção dos sólidos secos. Esses períodos podem ser calculados e dependem do número de trabalhadores, disponibilidade de equipamento mecanizado, condições operacionais durante a secagem, condições meteorológicas e carga aplicada (PEDROZA, MOREIRA, *et al.*, 2006).

É possível otimizar e reduzir a área necessária dos leitos de secagem por meio da aplicação de energia de fonte externa para quebrar a estratificação térmica e acelerar a evaporação de água. Pode-se aproveitar, por exemplo, o calor de combustão do biogás gerado em sistemas de tratamento com digestão anaeróbia ou mesmo a energia solar.

Utilizando uma fonte externa de energia é possível reduzir a área da unidade, aumentado a profundidade e passando-se ar quente pelo lodo em sentido ascensional. Além disso, é possível que se aplique o desaguamento misto, ou seja, o lodo sofre o desaguamento

mecânico e depois a torta resultante é lançada no leito de secagem que pode ser impermeável (sem meio filtrante), já que não haverá mais percolação após a remoção de água.

Os leitos de secagem não diferem substancialmente dos tradicionais filtros de areia em uma área confinada com paredes laterais e fundo de alvenaria. O leito de secagem é constituído de um sistema de drenagem com tubos perfurados em um leito de brita 4 apoiado em um fundo de concreto ou alvenaria, ligeiramente inclinado para facilitar a coleta de água. Acima dos tubos, camadas de brita de granulometria decrescente são dispostas para servir de apoio para a camada de areia média, que é a camada filtrante propriamente dita. Colocam-se, sobre a areia, tijolos sem serem rejuntados e distanciados de aproximadamente 2 cm, ou ainda membrana geotêxtil, de forma que facilite a retirada do lodo depois de seco. O lodo é descarregado sobre os tijolos, definindo-se assim a taxa de aplicação superficial de sólidos (kgSST/m²) – variável operacional mais importante no dimensionamento e otimização dos leitos de secagem.

# • Leitos de secagem ao ar livre

Nos leitos de secagem sem cobertura, a percolação cessa quando o lodo percolado se torna uma suspensão grossa, que ocorre para uma umidade na faixa de 80%. A partir desse ponto, a única maneira de se remover a água é por meio da evaporação, que procede a uma taxa bem mais lenta do que a percolação, sendo o limitante quanto a redução de tempo e área demandada.

No caso dos leitos de secagem ao ar livre, deve-se considerar a influência da chuva que afeta diretamente na umidade do lodo que é um dos parâmetros de operação mais importante. Segundo ANDREOLI *et al.* (2006), em caso de chuvas é importante que o lodo tenha uma umidade menor que 65% e, para atingir uma umidade inferior de forma mais rápida, deve-se utilizar uma taxa de aplicação de sólidos relativamente baixa. Dessa forma, em princípio, é vantajoso utilizar baixas taxas de aplicação de sólidos quando as chuvas são frequentes, como é o caso e grande parte do Brasil.

## • Leitos de secagem coberto

São utilizadas coberturas em leitos de secagem de modo a evitar a entrada de água proveniente de precipitações pluviais. Recomendam-se coberturas transparentes (vidro comum ou filme plástico) como forma de aproveitar a energia solar por meio do aumento de temperatura do lodo, visando acelerar a remoção de água e a destruição de organismos

patógenos. Na prática, nem sempre o teto é transparente, ou seja, nessas unidades o teto serve apenas para evitar que a água da chuva entre.

Segundo ANDREOLI *et al.* (2006), o processo de secagem é influenciado pelas chuvas, energia solar e ventos, possibilitando diferentes formas de operação:

- Com teto e parede laterais fixos e fechados, ou seja, sem renovação do ar contido entre o lodo e a cobertura;
- Com teto fixo, com possibilidade de renovação ilimitada de ar mediante paredes laterais vazadas ou ainda sem paredes laterais;
- Com paredes laterais que podem estar abertas ou fechadas e com renovação de ar limitada.

Segundo a pesquisa realizada por ANDREOLI *et al.* (2006), para estabelecer a influência dos três diferentes tipos de operação citados sobre a taxa de secagem de lodo, utilizou-se os modelos representados na Figura 22.

De acordo com os autores da pesquisa, se as paredes laterais não são removíveis, a única maneira de remoção de água depois da percolação é pela evaporação, e subsequente condensação de vapor de água no teto e nas paredes laterais sendo que as gotas de agua se juntam e escorrem pelo material de cobertura, para serem aparadas na base do leito antes que possam voltar ao lodo. Nas unidades sem paredes laterais há uma troca térmica com a renovação de ar e, desta forma, a temperatura não pode subir de maneira significativa, de modo que essas unidades não servem para desinfecção com energia solar.

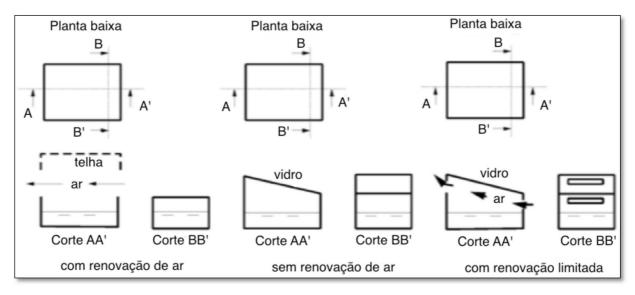


Figura 22 - Representação esquemática de modelos de leitos com diferentes coberturas.

Fonte: MIKI, SOBRINHO e HAANDEL (2006).

É possível ainda, a utilização de fontes externas de energia como ar comprimido e combustão do biogás para secagem do lodo. Na utilização de fontes de energia externa, que não a irradiação direta do sol, pode-se construir uma torre de secagem em vez de um leito de secagem, uma vez que não há necessidade de se limitar a espessura da camada de lodo. Essa espessura é determinada considerando-se o custo de construção e os custos de operação (energia necessária para introdução de fonte externa e o ar comprimido). Há necessidade de se garantir uma profundidade mínima de forma a assegurar que a energia externa seja absorvida eficientemente na unidade. Grandes profundidades são vantajosas no caso de secar lodo já percolado ou desaguado mecanicamente, que apresente umidade inicial na faixa de 80% (PEDROZA, MOREIRA, *et al.*, 2006).

Vale ressaltar que quanto maior a incorporação de tecnologias como cobertura dos leitos ou ainda a utilização de fontes externas para otimização dos leitos de secagem, maiores são os custos de operação. Dessa forma, os benefícios trazidos por tais tecnologias devem ser analisados juntamente com os custos adicionais relacionados à operação do sistema.

# 3.8.1.2 Leitos de secagem pavimentados

Os leitos de secagem pavimentados se diferenciam dos leitos convencionais devido ao material utilizado para formar a base do tanque, permitindo o uso de concreto ou concreto betuminoso (AMUDA *et al.*, 2008).

De acordo com WANG *et al.* (2006), a experiência de campo indica que a utilização de leitos pavimentados apresenta resultados de desaguamento em curto prazo, sendo que sua operação é mais econômica quando comparado com os leitos de secagem convencionais. Isso se deve ao uso de equipamentos mecânicos para a limpeza do lodo que removem o lodo com maior teor de umidade.

De acordo com TUROVSKIY e MATHAI (2006), os leitos pavimentados devem ter revestimento de no mínimo 1,5% de declividade dirigida para o centro da área de drenagem, onde não há pavimentação.

## 3.8.1.3 Leitos de secagem rápida ou leitos de filtragem rápida

Nesse tipo de leito, ocorre a drenagem rápida de água livre, com a ajuda de polímeros, que é removida por gravidade e também por processos naturais de evaporação. O polímero é injetado diretamente no dispositivo de floculação, o que elimina a necessidade de tanques de tratamento, misturadores e bombas de transferência do polímero (VANZETTO, 2012).

Quando o dreno inferior é aberto, um efeito de vácuo ou sifão é criado e, juntamente com a fissura ou abertura, ocorre a circulação de ar, aumentando ainda mais o desaguamento. O método pode ser comparado favoravelmente com sistemas de desaguamento mecânicos, tais como filtros prensas ou centrífugas. Como vantagens, pode-se citar o tempo reduzido de operação e baixo custo comparado aos processos mecânicos (USEPA, 2006).

# 3.8.1.4 Leitos de secagem com meio artificial

Os meios artificiais usados para esses leitos de secagem são a tela de fios (*wedgewire*) que consiste em fios de arame perfilados utilizados para construir telas robustas e extremamente precisas, fabricadas em aço inoxidável ou painéis de poliuretano de alta densidade (TUROVSKIY e MATHAI, 2006).

De acordo com DENG *et al.* (2008), esse tipo de leito de secagem emprega um meio poroso subjacente para drenar o conteúdo de umidade do lodo. As telas, formadas pelo entrelace de fios com 0,8 m de abertura entre as barras e planas na parte superior, são organizadas em painéis para formar um fundo falso e eficaz para o controle da drenagem.

## 3.8.1.5 Lagoas de secagem do lodo

As lagoas de secagem do lodo têm como função principal no processo promover o desaguamento do lodo essencialmente pela evaporação. Seu desempenho, como o dos leitos de secagem, é afetado pelo clima. Assim, a sua concepção requer a consideração de diversos fatores, tais como precipitação, evaporação, o volume e as características do lodo (TUROVSKIY e MATHAI, 2006).

Apesar das lagoas serem projetadas para operar com lodo já digerido, elas também têm a utilidade de promover a estabilização, podendo haver emanação de odores desagradáveis (JORDÃO e PESSÔA, 2011).

São necessários longos períodos para cada ciclo de secagem do lodo, que é composto por três períodos operacionais: enchimento, secagem e remoção do lodo. O tempo para o desaguamento pode variar bastante, principalmente quando se consideram as condições meteorológicas, permeabilidade do subsolo, características do lodo, profundidade da lagoa e área superficial (SPERLING e GONÇALVES, 2001).

Além disso, há demanda de grandes áreas para se operar o sistema de forma mais ágil, utilizando várias lagoas que atuem concomitantemente no processo como recomendado por JORDÃO e PESSÔA (2011). Trata-se da coexistência de 4 lagoas de lodo (uma lagoa em

enchimento, duas lagoas em secagem efetiva e uma lagoa em limpeza), tendo 120 dias para cada conjunto até alcançar o período de limpeza.

Devem ser instaladas em locais afastados da urbanização e deve ser promovida a impermeabilização do terreno de forma eficaz para evitar uma possível contaminação do lençol freático.

#### 3.8.2 Métodos mecânicos

São usados processos e operações como filtração ou centrifugação. Segundo MIKI, SOBRINHO e HAANDEL (2006), o desaguamento por métodos mecânicos será parcial obtendo-se um produto final com teor de sólidos na faixa de 15 a 35%, dependendo das características do lodo e das condições operacionais.

O produto final é uma torta de constituição semissólida e com presença de patógenos.

O custo operacional é elevado devido aos gastos com energia elétrica, adição de polieletrólitos, além dos custos de transporte para disposição final.

# 3.8.2.1 Filtros prensa de esteira ("Belt-filter press")

O filtro prensa de esteira apresenta baixo investimento inicial de capital, baixo consumo de energia, eficiente captura de sólidos, desagua lodos com concentrações variadas de sólidos e operam de forma contínua. Entretanto, o filtro prensa de esteira é dependente da adição de polímeros para um desaguamento eficiente (TUROVSKIY e MATHAI, 2006).

O equipamento produz uma torta manipulável (dentre os mecânicos, são os que conduzem maior teor de sólidos entre 30 e 35%), gerando pouca vibração e ruído (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

O processo é muito sensível às variações da qualidade do lodo de entrada e do condicionamento químico, podendo ocorrer situações de geração de odores, uma vez que ao equipamento não é fechado. Além disso, necessita de uma quantidade significativa de água para lavagem das telas.

O processo de desaguamento se inicia pelo espalhamento uniforme do lodo, já condicionado com polímeros, na tela do filtro prensa de esteira. O lodo passa por um processo que envolve 3 etapas:

- Zona de drenagem por gravidade: drenagem através dos poros da tela da maior parte da água livre originada no processo de floculação;
- Zona de baixa pressão: retirada de mais água, conferindo ao lodo uma certa estrutura;

 Zona de alta pressão: compactação do lodo entre as correias superior e inferior por meio de roletes.

Na Tabela 1 são apresentadas as características operacionais do filtro prensa de esteira.

Tabela 1 — Dados típicos para diversos tipos de lodo desaguados em filtros prensa de esteira.

Tipo de lodo	Teor de sólidos do lodo de entrada (%)	Taxa de aplicação de sólidos (kg/m.h)	Dosagem de polímero (kg/ton)	Teor de sólidos da torta (%)
Bruto	, ,	, ,	, ,	
Р	3 - 10	360 - 680	1 - 5	28 - 44
S	0,5 - 4	45 - 230	1 - 10	20 - 35
P + S	3 - 6	180 - 590	1 - 10	20 - 35
FB	3 - 6		2 - 8	20 - 40
Digerido anaerobiamente		360 - 590		
Р	3 - 10	40 - 35	1 - 5	25 - 36
S	3 - 4	180 - 680	2 - 10	12 - 22
P + S	3 - 9		2 - 8	18 - 44
Digerido aerobiamente		90 - 230		
P + S	1-3	135 - 230	2 - 8	12 - 20
P + FB	4 - 8		2 - 8	12 - 30
Oxigênio Puro		90 - 189		
S	1 - 3		4 - 10	15 - 23

P: Primário

FB: Filtro Biológico

S: Secundário

Fonte: (QASIM, 1999).

# 3.8.2.2 Filtros prensa de placas

O funcionamento dos filtros prensa de placas baseia-se na pressão gerada na bomba de alimentação de lodo que provoca a força necessária para o trabalho no filtro prensa. Algumas vantagens e desvantagens em relação a outros equipamentos de desaguamento são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Comparação do filtro prensa de placas com outros equipamentos de desaguamento.

Vantagens	Desvantagens	
	Operação em batelada	
Maior concentração	Alto investimento inicial	
de sólidos em	Alto custo de mão de obra	
comparação com os	Necessidade de uma estrutura	
outros equipamentos	especial de suporte	
	Grande área de implantação	
Filtrado com baixas concentrações de sólidos suspensos	Necessidade de pessoal de manutenção qualificado Dificuldade de desprendimento da torta de lodo desaguada das placas do equipamento	

Fonte: METCALF & EDDY, INC. (1991).

O processo é realizado em bateladas e o condicionamento do lodo é feito, geralmente, com cloreto férrico e cal, de controle relativamente simples na dosagem. Apesar desses condicionadores incorporarem uma grande quantidade de sólidos secos na torta de lodo final, consegue-se bons resultados em termos de redução de umidade. Alternativamente, pode-se utilizar polímeros como condicionadores, porém o fato do processo ocorrer em bateladas e as condições operacionais variarem gradativamente torna o processo complexo, uma vez que a dosagem de polímero é contínua e sensível a pequenas variações.

Quanto a operação, inicia-se o ciclo de filtração com o preenchimento de cada câmara com lodo, resultando primeiramente numa ausência de pressão, uma vez que a lona de filtração não opõe nenhuma resistência à passagem de água. Os sólidos do lodo que se aglomeram nas lonas de filtração formam uma camada filtrante, resultando num filtrado cada vez mais limpo e com menor quantidade de sólidos em suspensão. Entretanto, essa camada filtrante leva ao aumento de pressão de filtração e uma diminuição do rendimento da filtração. Além disso, a remoção dos resíduos da torta formada entre as placas é difícil, sendo necessário pessoal de manutenção qualificado e constante substituição das telas de filtração.

Os dados de desempenho do desaguamento de filtros de placas quanto ao teor de sólidos na torta final e as dosagens de produtos químicos estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados típicos para diversos tipos de lodo desaguados em filtros prensa de placas.

Tipo de lodo	Teor de sólidos do lodo de entrada (%)	Dosagem de Químicos (%, base seca)	Produtos	Rendimento do filtro (kg/m2h)	Teor de sólidos da torta (%)
		FeCl3	CaO		
Bruto (P+S)	4	5	15	5	40
Digerido (P+S)	4	6	16	5	40

P: Primário S: Secundário

Fonte: (QASIM, 1999)

# 3.8.2.3 Centrífugas

O desaguamento por centrífugas é dado por um processo que acelera a separação das frações líquida e sólida (torta de lodo desaguado), envolve tanto a clarificação como a compactação.

O tipo de centrífuga mais aplicável para o desaguamento de lodos de ETEs é a centrífuga do tipo decanter, ou ainda, centrífuga tipo tambor e rosca transportadora de sólidos. O tambor cilíndrico ao girar desenvolve uma força de separação entre a fase líquida e a sólida, enquanto a rosca transportadora gira com velocidade diferente do tambor, possibilitando o transporte de sólidos até a zona de descarga.

Segundo METCALF & EDDY (1991), pode-se destacar algumas vantagens e desvantagens da centrífuga em comparação com outros equipamentos de desaguamento como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação da centrífuga com outros equipamentos de desaguamento.

Vantagens	Desvantagens	
Aparência com melhor		
acabamento, mínima geração de	Desgaste da rosca representa um	
odores, capacidade acionamento	problema potencial de manutenção	
rápido de partida e desligamento		
	Necessita de remoção de areia e	
Fácil de instalar	possivelmente um triturador de	
	lodo no sistema de alimentação	
Produz tortas relativamente secas	Necessidade de pessoal de	
Floudz tortas relativamente secas	manutenção qualificado	
Baixa relação de capital de	Centrado possui alta concentração	
investimento/capacidade	de sólidos suspensos	

Fonte: METCALF & EDDY, INC. (1991).

TUROVSKIY e MATHAI (2006) ainda citam como vantagem demanda de área relativamente baixa, atenção contínua do operador não requerida e operação em fluxo contínuo.

O desempenho da centrífuga de acordo com o tipo de lodo e a dosagem de polímeros, assim como o teor de sólidos da torta resultando do desaguamento são dados na Tabela 5.

Tabela 5 – Características de desempenho da centrífuga.

Tipo de lodo	Teor de sólidos da torta (% ST)	Captura de sólidos (% SS)	Dosagem de polímero (kg/ton ST)
Lodo primário	28 - 34	95	2 - 3
Lodo primário digerido	35 - 40	95	2 - 3
Lodo secundário	14 - 18	95	6 - 10
Lodo secundário digerido	14 - 18	95	6 - 10
Lodo bruto (primário +	20.22	0.5	
secundário)	28 - 32	95	4 - 6
Lodo digerido anaeróbio (primário + secundário)	26 - 30	95	5 - 9
Lodo de aeração prolongada ou digerido			
aeróbio	18 - 22	95	6 - 10

Fonte: WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1996).

## 3.8.2.4 Prensa Parafuso ("Screw Press")

O equipamento consiste de uma rosca transportadora que gira ao redor de uma tela de aço perfurada. Dessa forma, ocorre a deposição contínua de sólidos na tela perfurada com aumento progressivo de pressão devido a geometria da rosca e da tela. Como a rosca funciona de maneira contínua a baixas rotações, evitam-se problemas com ruídos, barulho e vibrações durante a operação (SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

Na operação da prensa parafuso, o lodo líquido é bombeado para uma câmara de floculação, onde é introduzido um polímero por meio de um anel na linha de alimentação. Após a adição do polímero, o lodo é misturado e transportado pelo parafuso que gira dentro de um tanque de reação. À medida que a rosca gira, o lodo é transportado ao longo da prensa gerando, por meio da forma de atrito na interface lodo/tela, uma torta com cerca de 20 a 25% de sólido. Por fim, a torta será descartada em uma esteira ou diretamente em um recipiente na extremidade da prensa (USEPA, 2006).

Há necessidade de realizar o condicionamento do lodo numa câmara de floculação com agitação mecânica devido a baixa velocidade de entrada que não causa uma perda de carga suficiente para mistura de produto químico.

## 3.8.2.5 Incineração

A incineração é a opção tecnológica mais cara e, normalmente, a relação custo/benefício se torna menos prejudicada para grandes cidades. Trata-se da destruição da matéria orgânica por meio da combustão, na presença de oxigênio.

De acordo com WILLIAMS (2005), a incineração do lodo de esgoto gera entre 20% e 50% em peso de cinzas, que permanece como resíduo após a incineração, necessitando, este também, de uma alternativa para disposição final.

Segundo LUDUVICE e FERNANDES (2001), a incineração é um processo que resulta na destruição de toda a matéria orgânica presente no lodo, incluindo os patógenos com formação de cinza residual que geralmente se limita a 4% do volume do lodo desaguado alimentado ao incinerador. Vale ressaltar que a cinza residual do processo de incineração deve ser adequadamente acondicionada para se evitar danos futuros no meio ambiente.

Durante o processo de decomposição, apesar dos organismos patógenos e compostos orgânicos tóxicos serem eliminados, os metais pesados permanecem nas cinzas. Os riscos de disposição da cinza estão vinculados a possível lixiviação dos metais, o que torna desaconselhável a sua utilização no solo, sendo mais recomendado a sua disposição em

aterros sanitários ou industriais (SANTOS, 2003). Ou seja, há de se considerar ainda os custos envolvidos com a disposição final das cinzas que, em geral, ocorre em aterros sanitários. Entretanto, há possibilidades de utilização das cinzas como, por exemplo, em materiais de construção, e quando o lodo é utilizado como matéria-prima na produção de cimento, as cinzas se tornam parte integrante do produto final (HALL, 2000).

#### 3.8.2.6 Pirólise

A pirólise do lodo pode ser definida como a degradação térmica do material orgânico na ausência parcial ou total de um agente oxidante, ou até mesmo, em um ambiente com uma concentração de oxigênio capaz de evitar a gaseificação intensiva do material orgânico. Para que ocorra a degradação térmica, geralmente alcança-se temperaturas superiores 400°C (PEDROZA, VIEIRA, *et al.*, 2010).

O processo de pirólise é dividido em convencional (pirólise lenta) e a pirólise rápida. Enquanto o processo de pirólise convencional é dirigido, especificamente para a produção de carvão, a pirólise rápida pode fornecer quantidades consideráveis de bio-óleo, sendo considerado um processo avançado, no qual, demanda alto controle dos parâmetros de processo (VIEIRA, 2000).

Os produtos obtidos durante a pirólise (gases, líquidos e sólidos) são gerados em proporções diferentes, dependendo dos parâmetros considerados como, por exemplo (VIERIA, 2004):

- temperatura final do processo;
- pressão de operação do reator;
- tempo de residência das fases sólidas, líquidas e gasosas dentro do reator;
- tempo de aquecimento e a taxa de aquecimento das partículas de biomassa;
- ambiente gasoso e as propriedades iniciais da biomassa.

O principal objetivo no processo de pirólise é a obtenção de produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que aquelas da biomassa inicial. Esses produtos podem ser usados para abastecer energeticamente o próprio processo ou serem comercializados como produtos químicos ou combustíveis (VIERIA, 2004).

Os principais produtos obtidos durante a pirólise de biomassa são o bio-óleo (líquido), o carvão (sólido) e a fração gasosa. Devido a seus poderes energéticos, esses materiais obtidos possuem utilizações potenciais diversas (VIEIRA, 2000). O bio-óleo é constituído de

hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, juntamente com mais de 200 compostos identificados e tem um alto valor energético.

#### 3.8.2.7 Bag, tubo ou membrana de geotêxtil (Geotube)

O sistema consiste numa membrana geotêxtil de alta resistência, que suporta altas pressões na fase de enchimento e permite a drenagem da água contida no lodo condicionado. Os tubos são compostos de tecido de polipropileno de alta resistência e suportam altas pressões na fase de enchimento. A superfície do tubo permite a drenagem da água contida no lodo condicionado e são fabricados segundo as necessidades do projeto (VANZETTO, 2012).

Primeiramente, o lodo condicionado é bombeado para o interior da *bag* para liberação de água que passa através da membrana geotêxtil e devem retornar ao tratamento. As partículas sólidas ficam retidas no interior da *bag* e o processo se repete até o preenchimento total. Por fim, deixa-se o tubo preenchido em repouso por meses para aumentar o teor de sólidos do lodo no interior do tubo.

Essas três fases que ocorrem na operação de desaguamento utilizando *bags* de geotêxtil estão representadas na Figura 23.



Figura 23 – Funcionamento da bag de geotêxtil.

Fonte: http://onondagalake.info/index.php?/knowledgebase\_entry/what\_are\_geotubes.html.

A utilização da *bag* de geotêxtil mostra-se apropriado para lodos de lagoas de estabilização pelo fato de não possuir partes mecânicas e poder receber lodos com areia e pedra.

## 3.8.3 Secagem Térmica

A secagem térmica do lodo é realizada por meio de aplicação de calor para remoção de água nele contida, por processo de evaporação. São obtidos, geralmente, produtos finais com teor de sólidos entre 90 e 95% nas unidades de secagem térmica. A secagem térmica tem como vantagens o custo reduzido no transporte do lodo seco, elevada redução de organismos patógenos e possibilita a estocagem e venda do produto como condicionador de solo ou fertilizante (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

O processo de secagem térmica é de operação relativamente cara, pois envolve tanto a utilização de combustível para geração de calor como necessita de mão de obra especializada para manuseio e controle. Nesse processo o lodo é aquecido a temperaturas tais que produzam a evaporação da água, sem que a matéria orgânica nele contida seja destruída. A presença de matéria orgânica no lodo seco é um fator importante para decisão de se destinar o material à agricultura.

Existem muitos sistemas de secagem, sendo necessário avaliar os tipos de secadores levando-se em conta o tipo de lodo a ser secado, a eficiência global, as características requeridas do projeto final e o custo de instalação completa.

Os diferentes tipos de lodo como o lodo primário, secundário, digerido ou não digerido, possuem diferentes características de secagem e dão origem a produtos com diferentes propriedades, como teores de matéria orgânica, teor de nitrogênio, densidade e poder calorífico. A umidade do lodo afeta a sua manipulação e a capacidade do secador, uma vez que para teores de sólidos na faixa fase plástica do lodo pode ocorrer aderência do lodo às paredes internas do secador (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006). O lodo, quando parcialmente seco, tende a se aglomerar e aderir às paredes dos secadores, alterando as condições hidrodinâmicas como resultado da formação do aglomerado e crescimento subsequente no interior dos secadores (PEETERS, 2011).

Para se obter um teor de sólidos acima da fase plástica é necessário, frequentemente, a recirculação de lodo seco que é feita por meio dos misturadores. O misturador deve ter capacidade para misturar completamente o material reciclado e mais aquele que está alimentando o sistema.

Os principais tipos de secadores térmicos – secadores rotativos por dispersão de ar, leito fluidizado, transportador de esteira ou túnel e mistos – são descritos nos próximos itens.

#### 3.8.3.1 Secadores rotativos

Os secadores rotativos são constituídos de um cilindro horizontal para passagem do material de uma extremidade para outra, por gravidade ou por ação de pás direcionadoras. Existem também configurações em que o cilindro se encontra inclinado para reduções de espaço ocupado pelos secadores. Os tipos mais conhecidos de secadores rotativos são aqueles em que o próprio tambor é rotativo e aqueles em que o tambor é estacionário e possuem um equipamento rotativo interno.

A transferência térmica é feita pelo fluido de transferência de calor, podendo ser do tipo direto ou indireto. Nos secadores rotativos diretos, há contato direto do fluido de transferência de calor com o lodo, enquanto nos secadores rotativos indiretos, a parede metálica é aquecida pelo fluido de transferência de calor.

## 3.8.3.2 Secadores por dispersão de ar

O processo de secagem por dispersão de ar é composto de um complexo sistema de trocadores de calor e de numerosos processos de manipulação do material que está sendo seco. Gera-se uma grande quantidade de poeiras, criando potencial de fogo e explosões, além disso o material fino resultante no lodo seco dificulta o manejo, a estocagem e a comercialização (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

# 3.8.3.3 Secadores de leito fluidizado

Consiste em uma câmara vertical estacionária, com um fundo perfurado, através do qual uma corrente de gases aquecidos – usualmente ar – é introduzida por meio de sopradores. O esquema do secador por leito fluidizado pode ser observado na Figura 24.

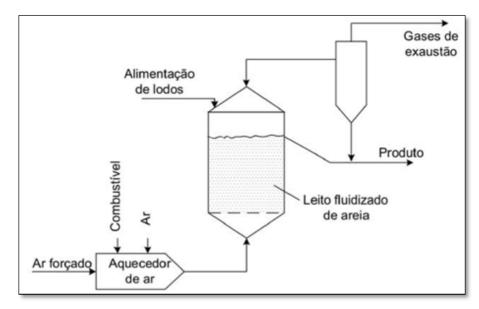


Figura 24 - Esquema de um secador por leito fluidizado.

Fonte: WATER ENVIRONMENT FEDERATION (1992).

No interior do secador, uma corrente de ar quente ascendente passa através do lodo granulado disposto no fundo perfurado, revolvendo e suspendendo as partículas do lodo e dando origem a um leito fluidizado. Apesar de eficientes em algumas aplicações, atualmente, raramente são utilizados na secagem de lodos de estações de tratamento de esgoto domésticos (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

## 3.8.3.4 Secadores tipo túnel

Trata-se de um processo contínuo de secagem com circulação permanente de ar. O lodo úmido é alimentado e conduzido vagarosamente através de um túnel aquecido como pode ser observado na Figura 25.

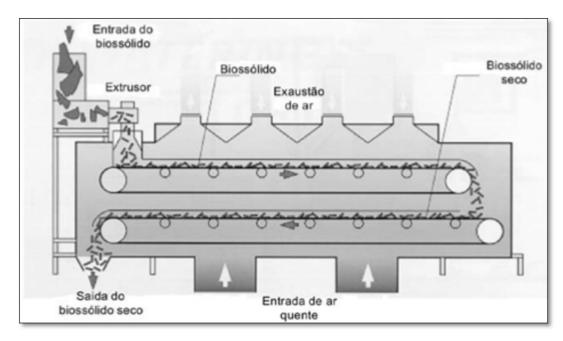


Figura 25 - Secador tipo túnel.

Fonte: Catálogo Netzsch (1999).

O calor é diretamente aplicado através de uma série de ventiladores que insufla o ar quente à temperatura de aproximadamente 150°C sobre o lodo que está sendo processado. O tempo de residência do lodo é cerca de uma hora e a temperatura final é de cerca de 80°C (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

### 3.8.3.5 Secadores mistos (direto e indireto)

Nos secadores mistos, que são câmaras ou vasos com paredes estruturadas, pode-se variar entre a secagem direta e indireta minimizando o consumo de energia e maximizando a taxa de secagem (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

# 3.9 Desinfecção do lodo

A desinfecção tem por objetivo a inativação seletiva dos organismos que ameaçam a saúde humana, de acordo com os padrões de qualidade estabelecidos para as diferentes situações. Sua inserção no fluxograma de uma estação de tratamento pode se dar de forma específica, pela construção de uma etapa exclusiva para a desinfecção, ou por intermédio da adaptação de processos existentes para realizar, dentre outras tarefas, também a desinfecção (GONÇALVES, JORDÃO e SOBRINHO, 2003).

Os lodos estabilizados e desaguados precisam passar por um processo para reduzir a concentração de organismos patógenos. Os mecanismos de desinfecção do lodo podem ser por via térmica, biológica ou por radiação (SANTOS, 2003).

Vale ressaltar que, apesar da estabilização do lodo propiciar a diminuição de microrganismos patógenos, a concentração ainda é muito elevada para que sua reciclagem agrícola seja feita sem riscos. Para isso é necessário levar adiante a estabilização do lodo no processo convencionado de desinfecção do lodo, que pode ser entendido como uma extensão da estabilização, com o objetivo de se obter um lodo sanitariamente seguro (FORESTI, FLORÊNCIO, *et al.*, 1999).

Os processos de desinfecção – caleação, compostagem, vermicompostagem, oxidação úmida e adição de ácidos orgânicos – são descritos nos itens subsequentes.

## 3.9.1 Caleação

Trata-se de um processo de baixo custo, fácil aplicabilidade e eficiência no processo (MÃDER NETTO, 2003), porém há liberação de odores do lodo e aumento de volume pela adição de cal. Além do alto tempo de estocagem, requerendo grandes áreas.

A desinfecção do lodo por meio da adição de cal virgem ou cal hidratada é realizada por efeito da elevação do pH do lodo a níveis iguais ou superiores a 12. Além disso, o lodo deve ter um tempo de contato adequado para que a redução de patógenos atinja seu nível ótimo. Esse período pode variar entre 30 a 120 dias, dependendo das características do lodo e da dosagem de cal. Durante esse período é necessário revolver o lodo e checar os valores de pH, pois geralmente é necessário adição de cal para manter valores acima de 12.

O contato da cal com a água livre do lodo provoca uma reação exotérmica, a qual ocasiona aumentos de temperatura ao redor de 60°C durante o choque alcalino, seguida por uma rápida elevação do pH, e posterior atuação da amônia formada a partir do nitrogênio (LOURENÇO, 1997).

## 3.9.2 Compostagem

Segundo (FORNARI, 2002), a compostagem é a bio-oxidação aeróbia exotérmica de um material orgânico heterogêneo, no estado sólido, caracterizado pela produção de gás carbônico, água, liberação de substâncias minerais e formação de matéria orgânica estável.

Na compostagem do lodo de esgoto, a desinfecção é dada por via térmica advinda do crescente processo de biodegradação aeróbia que depende, principalmente (FERNANDES e SILVA, 1999):

- Aeração: como o processo é aeróbio, o ar é fundamental para suprir a demanda de oxigênio dos microrganismos, sendo uma forma de prevenir situações de anaerobiose, putrefação e atração de vetores e patógenos. Na compostagem com lodo de esgoto, usa-se a mistura com outro material mais grosseiro, uma vez que o lodo apresenta uma granulometria fina e devido a seu aspecto pastoso dificultar a difusão de ar;
- <u>Temperatura</u>: a temperatura das leiras de compostagem sofrem grande influência das condições climáticas e determina a intensidade de atividade microbiológica;
- <u>Umidade</u>: a umidade depende da eficácia da aeração, da estrutura e porosidade dos resíduos. Elevados teores de umidade (maior que 65%) fazem com que a água ocupe os espaços vazios do meio, impedindo a livre passagem do oxigênio, o que poderá provocar aparecimento de zonas de anaerobiose. Se o teor de umidade de uma mistura é inferior a 40%, a atividade biológica é inibida, bem como a velocidade de biodegradação;
- Estrutura e densidade: como o lodo apresenta granulometria muito fina, deve-se adicionar algum material estruturante ao meio para garantir espaços intersticiais entre as partículas, evitando problemas com aeração. Pode-se utilizar, por exemplo, palha, resíduos de podas de árvores triturados, bagaço de cana, serragem de madeira, dentre outros;
- Relação C/N: a relação C/N é o fator que caracteriza o equilíbrio dos materiais de compostagem, uma vez que há consumo de nitrogênio na degradação e re-síntese da matéria orgânica, enquanto o carbono é a principal fonte de energia;
- <u>Fator pH</u>: níveis de pH distantes da neutralidade podem reduzir ou até inibir a atividade microbiana.

Durante o processo de biodegradação da matéria orgânica, a temperatura se eleva naturalmente na faixa de 60°C a 65°C nos primeiros dias do processo, sendo essa elevação de temperatura responsável pela redução dos patógenos.

No processo de compostagem, o lodo deve ser misturado a um resíduo estruturante rico em carbono como palha, resíduos de poda de árvores triturados, serragem de madeira, bagaço de cana, entre outros.

Segundo (FORESTI, FLORÊNCIO, *et al.*, 1999), as tecnologias de compostagem podem ser divididas em três grandes grupos básicos, as quais devem respeitar os parâmetros de monitoramento a fim de produzir um condicionador de solo de alta qualidade agronômica, sanitariamente seguro, fácil de manipular e com odor agradável de húmus.

- Os parâmetros físico-químicos mais adequados para a compostagem: aeração suficiente, relação carbono/nitrogênio (C/N) entre 20 e 30, umidade entre 55% e 65%, pH próximo da neutralidade e estrutura porosa que permita a circulação do ar;
- Tempo necessário para realização das reações bioquímicas: fase termófila e fase de maturação;
- Correto monitoramento do processo para que a atividade biológica possa ser realizada a contento.

No início do processo há um forte crescimento dos microrganismos mesófilos. Com a elevação gradativa da temperatura, resultante do processo de biodegradação, a população de mesófilos diminui e os microrganismos termófilos proliferam com mais intensidade. A população termófila é extremamente ativa, provocando intensa e rápida degradação da matéria orgânica e maior elevação da temperatura, o que elimina patógenos. Na Figura 26 pode-se observar a evolução da temperatura de uma leira em compostagem.

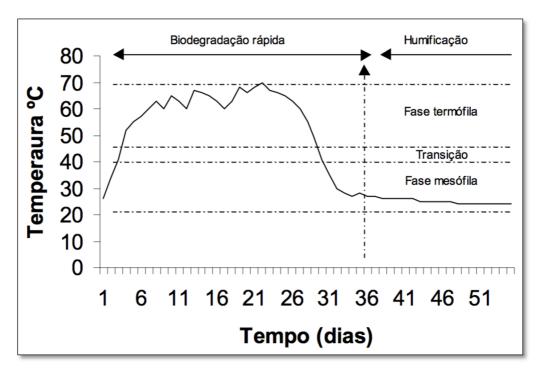


Figura 26 – Exemplo genérico da evolução da temperatura de uma leira em compostagem.

Fonte: FERNANDES e SILVA (1999).

#### 3.9.2.1 Sistema Windrow ou Leiras Reviradas

De acordo com (FORESTI, FLORÊNCIO, *et al.*, 1999), o sistema *windrow* é apontado como o mais simples de ser implantado e operado, apresentando o menor custo de instalação.

O sistema é composto por longas leiras de seção triangular onde os resíduos são dispostos. Essas leiras normalmente são colocadas em áreas abertas e a aeração se faz pela convecção e difusão natural do ar na massa do composto e pelo revolvimento periódico realizado com pá carregadeira ou outro equipamento específico.

As pilhas são revolvidas duas vezes por semana até o trigésimo dia de idade e a partir de então, uma vez por semana até que a massa em compostagem entre na fase de maturação. Posteriormente à fase termófila, o material permanece imóvel durante aproximadamente 1 mês e, em seguida, é peneirado para retirada de contaminantes e material mais grosseiro (BÜTTENBENDER, 2004).

A fase termófila tem duração variável, de acordo com as características dos substratos, durando em média de 40 a 60 dias, necessitando ainda cerca de 60 dias para a fase de maturação.

#### 3.9.2.2 Sistema de Leiras Estáticas

O sistema de leiras estáticas requer investimentos iniciais maiores que o processo *windrow*, mas apresenta menor custo de operação, pois não há o revolvimento periódico da massa de resíduos, a mistura de resíduos é colocada em leiras de grandes dimensões e mantidos imóveis durante todo o ciclo de compostagem.

A aeração é feita por insuflação ou aspiração de ar na massa do composto, normalmente através de tubos perfurados sobre os quais são colocados os resíduos. Em alguns casos, também é feito uso alternado, insuflação e aspiração. Uma variante deste método utiliza a aeração em excesso para manter a temperatura entre 55°C e 60°C, faixa na qual o processo de biodegradação é mais intenso. A aeração também deve ser criteriosamente monitorada, de acordo com a demanda de oxigênio. Neste sistema, a fase termófila tem duração de 15 a 25 dias, de acordo com as características dos resíduos, necessitando igualmente da fase de maturação (FORESTI, FLORÊNCIO, *et al.*, 1999).

# 3.9.2.3 Reatores Biológicos (In-Vessel)

O sistema de reatores biológicos permite o controle dos principais parâmetros do processo de compostagem (aeração, revolvimento, temperatura), podendo-se obter a

otimização do processo de biodegradação e apresentando fase termófila mais rápida do que os sistemas anteriores.

A mistura de resíduos é colocada em sistemas fechados (reatores), onde podem ser revolvidos de várias formas: rotação do reator, sistemas internos de eixos, passagem de um compartimento a outro, dentre outros.

Geralmente, quanto mais sofisticado for o sistema, maior será seu custo de implantação e mais criteriosa deverá ser sua operação. A compostagem em reator requer maiores investimentos iniciais, porém a duração da fase termófila é reduzida (7 a 15 dias) e a segurança sanitária do composto obtido é maior que nos sistemas anteriores (FORESTI, FLORÊNCIO, *et al.*, 1999).

# 3.9.3 Co-compostagem

A co-compostagem é o processo de compostagem convencional, utilizando-se como material estruturante um produto de compostagem, ou seja, trata-se de um processo biológico para redução de patógenos e estabilização de compostos orgânicos. Dentre as tecnologias de co-compostagem, destaca-se a utilização de lodo de esgotos com resíduos sólidos orgânicos.

Com o objetivo de melhorar o processo de compostagem, aumenta-se a taxa de degradação e a qualidade do composto por meio da adição de material biodegradável de forma a alcançar uma relação C/N de aproximadamente 30. A co-compostagem é uma estratégia eficiente em aproveitar diversos tipos de resíduos que normalmente são destinados a aterros sanitários (DINIS, 2010).

Dessa forma, percebe-se o potencial aproveitamento do lodo gerado em ETE com a utilização de técnicas consorciadas com resíduos sólidos urbanos, resultando numa integração do gerenciamento de resíduos de forma a melhorar as características para a disposição final dos resíduos.

## 3.9.4 Vermicompostagem

A vermicompostagem é o processo de transformação de matéria orgânica recente em matéria orgânica estabilizada, por meio da ação das minhocas junto com a microflora que vive em seu trato digestivo. No intestino das minhocas, os restos orgânicos que não foram digeridos, bem como os que não foram assimilados, são expelidos juntamente com as

partículas de terra, na forma de um composto orgânico rico em nutrientes, sendo facilmente assimilável pelas plantas (CORREA e FONSECA, 2007).

O processo de vermicompostagem é de fácil realização e de baixo custo operacional, além de gerar um produto de alta qualidade chamado vermicomposto, que pode ser incorporado em solos agrícolas e utilizado como condicionador dos mesmos.

De acordo com a Instrução Normativa SDA n° 25 de 2009 (BRASIL, 2009), que trata de fertilizantes orgânicos, vermicomposto é o produto resultante da digestão, pelas minhocas, da matéria orgânica proveniente de estercos, restos vegetais e outros resíduos orgânicos, atendendo aos limites máximos estabelecidos para contaminantes estabelecido pela Instrução Normativa SDA n° 37 de 2012 (BRASIL, 2012) e garantindo o valor apropriado para os seguintes parâmetros de qualidade (valores expressos em base seca):

• umidade máxima: 50% (determinada a 65°C);

• N total mínimo: 0,5 mg/kg;

• Carbono orgânico mínimo: 10 mg/kg;

• pH mínimo: 6,0;

Relação C/N máxima: 14.

Os parâmetros e valores limites dos contaminantes serão expostos, posteriormente, na discussão da utilização do lodo em culturas agrícolas.

A vermicompostagem é um processo constituído por dois estágios: no primeiro, a matéria orgânica é compostada segundo os métodos tradicionais de compostagem, proporcionando a redução de microrganismos patógenos. Após aproximadamente 30 dias, o composto é transferido para leitos rasos para não se aquecer demasiadamente e não se compactar, pois os materiais de granulometria fina têm essa tendência. Faz-se, então, a inoculação das minhocas e, 60 a 90 dias após, obtém-se o vermicomposto pronto, com aumento da disponibilidade de macro e micronutrientes e a formação de um húmus mais estável (VERAS e POVINELLI, 2004).

## 3.9.5 Oxidação úmida

Segundo TAKEMOTO (2006), o princípio fundamental do método consiste em aumentar o contato entre o oxigênio e a matéria orgânica a ser degradada, o que é facilitado pelo aumento de temperatura e pressão no resíduo.

De acordo com LUDUVICE e FERNANDES (2001), o processo beneficia-se da capacidade que a matéria orgânica presente tem de ser oxidada a temperaturas entre  $100^{0}$ C e  $374^{0}$ C, o ponto crítico da água. Dessa forma, sob condições de alta temperatura e pressão há destruição de 95 a 97% dos sólidos voláteis.

Em um sistema de oxidação úmida, o lodo é bombeado ao reator de oxidação úmida, passando por um trocador de calor para elevação da temperatura. Posteriormente ao tratamento, o efluente do reator segue para a separação das fases, de onde o lodo é encaminhado para o desaguamento, o líquido retorna ao tratamento passando pelo trocador de calor, contribuindo com parte da energia, e o efluente gasoso é liberado para a atmosfera após tratamento em precipitador eletrostático e filtros para remoção de partículas sólidas e substâncias odoríferas (SANTOS, 2003).

## 3.9.6 Adição de ácidos orgânicos

Um método alternativo para a desinfecção de lodo de esgoto utiliza ácidos orgânicos, pois agem significativamente, destruindo bactérias e ovos de helmintos que são altamente resistentes aos tratamentos convencionais (Barros et al., 2006).

Comparado aos desinfetantes químicos, os ácidos orgânicos possuem como vantagem a falta de efeitos adversos no ambiente receptor e a rápida evolução para uma biodegradação inócua e fácil (Sánchez-Ruiz et al., 1995). Essas características são de grande importância para a sustentabilidade do sistema agrícola produtivo, visto que minimizam o impacto ambiental da aplicação do biossólido na reciclagem agrícola.

Os ácidos orgânicos: acético (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub>) e peracético (CH<sub>3</sub>COOOH) utilizados na desinfecção de lodo de esgoto apresentaram efeito muito bom contra bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos, sob diversas condições (BARROS *et al.*, 2011).

# 3.10 Disposição Final do lodo

O destino final dos resíduos produzidos nos sistemas de tratamento de esgoto é uma preocupação mundial, uma vez que essa atividade acarreta impactos ambientais significativos e têm levado os órgãos ambientais a exigirem das operadoras a implantação de outras alternativas de disposição desse resíduo.

O lodo gerado nas estações de tratamento de esgoto geralmente é um subproduto de disposição final onerosa e problemática. Atualmente, devido ao crescimento desordenado da

população, os sistemas de coleta e tratamento de esgotos aumentaram significativamente, proporcionando maior produção de lodo. Não obstante, surge à necessidade da reutilização correta e adequada deste resíduo, como é o caso da utilização na compostagem para a formação de substrato para a produção vegetal (MIKI, SOBRINHO e HAANDEL, 2006).

Mais de 90% do lodo produzido no mundo tem sua disposição final por meio de três processos: incineração, disposição em aterros e uso agrícola. O uso agrícola, chamado de uso benéfico do lodo, é a forma predominante de disposição nos Estados Unidos, onde estima-se que em 2010 atingiu-se 61,5% do lodo empregado na agricultura (VANZETTO, 2012).

# 3.10.1 Uso do lodo em Plantações Florestais

Uma alternativa viável para o uso do lodo de esgoto tratado (biossólido) é a aplicação em plantações florestais, que se destinam somente à produção de madeira e que não afeta a cadeia alimentar humana.

De acordo com LUDUVICE (2000), o potencial agronômico do lodo é inquestionável, mas sua utilização em áreas agrícolas produtivas deve ser feita de maneira cuidadosa, de modo a não provocar danos à saúde pública, ao meio ambiente ou prejuízos financeiros ao agricultor.

A alternativa de utilização do lodo em plantações florestais está relacionada com o problema de destinação final do lodo, além de tratar de aspectos silviculturais buscando a avaliação do efeito do lodo na produção de madeira. Para aplicação em culturas agrícolas não é desejável concentrações elevadas de metais pesados, no entanto, para árvores é aceitável níveis maiores desde que não prejudique a atividade fisiológica.

Dessa forma, as plantações florestais podem ser usadas como filtros biológicos, através da captura, acúmulo e armazenamento de elementos poluentes dentro da biomassa, podendo contribuir para o processo de fitoremediação (POGGIANI, SILVA e GUEDES, 2006).

De acordo com POGGIANI, GUEDES e BENEDETTI (2000), o lodo de esgoto, em relação à adubação natural, apresenta a vantagem de liberar lentamente os nutrientes para o sistema radicular das árvores. Para culturas de ciclo longo, plantadas sobre solos arenosos e de baixa fertilidade, a lenta liberação dos nutrientes poderia otimizar sua absorção e minimizar perdas por lixiviação.

# 3.10.2 Uso de lodo na Recuperação de Áreas Degradadas

Área degradada é aquela que sofreu, em algum grau, perturbações em sua integridade, sejam elas de natureza física, química ou biológica. A recuperação de uma área degradada deve ter como objetivos recuperar sua integridade física, química e biológica (estrutura) e, ao mesmo tempo, recuperar sua capacidade produtiva (função), seja na produção de bens de consumo e matérias-primas, ou na prestação de serviços ambientais (SKORUPA, SOUZA, *et al.*, 2006).

Recuperação pode ser definida como restituição de um ecossistema degradado a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original.

A composição química do lodo é de suma importância na recomendação da quantidade a ser aplicada no solo, baseando-se no valor de fertilização (N, P, K), considerando-se as concentrações de metais pesados presentes no lodo, além da presença de patógenos.

Posteriormente a incorporação de lodo de esgoto, os atributos do solo que podem sofrer alteração pela adição deste resíduo são (MORAES, MARCIANO, *et al.*, 1999):

- Densidade e porosidade;
- Capacidade de retenção de água;
- Estabilidade dos agregados;
- Infiltração da água e condutividade hidráulica;
- Capacidade térmica;
- Redução linear da massa específica do solo em função do aumento do conteúdo de matéria orgânica.

Deve-se atentar ao inconveniente do lodo ser uma fonte altamente geradora de nitrato e, portanto, uma fonte de contaminação de águas superficiais e subsuperficiais.

Com respeito à melhoria das condições físicas do solo, o lodo de esgoto, aumenta a retenção de água em solos arenosos e melhora a permeabilidade e infiltração nos solos argilosos e, por determinado tempo, mantém uma boa estrutura e estabilidade dos agregados na superfície (BETTIOL e CAMARGO, 2006).

Num trabaho realizado por BEZERRA *et al.* (2006) foi verificada a viabilidade para a disposição final do lodo de esgoto pelo processo de revegetação de áreas degradadas. Nesse trabalho, a aplicação do lodo, produzido pela Estação de Tratamento de Esgoto do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro (Etar-Apoio), à revegetação de uma área degradada do aeroporto causou o aumento significativo dos teores de carbono orgânico, nitrogênio, fósforo,

magnésio, potássio e cálcio, bem como da capacidade de troca catiônica. Os teores dos micronutrientes Fe, Zn e Cu também aumentaram significativamente com a aplicação de lodo.

Não foi observado efeito significativo da aplicação de lodo no desenvolvimento das espécies vegetais utilizadas no trabalho realizado na Etar-Apoio: Sabiá (*Mimosa caesalpiniifolia*) e Maricá (*M. bimucronata*), porém vale ressaltar a importância da presença de espécies vegetais no processo, principalmente as leguminosas arbóreas nodulíferas que promovem aumento da absorção e transformação de compostos orgânicos, acumulação de metais pesados e reestabelecimento da comunidade rizosférica (TRANNIN, MOREIRA e SIQUEIARA, 2001). Em regiões tropicais, a grande quantidade de raízes perenes profundas permite a absorção de nutrientes o ano todo (LUDUVICE, 2000).

## 3.10.2.1 Condicionador do solo

De acordo com a Instrução Normativa SDA n° 35 de 2006 (BRASIL, 2006), condicionador de solo é o produto que promove a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou atividade biológica do solo, podendo recuperar solos degradados ou desequilibrados nutricionalmente.

O lodo de esgoto que atenda as especificações e garantias para uso como condicionadores de solo, é classificado como Classe "D", ou seja, um produto que em sua produção utiliza qualquer quantidade de matéria-prima oriunda do tratamento de despejos sanitários, resultando em produto de utilização segura na agricultura.

Os condicionadores de solo devem atender as especificações e garantias:

- Capacidade de Retenção de Água (CRA) mínima de 60% (sessenta por cento);
- Capacidade de Troca Catiônica (CTC) mínima de 200 (duzentos) mmol<sub>c</sub>/kg (milimols de carga por kilograma).

Além disso, deve-se verificar os valores máximos expostos na Tabela 6 que constam os contaminantes que devem ser analisados para produção, comercialização ou importação do lodo como condicionador de solo de acordo com a Instrução Normativa SDA n° 37 de 2012 (BRASIL, 2012) que complementa a Instrução Normativa SDA n° 27 de 2006 (BRASIL, 2006).

Tabela 6 - Contaminantes em Condicionadores de solo.

Contaminante	Valor máximo admitido
Sementes ou qualquer material de propagação de ervas daninhas	0,5 planta por litro, avaliado em teste de germinação
As espécies fitopatogênicas dos Fungos do gênero Fusarium, Phytophtora, Pythium, Rhizoctonia e Sclerotinia	Ausência
Arsênio (mg/kg)	20,00
Cádmio (mg/kg)	00,8
Chumbo (mg/kg)	300,00
Cromo (mg/kg)	500,00
Mercúrio (mg/kg)	2,50
Níquel (mg/kg)	175,00
Selênio (mg/kg)	80,00
Coliformes termotolerantes - número mais provável por grama de matéria seca (NMP/gde MS)	1.000,00
Ovos viáveis de helmintos -	
número por quatro gramas de sólidos totais (nº em 4g ST)	1,00
Salmonella sp	Ausência em 10g de matéria seca

Fonte: IN N<sup>0</sup>. 27 de 2006 (Anexo IV).

A CTC de um solo, de uma argila ou do húmus representa a quantidade total de cátions retidos à superfície desses materiais em condição permutável (Ca<sup>2+</sup> + Mg<sup>2+</sup> + K<sup>+</sup> + H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup>). Um solo é considerado bom para a nutrição das plantas se a maior parte da CTC do solo está ocupada por cátions essenciais como Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> e K<sup>+</sup>, enquanto solos pobres possuem grande parte da CTC ocupada por cátions potencialmente tóxicos como H<sup>+</sup> e Al<sup>3+</sup> (RONQUIM, 2010).

A capacidade de troca iônica dos solos representa, portanto, a graduação da capacidade de liberação de vários nutrientes, favorecendo a manutenção da fertilidade por um prolongado período e reduzindo ou evitando a ocorrência de efeitos tóxicos da aplicação de fertilizantes. Um valor baixo de CTC indica que o solo tem pequena capacidade para reter cátions em forma trocável; nesse caso, não se devem fazer as adubações e as calagens em grandes quantidades de uma só vez, mas sim de forma parcelada para que se evitem maiores perdas por lixiviação.

## 3.10.3 Uso de Lodo de esgoto na Produção de Substrato Vegetal

Substrato é uma combinação de componentes utilizada para a produção de mudas, fornecendo as condições químicas e físicas favoráveis à germinação das sementes e ao seu desenvolvimento, dando sustentação às plântulas (ANDREOLI, PEGORINI e NEVES, 2006).

A matéria orgânica presente no lodo fornece nutrientes para a planta e para os organismos do solo e atua como condicionador do solo, melhorando suas características físicas, químicas e biológicas. Tais características do lodo afetam positivamente o desenvolvimento das plantas e dependem do esgoto que lhe deu origem e do processo de tratamento de esgoto e do lodo.

Para utilização do lodo como um dos materiais componentes da formulação do substrato, deve-se realizar a desinfecção e analisar quanto a presença de metais pesados.

O substrato obtido do lodo de esgoto, após secagem e desinfecção através do processo de compostagem, torna-se benéfico ao desenvolvimento de mudas, com redução de custos com a compra de fertilizantes químicos e materiais para a formulação de substratos de forma econômica e eficiente.

De acordo com a Instrução Normativa SDA n° 14 de 2004 (BRASIL, 2004), que trata de substratos para plantas, define substrato para plantas como sendo um produto usado para o crescimento de plantas e determina que o lodo de esgoto pode ser utilizado como substrato, desde que apresente as especificações e garantias:

- condutividade elétrica (CE) em mS/cm variação de +/- 0,3;
- massa específica em kg/m³ (em base seca) variação de +/- 15%;
- potencial hidrogeniônico (pH) em água variação +/- 0,5;
- umidade máxima (%), em peso/peso variação de +10%; e
- capacidade de retenção de água (CRA) %, em peso/peso variação de -10%.

Facultativamente, poderá ser oferecida garantia para capacidade de troca catiônica (CTC), expressa em mmol<sub>c</sub>/dm<sup>3</sup> ou mmol<sub>c</sub>/kg, sendo admitido tolerância de 10% para menos.

## 3.10.4 Uso do lodo na Agricultura

O uso do lodo de esgoto na agricultura foi pouco explorado no Brasil. Apenas nos últimos anos que se desenvolveram pesquisas e experiências com aplicação de lodos com características distintas, e misturados em diferentes solos – ou ainda algum outro material

auxiliar. Aplicando-se diferentes traços do Solo:Lodo:(material auxiliar), pode-se observar resultados que complementam o conhecimento do uso agrícola do lodo. Vale ressaltar que para cada tipo de cultura agrícola, diferencia-se na quantidade necessária de água, macronutrientes e micro-nutrientes, ou seja, apresentam distintas dinâmicas na ciclagem dos nutrientes que ainda pode variar dependendo do tipo de solo.

A legislação federal relativa à aplicação de lodos de ETEs em solos agrícolas é composta hierarquicamente como mostrado na Figura 27. O Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) é responsável pela gestão das políticas públicas de estímulo à agropecuária, pelo fomento do agronegócio e pela regulação e normatização de serviços vinculados ao setor (BRASIL, 2013).

A Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006) define critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento sanitário e seus produtos derivados, visando benefícios à agricultura e evitando riscos à saúde pública e ao ambiente. No estado de São Paulo, a norma técnica P4.230 (CETESB, 1999) estabelece os procedimentos, critérios e requisitos para a elaboração de projetos, implantação e operação de sistemas de aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico de despejos líquidos sanitários ou industriais, em áreas agrícolas, visando atendimento de exigências ambientais

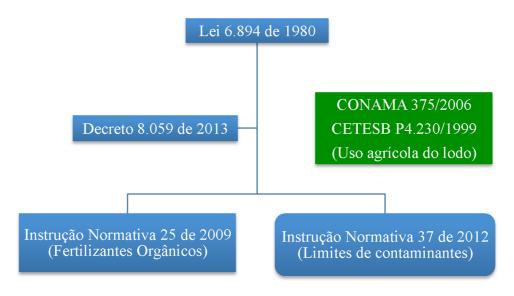


Figura 27 – Hierarquia na legislação.

A lei nº. 6.894 de 1980 (BRASIL, 1980) dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes e biofertilizantes destinados à agricultura. Compete ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) exercer a fiscalização.

O decreto nº. 4.954 de 2004 (BRASIL, 2004) aprova o regulamento da lei nº. 6.894 de 1980 (BRASIL, 1980). O anexo a esse decreto foi alterado pelo decreto nº. 8.059 de 2013 (BRASIL, 2013).

Para utilização do lodo gerado em ETEs, deve-se analisar os parâmetros de qualidade a fim de comparar com as especificações e garantias mínimas para fertilizantes orgânicos, além de verificar os limites quanto aos contaminantes como metais pesados e presença de agentes patógenos.

Dessa forma, analisa-se as questões previstas no MAPA quanto ao uso do lodo na agricultura como fertilizante orgânico. Além do MAPA, analisam-se também as considerações dispostas tanto pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) na Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006), quanto pela CETESB pela Norma Técnica P4.230 (CETESB, 1999).

Na caracterização do lodo para análise do uso agrícola, avaliam-se os seguintes parâmetros:

- Potencial Agronômico (Carbono orgânico, pH, umidade, Sólidos voláteis e totais, P, N, K, Na, Ca, Mg, S);
- Concentração de metais pesados (As, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Hg, Mo, Ni, Se e Zn);
- Concentração de material orgânico tóxico (Benzenos Clorados, Ésteres de ftalatos,
   Fenóis, Hidrocarbonetos aromáticos e Poluentes Orgânicos Persistentes POP's);
- Presença de agentes patógenos (coliformes termotolerantes, ovos de helmintos, Salmonella sp e vírus entéricos);

Estabilidade (SV/ST < 0.70).

## 3.10.4.1 Potencial agronômico

Os principais parâmetros de qualidade relacionados as especificações de fertilizantes orgânicos são descritos a seguir.

# • CARBONO ORGÂNICO TOTAL (mg/L)

Quanto maior o teor de matéria orgânica de boa qualidade, melhor será o potencial do fertilizante para realizar os efeitos de melhoria de densidade e estruturação do solo, adequação da retenção de água, aeração e drenagem, maior tamponamento e correção do pH do solo. As consequências da adição de matéria orgânica ao solo são: adsorção dos nutrientes, efeito de quelação de cátions, aumento da capacidade de troca de cátions e melhoria da fauna e flora do solo (RODELLA, 1996).

# • CAPACIDADE DE TROCA CATIÔNICA – CTC – mmol c/kg

A capacidade de retenção de cátions por um material orgânico depende do grau de decomposição, ou maturação, em que ele se encontra, ou seja, da natureza dos compostos que o constituem em dado momento. As propriedades adsortivas da matéria orgânica se acentuam com a estabilização desta na forma de húmus (RODELLA, 1996).

No Estado de São Paulo os resultados são apresentados em mmol<sub>c</sub>.dm<sup>-3</sup> (milimols de carga por decímetro cúbico de solo) do material seco (RAIJ *et al.*, 1996).

# • UMIDADE MÁXIMA (%)

É preciso ter em mente que a apresentação do fertilizante orgânico deve ter a facilidade de transporte e de aplicação no campo. Por isso, este deve ter consistência friável, evitando-se teores elevados de umidade, que tornem caro o transporte e inviáveis determinadas formas de aplicação (RODELLA, 1996).

## • pH

O índice pH fornece uma boa informação sobre o estado de decomposição da matéria orgânica que foi submetida a um processo de fermentação; matérias-primas excessivamente ácidas podem receber uma aplicação de calcário para favorecer a decomposição, apesar de que mesmo não se corrigindo sua acidez, a matéria orgânica fermentada aerobiamente, quando estabelecida na forma de húmus, apresenta pH alcalino. Para efeito de interpretação prática, no processo de compostagem considera-se que a matéria-prima crua tem reação ácida; quando neutra ou quase neutra, indica que o composto está bio-estabilizado; o composto humificado apresentará obrigatoriamente reação alcalina (KIEHL, 1985).

# • RELAÇÃO CTC/C

A relação CTC/C foi considerada como mais apropriada que a relação C/N, para indicar o grau de humificação de materiais orgânicos, pois esta pode ser afetada seriamente pela presença de nitrogênio amoniacal, como ocorre no esterco de galinha. A vantagem da utilização da capacidade de troca de cátions é que, além de qualificar o material orgânico, esse índice traz uma informação muito significativa do ponto de vista agronômico, ou seja, a melhoria de retenção de nutrientes que esses produtos podem proporcionar ao serem incorporados ao solo (RODELLA, 1996).

# • RELAÇÃO C/N

A relação C/N de um material orgânico tem um papel fundamental no metabolismo de desenvolvimento de microrganismos. Estes necessitam de carbono como fonte de energia e de nitrogênio para síntese de proteínas. É por esta razão que C/N é considerada como o fator que melhor caracteriza o equilíbrio dos substratos para compostagem (BASSO, 2004).

Na natureza os vegetais apresentam uma alta relação C/N, entre 40 a 60 partes de carbono para uma de nitrogênio. Como os microrganismos necessitam de nitrogênio para o seu desenvolvimento, a decomposição desse material somente será possível com a existência de uma fonte complementar de nitrogênio, geralmente retirado do solo. Neste caso, a decomposição da matéria orgânica implicará numa competição com as plantas quanto ao nitrogênio disponível no solo. À medida que o processo vai ocorrendo, a relação C/N vai abaixando até patamares de 18/1, que indica uma humificação avançada. No húmus esta relação C/N é de 12/1 (COMPARINI *et al.*, 2001).

A Instrução Normativa SDA n° 25 de 2009 (BRASIL, 2009), que revogou a Instrução Normativa SDA n° 23 de 2005 (BRASIL, 2005), define o lodo de esgoto como sendo a matéria-prima proveniente do sistema de tratamento de esgotos sanitários, possibilitando um produto de utilização segura na agricultura, atendendo aos parâmetros estabelecidos no Anexo III e aos limites máximos estabelecidos para contaminantes. No Anexo III constam os parâmetros de qualidade para fertilizantes orgânicos mistos e compostos como mostrado na Tabela 7.

Os fertilizantes orgânicos são classificados de acordo com as matérias-primas utilizadas na produção. Dessa forma, os fertilizantes que utilizam lodo oriundo do tratamento de despejos sanitários, resultando de utilização segura na agricultura são classificados como Classe "D".

Tabela 7 - Especificações dos fertilizantes orgânicos mistos e compostos.

Garantia	Misto/composto			Vermicomposto	
	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Classes A, B, C, D
Umidade (máx.)	50	50	50	70	50
N total (mín.)				0,5	
*Carbono orgânico (mín.)	15 10				
*CTC <sup>(1)</sup>	Conforme declarado				
pH (mín.)	6,0 6,0 6,5 6,0			6,0	
Relação C/N (máx.)	20 14				
*Relação CTC/C (1)	Conforme declarado				
Outros nutrientes	Conforme declarado				

<sup>\*</sup>valores expressos em base seca, umidade determinada a 65°C.

Fonte: Instrução Normativa SDA nº 25 de 2009 (BRASIL, 2009).

<sup>(1)</sup>  $\acute{E}$  obrigatória a declaração no processo de registro de produto.

No Art. 7o, da Seção IV, da Instrução Normativa SDA n° 25 de 2009 (BRASIL, 2009) estão os requisitos dos fertilizantes orgânicos simples, mistos e compostos para aplicação no solo.

Para os produtos sólidos, as garantias serão, no mínimo, de acordo com as constantes dos Anexos II e III. Dessa forma, para o caso do lodo que não é um fertilizante simples, basta verificar os parâmetros de qualidade do Anexo III como discutido anteriormente.

Para os produtos fluidos, deve-se garantir no mínimo 3% (três por cento) de carbono orgânico e para os macronutrientes secundários e micronutrientes, quando garantidos no produto, deverá ser observada as garantias mínimas no art. 6º como disposto na Tabela 8.

Tabela 8 – Teores mínimos de nutrientes em fertilizantes orgânicos.

-0		TIPO DO	DO FERTILIZANTE ORGÂNICO		
Mín	r Total imo-%	Teor Solúvel em H <sub>2</sub> O			
NUTRIENTE		AÇÃO NO OLO	VIA FOLIAR, FERTIRRIGAÇÃO E HIDROPONIA		
	Sólido	Fluido	Sólido	Fluido	
Cálcio (Ca)	1 1	0,5	0,5	0,3	
Magnésio (Mg)	1 1	0,5	0,5	0,3	
Enxofre (S)	1	0,5	0,5	0,3	
Boro (B)	0,03	0,01	0,02	0,01	
Cloro (Cl)	0,1	0,1	0,1	0,1	
Cobalto (Co)	0,005	0,005	0,005	0,005	
Cobre (Cu)	0,05	0,05	0,05	0,05	
Ferro (Fe)	0,2	0,1	0,1	0,02	
Manganês (Mn)	0,05	0,05	0,1	0,02	
Molibdênio (Mo)	0,005	0,005	0,02	0,005	
Níquel (Ni)	0,005	0,005	0,005	0,005	
Silício (Si)	1,0	0,5	0,5	0,05	
Zinco (Zn)	0,1	0,05	0,1	0,05	

Fonte: Instrução Normativa SDA n° 25 de 2009 (BRASIL, 2009).

Tanto na Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006), quanto na Norma Técnica P4.230 (CETESB, 1999), recomenda-se a determinação da fertilidade do solo por meio dos parâmetros: pH, matéria orgânica, P, Ca, K, Mg, Na, H+Al (acidez potencial), S, CTC e V%. Para o lodo, recomenda-se a determinação de pH, umidade, carbono orgânico, N total, N Kjeldahl, N amoniacal, N nitrato/nitrito, P total, K total, Ca total, Mg total, S total, Na total, e Sólidos voláteis e totais no lodo de esgoto ou produto derivado. Por fim, recomenda-se a determinação de condutividade elétrica em solo.

Esses parâmetros são utilizados para caracterização física, química e microbiológica com a finalidade de estabelecer a taxa de aplicação, os critérios de operação, estocagem e

monitoramento do lodo de acordo com as características do solo e da vegetação a ser estabelecida no local.

De acordo com a Norma Técnica P4.230 (CETESB, 1999), a aplicação do nitrogênio, em taxas agronômicas, pode ser realizada apenas quando a sua concentração no lodo é conhecida com um grau de certeza razoável. Caso o nitrogênio ou qualquer outro constituinte limitante varie sazonalmente de maneira acentuada, a variabilidade ao longo do tempo deve ser documentada.

No caso de lodos de esgoto com origem industrial, fica a critério do Órgão de Controle Ambiental a solicitação de análises específicas para a caracterização quanto a aspectos de toxicidade tais como de avaliação da genotoxicidade através de teste de AMES e de informações detalhadas do processamento de origem do lodo, tais como relação das matérias-primas e produtos fabricados (CETESB, 1999).

Na Tabela 9, pode-se observar um resumo dos parâmetros que devem ser determinados e analisados para caracterização do lodo e do solo como discutidos anteriormente.

Tabela 9 – Parâmetros relativos ao potencial agronômico.

Parâmetro	CONAMA 375 (2006)	CETESB (1999)	IN Nº25 de 2009
рН	Lodo/Solo	Lodo/Solo	mínimo 6
Matéria Orgânica	Solo	Solo	
Fósforo Total	Lodo/Solo	Lodo/Solo	-
Cálcio total	Lodo/Solo	Lodo/Solo	1,0
Potássio total	Lodo/Solo	Lodo/Solo	-
Magnésio total	Lodo/Solo	Lodo/Solo	1,0
Sódio total	Lodo/Solo	Lodo/Solo	-
Acidez potencial (H+AI)	Solo	Solo	-
Soma de bases (S)	Solo	Solo	-
Capacidade de troca catiônica (CTC)	Solo	Solo	conforme declarado
Porcentagem de saturação em bases	Solo	Solo	-
Carbono Orgânico	Lodo	Lodo	mínimo 15%
Umidade	Lodo	Lodo	máximo 70%
Nitrogênio Total	Lodo	Lodo	-
Nitrogênio Kjeldahl	Lodo	Lodo	conforme declarado
Nitrogênio amoniacal	Lodo	Lodo	-
Nitrogênio nitrato/nitrito	Lodo	Lodo	-
Enxofre total	Lodo	-	1,0
Sólidos voláteis	Lodo	Lodo	-
Condutividade elétrica	Solo	Solo	-
Sólidos totais	Lodo	-	-
Relação C/N	-	-	máximo 20
Boro	-	-	0,03
Cloro	-	-	0,1
Cobalto	-	-	0,005
Ferro	-	-	0,2
Manganês	-	-	0,05
Silício	-	-	1,0
Cobre	-	-	0,05
Molibdênio	-	-	0,005
Níquel	-	-	0,005
Zinco	-	-	0,1

Lodo – análise do parâmetro somente no lodo

Solo – análise do parâmetro somente no solo

Lodo/Solo – análise do parâmetro no lodo e no solo

# 3.10.4.2 concentração de metais pesados

A Instrução Normativa SDA n° 27 de 2006 (BRASIL, 2006) define limites para os contaminantes presentes em fertilizantes. Esses limites máximos de contaminantes estão dispostos na Tabela 10.

Tabela 10 - Limites máximos de contaminantes admitidos em fertilizantes orgânicos.

Contaminante	Valor máximo admitido (mg/kg)
Arsênio	20
Cádmio	3
Chumbo	150
Cromo	200
Mercúrio	1
Níquel	70
Selênio	80

Fonte: Instrução Normativa SDA n° 27 de 2006 (Anexo V) (BRASIL, 2006).

Na Tabela 11 estão as concentrações máximas dos metais pesados permitidos no lodo de acordo com a Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

Tabela 11 - Lodos de esgoto ou produto derivado - substâncias inorgânicas.

Substâncias Inorgânicas	Concentração Máxima permitida no lodo de	
Substancias morganicas	esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)	
Arsênio	41	
Bário	1300	
Cádmio	39	
Chumbo	300	
Cobre	1500	
Cromo	1000	
Mercúrio	17	
Molibdênio	50	
Níquel	420	
Selênio	100	
Zinco	2800	

Fonte: Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

A concentração máxima dos metais pesados, de acordo com a Norma técnica P4.230 (CETESB, 1999) está disposta na Tabela 12.

Tabela 12 – Concentrações limites de metais no lodo.

Substâncias Inorgânicas (mg/kg, base seca)	Concentração máxima permitida no lodo (base seca) mg/kg	Taxa de aplicação annual máxima (kg/ha/período de 365 dias)	Carga máxima acumulada de metais pela aplicação do lodo (kg/ha)
Arsênio	75	2,0	41
Cádmio	85	1,9	39
Chumbo	840	75	1500
Mercúrio	57	15	300
Molibdênio	75	0,85	17
Níquel	420	21	420
Selênio	100	5,0	100
Zinco	7500	140	2800

Fonte: Norma técnica P4.230 (CETESB, 1999).

Por fim, apresenta-se na Tabela 13 um resumo dos valores máximos permitidos no lodo de esgoto para as substâncias inorgânicas discutidas.

Tabela 13 - Concentração Máxima permitida no lodo de esgoto ou produto derivado (mg/kg, base seca)

Substâncias Inorgânicas (mg/kg, base seca)	CONAMA 375/06	CETESB P4.230	IN №37 de 2012
Arsênio	41	75	20
Bário	1300	•	-
Cádmio	39	85	3
Chumbo	300	840	150
Cobre	1500	-	-
Cromo	1000	*	200
Mercúrio	17	57	1
Molibdênio	50	75	-
Níquel	420	420	70
Selênio	100	100	80
Zinco	2800	7500	-

<sup>\*</sup> A concentração de Cromo é medida, mas não há referências quanto a limites máximos.

Percebe-se que os valores mais restritivos são os relativos ao MAPA, sendo a norma técnica da CETESB a menos restritivas para os valores de metais pesados.

# 3.10.4.3 concentração de material orgânico tóxico

Não há menção, pelo MAPA, de substâncias orgânicas tóxicas em fertilizantes orgânicos, uma vez que se limita a verificação dos agentes fitotóxicos, patógenos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas.

No Anexo V da Resolução do CONAMA 375 (BRASIL, 2006) estão presentes as substâncias orgânicas a serem determinadas no lodo de esgoto e no solo. As concentrações permitidas no solo estão dispostas na Tabela 14.

Tabela 14 — Concentrações permitidas de substâncias orgânicas em solos agrícolas.

Substância	Concentração permitida no solo (mg/kg)
Benzer	nos Clorados
1,2-Diclorobenzeno 0,73	
1,3-Diclorobenzeno	0,39
1,4-Diclorobenzeno	0,39
1,2,3-Triclorobenzeno	0,01
1,2,4-Triclorobenzeno	0,011
1,3,5-Triclorobenzeno	0,5
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	0,16
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	0,01
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	0,0065
Éstere	es de ftalatos
Di-n-butil ftalato	0,7
Di (2-etilhexil)ftalato (DEHP)	1
Dimetil ftalato	0,25
Fenóis	não clorados
Cresois	0,16
Fenó	is clorados
2,4-Diclorofenol 0,031	
2,4,6-Triclorofenol	2,4
Pentaclorofenol	0,16
Hidrocarbonetos	aromáticos policíclicos
Benzo(a)antraceno	0,025
Benzo(a)pireno	0,052
Benzo(k)fluoranteno	0,38
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	0,031
Naftaleno	0,12
Fenantreno	3,3
Lindano	0,001

Fonte: Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

Na Tabela 15 estão os poluentes orgânicos persistentes (POP's) constantes na Convenção de Estocolmo. Segundo a Resolução citada, deve-se determinar quantitativamente os poluentes orgânicos persistentes, porém é omissa quanto aos valores máximos permitidos.

Tabela 15 – Poluentes Orgânicos Persistentes (POP's) no lodo.

POP	Concentração	Categoria
Aldrin	Anexo A	Pesticida
Dieldrin	Anexo A	Pesticida
Endrin	Anexo A	Pesticida
Clordano	Anexo A	Pesticida
Heptacloro	Anexo A	Pesticida
DDT	Anexo B	Pesticida
Toxafeno	Anexo A	Pesticida
Mirex	Anexo A	Pesticida
Hexaclorobenzeno	Anexo C	Pesticida/ Indústria química
PCB	Anexo A	Indústria química
PCB	Anexo C	-
Dioxinas e Furanos	Anexo C	-

Fonte: Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

Os POP's constantes na Convenção de Estocolmo são divididos em três categorias de acordo com a origem: pesticidas, indústria química ou subproduto (STOCKHOLM CONVENTION, 2009).

As substâncias presentes no Anexo A, com exceção do Dieldrin que é aceito na agricultura, devem ser eliminadas do lodo. No Anexo B estão presentes substâncias que possuem o uso restrito a determinadas atividades, porém nenhuma relacionada à agricultura, devendo ser eliminadas. Por fim, o Anexo C trata de substâncias cuja formação é não intencional como, por exemplo, em reações químicas de combustão incompleta contendo matéria orgânica e cloro (STOCKHOLM CONVENTION, 2009).

A Norma Técnica P4.230 (CETESB, 1999) não se aplica para lodos contendo PCB's (*Polychlorinated biphenyl*), dioxinas e furanos. Neste caso, caberá ao Órgão de Controle Ambiental avaliar a necessidade de caracterização do lodo quanto à presença desses poluentes, considerando a origem do mesmo e análise da viabilidade da sua utilização na agricultura.

Portanto, a verificação da concentração de material orgânico tóxico no lodo, restringese a caracterização do lodo como recomendado pela Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

# 3.10.4.4 presença de patógenos

No Anexo V da Instrução Normativa SDA n° 27 de 2006 (BRASIL, 2006) consta os valores máximo permitido para os patógenos presentes nos lodos de esgoto. Esses valores podem ser observados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valor máximo admitido dos agentes patógenos.

Contaminante	Valor máximo admitido
Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)	1000
Ovos viáveis de helmintos	1
(ovo/4g ST)	•
Salmonella sp	ausência em 10g de
Saimonella sp	matéria seca

Fonte: Instrução Normativa SDA nº 27 de 2006 (Anexo V) (BRASIL, 2006).

A Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006) classifica o lodo de esgoto, de acordo com a concentração de patógenos, em classes A e B como especificado na Tabela 17 sendo apenas lodos de Classe A permitidos para o uso agrícola. Segundo a Resolução citada, os lodos de Classe B poderão ser utilizados caso sejam propostos novos critérios ou limites baseados em estudos de avaliação de risco e dados epidemiológicos nacionais.

Tabela 17 – Classes de lodo de esgoto ou produto derivado – agentes patógenos.

Tipo de lodo de esgoto ou produto derivado	Concentração de patógenos
A	Coliformes Termotolerantes <10 <sup>3</sup> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 0,25 ovo / g de ST Salmonella ausência em 10 g de ST Vírus < 0,25 UFP ou UFF / g de ST
В	Coliformes Termotolerantes <10 <sup>6</sup> NMP / g de ST Ovos viáveis de helmintos < 10 ovos / g de ST

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável

UFF: Unidade Formadora de Foco UFP: Unidade Formadora de Placa

Fonte: Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

Quanto aos vírus entéricos a serem pesquisados, recomendam-se: adenovírus e vírus do Gênero *Enterovirus* (Poliovírus, Echovírus, Coxsackievírus). Em situações especiais - endêmicas ou epidêmicas - (surtos de diarreia, hepatite A e outras viroses de transmissão

fecal-oral), deve-se pesquisar rotavírus, vírus da hepatite A e outros, definidos pelo órgão ambiental, ouvido os órgãos competentes (BRASIL, 2006).

Já para a CETESB, os lodos são classificados de acordo com as características do tratamento a que for submetido, sendo classificado em classe A ou classe B.

Um lodo é considerado classe A se o processo adotado para o seu tratamento, quanto à redução adicional de patógenos, for aprovado pelo Órgão de Controle Ambiental como capaz de produzir este efeito e, ainda, deve atender os limites presentes na Tabela 18.

Um lodo é considerado classe B caso atenda a densidade de coliformes fecais como apresentado na Tabela 18. Para confirmação da classificação de um lodo como classe B, deve ser verificado o atendimento do processo adotado para seu tratamento visando à redução de patógenos tiver sido aceito pelo Órgão de Controle Ambiental. Ou ainda, pode-se apresentar o resultado do monitoramento de coliformes fecais no lodo preparado para aplicação no solo, no momento do uso, disposição ou da entrega a terceiros responsáveis pela aplicação, indicando que a média geométrica da densidade de coliformes fecais de sete amostras é inferior a 2 x 10<sup>6</sup> NMP/g ST (Número Mais Provável por grama de Sólidos Totais) ou 2 x 10<sup>6</sup> UFC/g ST (Unidades Formadoras de Colônias por grama de Sólidos Totais).

Tabela 18 - Classificação do Lodo quanto à presença de patógenos.

Tipo de lodo de esgoto	Concentração de patógenos	
Classe A	Coliformes fecias < 10 <sup>3</sup> NMP/g ST	
	Salmonella sp < 0,75 NMP/g ST	
Classe B	Coliformes fecias < 2 x10 <sup>6</sup> NMP/g ST	

Fonte: Norma técnica P4.230 (CETESB, 1999).

Na Tabela 19, um resumo dos valores de concentração máxima dos patógenos no lodo é apresentado conforme as recomendações discutidas anteriormente.

Agentes Patogênicos	CONAMA 375/06	CETESB P4.230	IN №27 de 2006
Coliformes termotolerantes (NMP/g ST)	10³	10³ (classe A)	- 10³
		2x10 <sup>6</sup> (classe B)	
Ovos viáveis de helmintos (ovo/g ST)	0,25	-	0,25
Salmonella sp	ausência em 10g de ST	0,75 NMP/g ST (classe A)	ausência em 10g de matéria seca
Vírus entéricos (UFP ou UFF/g ST)	0,25	-	-

Tabela 19 – Concentração máxima de agentes patógenos.

#### 3.10.4.5 estabilidade do lodo

Tanto na Resolução do CONAMA 375 (2006), quanto na Norma Técnica P4.230 (CETESB, 1999) considera-se, para fins de utilização agrícola, o lodo de esgoto ou produto derivado como estável se a relação entre sólidos voláteis e sólidos totais for inferior a 0,70.

# 3.10.4.6 Restrições de uso do lodo ou produto derivado

É proibida a utilização de qualquer classe de lodo de esgoto ou produto derivado em pastagens e cultivo de olerícolas, tubérculos e raízes, e culturas inundadas, bem como as demais culturas cuja parte comestível entre em contato com o solo. Segundo a Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006), não é permitida a aplicação de lodo de esgoto ou produto derivado:

- I em unidades de conservação, com exceção das Áreas de Proteção Ambiental-APA;
- II em Área de Preservação Permanente-APP;
- III em Áreas de Proteção aos Mananciais-APMs definidas por legislações estaduais e municipais e em outras áreas de captação de água para abastecimento público, a critério do órgão ambiental competente;
- IV no interior da Zona de Transporte para fontes de águas minerais, balneários e estâncias de águas minerais e potáveis de mesa, definidos na Portaria DNPM nº 231, de 1998;
- V num raio mínimo de 100 m de poços rasos e residências, podendo este limite ser ampliado para garantir que não ocorram incômodos à vizinhança;
- VI numa distância mínima de 15 (quinze) metros de vias de domínio público e drenos interceptadores e divisores de águas superficiais de jusante e de trincheiras drenantes de águas subterrâneas e superficiais;
  - VII em área agrícola cuja declividade das parcelas ultrapasse:

- a) 10% no caso de aplicação superficial sem incorporação;
- b) 15% no caso de aplicação superficial com incorporação;
- c) 18% no caso de aplicação subsuperficial e em sulcos, e no caso de aplicação superficial sem incorporação em áreas para produção florestal;
  - d) 25% no caso de aplicação em covas;
  - VIII em parcelas com solos com menos de 50 cm de espessura até o horizonte C;
- IX em áreas onde a profundidade do nível do aquífero freático seja inferior a 1,5 m na cota mais baixa do terreno; e
- X em áreas agrícolas definidas como não adequadas por decisão motivada dos órgãos ambientais e de agricultura competentes.

# 3.10.4.7 Fiscalização MAPA

Finalmente, para utilização do lodo de esgoto na agricultura, o lodo deve estar registrado ou autorizado pelo MAPA. Para o registro é necessário:

- atender aos parâmetros agronômicos da Instrução Normativa SDA n° 25 de 2009 (BRASIL, 2009);
- atender aos limites máximos de contaminantes da Instrução Normativa SDA n° 37 de
   2012 (BRASIL, 2012);
  - estabelecimento deve estar registrado no ministério;
  - licenciamento ambiental;
  - atender às demais disposições da Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

Caso o lodo de esgoto não atenda aos parâmetros agronômicos definidos para registro ou não atenda aos limites definidos na Instrução Normativa SDA n° 37 de 2012 (BRASIL, 2012) para contaminantes, poderá ser autorizado pelo MAPA, desde que haja:

- comprovação de eficiência agronômica;
- manifestação do órgão de meio ambiente;
- atender aos limites máximos de contaminantes da Instrução Normativa SDA n° 27 de
   2006 (BRASIL, 2006) e às demais disposições previstas na Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006).

#### 3.10.5 Cobertura diária e final de aterro sanitário

A disposição final do lodo gerado em Estações de Tratamento de Esgoto em aterros sanitários não é sustentável como já foi discutido anteriormente. Porém, dado o cenário brasileiro que possui aterros sanitários como principal forma de disposição final, a ideia de utilizar o lodo como material de cobertura diária, intermediária e final têm sido considerada como uma alternativa possível.

A operação de aterros sanitários envolve o preenchimento do sistema de cobertura que é constituído por camada diária, intermediária e final como pode ser verificado nos compartimentos da Figura 28.

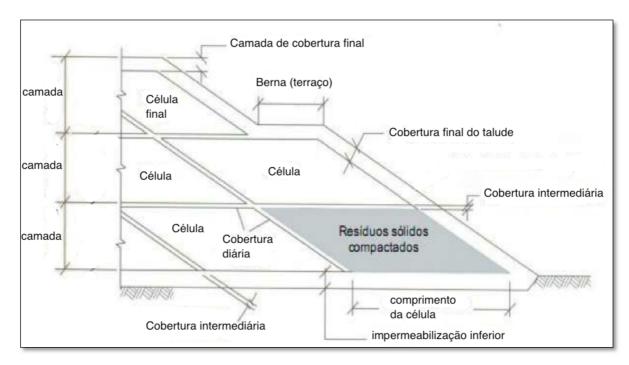


Figura 28 - Compartimento de um aterro sanitário.

Fonte: REICHERT (2007).

As coberturas diárias são realizadas no final de cada jornada de trabalho, ou mais frequente caso haja demanda, e suas funções básicas são (MC BEAN, ROVERS e FARQUHAR, 1995):

- a) Diminuir a infiltração de água pluvial no maciço de resíduos;
- b) Evitar a dispersão e o espalhamento dos resíduos pela ação dos ventos;
- c) Ajudar a reduzir a emanação de odores;
- d) Limitar o contato de aves e vetores de doença com os resíduos;
- e) Permitir a operação e o acesso de veículos à frente de serviço;

- f) Ajudar a prevenir incêndios;
- g) Minimizar o impacto visual.

Segundo os autores citados, uma camada diária de solo compactado com 15 cm é suficiente para alcançar essas funções, podendo variar entre 10 e 20 cm. Normalmente, se utiliza o próprio material de escavação do aterro sanitário para aproveitamento do material.

Alguns materiais alternativos são utilizados em coberturas diárias e intermediárias são: mantas geotêxtil ou mantas plásticas de propileno, mistura de resíduos de poda e capina com madeira e resíduos de construção civil (MC BEAN, ROVERS e FARQUHAR, 1995).

As coberturas intermediárias têm praticamente as mesmas funções que as coberturas diárias, mas diferencia-se por ter uma espessura da camada maior (em torno de 30 cm) e são utilizadas quando se pretende inativar o aterro por um período prolongado.

A camada de cobertura final de aterro sanitário é composta por um sistema de impermeabilização superior — camada de cobertura final. Devem possuir baixa permeabilidade à água e durabilidade, uma vez que ficam suscetíveis as intempéries, escavações por animais, erosão, recalques da massa de resíduos (REICHERT, 2007). Vale ressaltar que o aterro, após desativado pode ter sua área aproveitada, por exemplo, para um espaço recreativo como parques, campos de futebol, dentre outras construções que não demandem capacidade geotécnica para fundações.

As finalidades da cobertura final são (MC BEAN, ROVERS e FARQUHAR, 1995):

- a) Proporcionar o escoamento da água superficial e proteger a cobertura em si de erosões;
- b) Atuar como uma capa de baixa permeabilidade que reduz a infiltração das águas superficiais na massa de resíduos e limite a geração de lixiviado;
  - c) Reter umidade para o crescimento de vegetação;
- d) Reduzir ou aumentar a migração de gases do aterro, dependendo dos objetivos do projeto;
  - e) Adequar a área e os seus contornos de acordo com sua futura utilização;
  - f) Fornecer uma base para o estabelecimento de uma cobertura de solo adequada.

O emprego do lodo em camadas de cobertura não demanda um alto grau de qualidade como no uso agronômico. Além disso, o lodo pode ser capaz de cumprir as funções requeridas nos aterros sanitários. Dependendo das características do lodo, pode ser necessário misturar ao solo para o atendimento dos requisitos de cobertura. Vale ressaltar que, comparado ao

processo convencional de cobertura diária e final de aterros sanitários, o uso do lodo como material de cobertura permite a diminuição do uso de solo, possibilitando uma disposição final sustentável para parte do lodo.

Esse meio de disposição final do lodo pode ser utilizado em ETEs que já possuem um sistema de tratamento e disposição final do lodo, uma vez que manter mais opções para a disposição final do lodo é uma estratégia para o melhor gerenciamento dessa atividade.

PRIM (2011) testou diferentes composições de solo, lodo gerado em ETA (LETA) e lodo gerado em ETE (LETE) para aplicá-las em coberturas de aterros. Segundo a pesquisadora, o uso do traço de solo:LETA:LETE:CaO na proporção de 1:0,425:0,425:0,15 é viável geotecnicamente, ambientalmente e economicamente para o cenário estudado.

#### 3.10.6 Uso do lodo no controle de erosão hídricas

As aplicações do lodo podem contribuir com o aumento de matéria orgânica na superfície do solo, contribuindo para a formação de agregados estáveis e de maior tamanho. Esse efeito pode melhora a estabilidade da estrutura do solo, resultando em maior resistência à erosão e maior capacidade de retenção de umidade (KOCSSI, MARIA e DECHEN, 2007)

TOLEDO, MARIA e DECHEN (2012) estudaram o impacto das chuvas intensas na erosão hídrica em solo na cidade de Campinas/SP. Com a aplicação do lodo no solo, as perdas de água por enxurrada foram diminuindo ao longo do tempo, com resultados proporcionais aos encontrados por BOSSCHE *et al.* (2000) — diminuição do volume de enxurrada de 290 ton/ha para 134 ton/ha. Esses últimos autores ainda observaram uma diminuição no carreamento de sedimentos de 1.200 kg/ha para 500 kg/ha.

Dessa forma, o lodo de esgoto sanitário pode ser utilizado para reduzir o impacto das chuvas erosivas na erosão do solo.

## 3.10.7 Construção Civil

A reciclagem de resíduos é uma prática que vem sendo utilizada de maneira crescente na área da construção civil. Definida como o conjunto de atividades que tornam possível o reaproveitamento ou utilização dos resíduos sólidos provenientes da própria construção civil ou de outras atividades, até então considerados inúteis e problemáticas, a reciclagem pode ser considerada como prática ambientalmente correta, diminuindo o consumo de recursos naturais, seja na forma de matérias-primas ou de energia, transformando resíduos em recursos

e reduzindo, assim, os custos e danos ambientais decorrentes de práticas inadequadas de disposição final (INGUNZA, ANDREOLI, *et al.*, 2006).

#### 3.10.7.1 Produtos Cerâmicos

O uso na indústria cerâmica é altamente promissor, pois as massas argilosas utilizadas são de natureza heterogênea, aceitando a incorporação de materiais residuais de diversos tipos e origens, mesmo quando adicionados em quantidades significantes (OLIVEIRA, MACHADO e HOLANDA, 2004).

WENG, LIN e CHIANG (2003) conclui que o lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto industrial pode ser incorporado a massa para fabricação de tijolos, indicando 10% de lodo numa faixa de temperatura entre 880°C e 960°C como a faixa otimizada para produção de tijolos de boa qualidade.

Na conclusão de seu trabalho, JORDÁN *et al.* (2005) concluíram que embora as propriedades de absorção de água e tensão de ruptura à flexão sejam afetadas negativamente, esta opção é viável para a reciclagem do lodo produzido nas estações de tratamento de esgotos, principalmente pela capacidade de imobilização de metais pesados contidos no lodo.

# 3.10.7.2 Agregado leve

O lodo de esgoto produzido na cidade de Londrina/PR foi utilizado para produzir agregado leve e, foi concluído que o produto final apresentou características compatíveis com os requisitos e critérios estabelecidos pelas especificações brasileiras no que tange a produção de elementos de concreto para alvenaria, produção de concreto estrutural ou para isolamento térmico (MORALES e AGOPYAN, 1992).

SANTOS (2003) destaca um trabalho de fabricação de agregados leves desenvolvido pelo Dr. George Harrison para Sand Diego Region Water Reclamation Agency. O processo apresentava as seguintes etapas (GEORGE, 1986):

- mistura do esgoto com argila, alumínio e ácido poliacrílico;
- coagulação e floculação;
- decantação (lodo com 45% de sólidos);
- mistura com argila;
- extrusão;
- corte para formação de pelotas com cerca de 6 mm de diâmetro;
- queima entre 1070 a 1095<sup>o</sup>C.

#### 3.10.7.3 Matriz de Cimento Portland

ONAKA (2000) realizou experimentos de processamento de lodo em uma fábrica de cimento e obteve como resultado que a incorporação de 2% de lodo seco como matéria-prima em fornos de clínquer permitiria consumir todo o lodo gerado no Japão.

Nesse estudo, o processo se iniciava com a secagem do lodo, transformando-o em péletes, porém conservando seu teor de matéia orgânica e energia. Os pélets (de 2 a 10 mm) foram lançados no forno junto com o restante da matéria-prima do cimento. A matéria orgânica foi utilizada como fonte complementar de calor e a parte inorgânica integrou o clínquer.

### 3.10.7.4 Componentes de Mistura Asfáltica

HASSAN (2005) investigou a aplicação de cinzas de resíduos sólidos incineradas em concreto asfáltico quente, indicando uso potencial em revestimentos de superfícies e base, sendo possível substituir até 15% dos agregados do concreto para superfície por cinzas até 20% por base.

## 3.10.8 Uso do lodo na produção de biodiesel

Biodiesel consiste numa cadeia longa de ésteres metílicos de ácidos graxos produzidos de vários lipídios por transesterificação de triglicerídeos desde que algumas características físico-químicas do óleo vegetal não causem danos aos motores diesel (BASHA, GOPAL e JEBARAJ, 2009).

Um estudo na Coréia do Sul mostrou que o lodo de esgoto é um forte candidato para produção do biodiesel. Alto teor de lipídios (18 - 20%) com carbonos de cadeia entre  $C_{16}$  e  $C_{18}$  foram experimentalmente identificados e medidos. Foi investigada a utilização de escórias como catalisadores heterogêneos derivados de fábrica de fundição de magnésio. Além disso, a extração de lipídios do lodo de esgoto inevitavelmente gera quantidades substanciais de resíduos, os quais pode-se aproveitar a energia a partir de processos termoquímicos como a pirólise/gaseificação (KWON, YI e KWON, 2013).

Nesse trabalho, a conversão em biodiesel, por meio da reação de transesterificação com MgO-CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – derivado de escórias de magnésio – foi de aproximadamente 98%. Foram relatados ainda os benefícios da introdução de gás carbônico no processo de

pirólise/gaseificação como aumento da geração de CO e redução hidrocarbonetos condensáveis.

# 3.11 Métodos para minimização da geração de lodo biológico

Levando em conta as restrições ambientais para disposição final do lodo e os custos associados ao seu tratamento, muitos pesquisadores tentam desenvolver métodos de minimização da produção de lodo nas ETAs e ETEs. Para isso, de forma que no processo anaeróbio o lodo possa sofrer maior degradação e consequentemente aumentar a produção de biogás, diminuindo assim seu volume final e os impactos ambientais e econômicos advindos da destinação final deste resíduo (ANDREOLI, FERREIRA e CHERUBINI, 2003).

Durante a digestão anaeróbia dos lodos, o primeiro estágio no processo de degradação de matéria orgânica particulada é a solubilização e o aumento da hidrólise de estruturas carbônicas poliméricas complexas (AYOL, 2005). A fim de usar as partículas orgânicas como substrato, os microrganismos liberam enzimas extracelulares para hidrolisar e solubilizar a matéria particulada. Além disso, a digestão dos lodos é bastante dificultada pelo fato da matéria orgânica se encontrar no interior das células microbianas, resistentes à lise.

A fim de incrementar a lise de células presentes no lodo e hidrolisar as substâncias orgânicas de alto peso molecular a componentes de baixo peso molecular, melhorando a digestão anaeróbia do lodo, diversos pré-tratamentos podem ser considerados: tratamentos biológicos, mecânicos, térmicos, químicos (TAKEMOTO, 2006).

No Brasil, poucos estudos abordam a temática de redução na produção de lodo, mesmo com a ampla utilização do tratamento por lodos ativados que gera uma quantidade de lodo muito maior comparado aos tratamentos anaeróbios. Esse assunto é uma preocupação muito avançada para um país que ainda não possui coleta e tratamento adequado para todo o esgoto gerado, e nem gerenciamento do tratamento e disposição final dos resíduos gerados. Dessa forma, a maioria dos estudos tem origem de pesquisadores, na sua maioria, do Hemisfério Norte. Nesses países, por causa do clima, utilizam o sistema de lodos ativados e, para estabilização do lodo utilizam a digestão anaeróbia, necessitando de alguma fonte para aquecimento do reator. Muitos estudos focados na otimização do processo da digestão anaeróbia tem sido desenvolvido, buscando a diminuição da quantidade de lodo produzida e a potencialização do aumento da produção do biogás que pode ter sua energia recuperada.

São apresentados a seguir os principais métodos aplicados para melhoria da biodegrabilidade e da biodisponibilidade do lodo de esgoto.

## 3.11.1 Métodos físico-químicos

A desintegração consiste na quebra da parede celular, permitindo a hidrólise do material orgânico intracelular; consequentemente, a etapa da hidrólise é acelerada e as características para digestão do lodo são melhoradas (SPINOSA *et al.*, 2011). O princípio da desintegração do lodo pode ser observado na Figura 29.

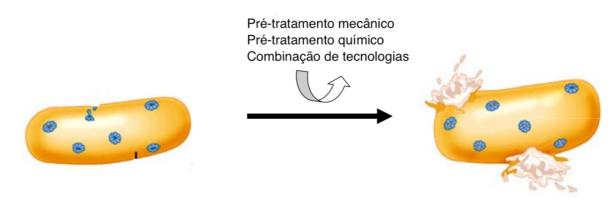


Figura 29 – Princípio da desintegração do lodo.

Fonte: PHOTHILANGKA (2008).

Na desintegração da célula, seu material e nutrientes são liberados no efluente, aumentando sua carga orgânica. Essa matéria orgânica entra novamente no ciclo metabólico de outros organismos, sendo uma parcela do carbono consumido para atividades vitais. Nesse processo, geralmente, há redução da produção de lodo. O crescimento da biomassa - devido à existência da matéria carbonácea liberada na desintegração - não pode ser medido separadamente da biomassa gerada por meio da existência da matéria carbonácea original. Por isso, esse crescimento é chamado de crescimento críptico (MEHRDADI, MOHAMMADI e TORABIAN, 2012). Há duas fases no crescimento críptico: lise e biodegradação. A estratégia utilizada no crescimento críptico celular vai determinar a eficiência da lise e conduzir a uma redução global da produção de lodo (PONEZI, 2005).

# 3.11.1.1 Ultrassom

Os mecanismos associados ao tratamento por ultrassom são cavitação e reações químicas devido a formação de radicais OH, HO<sub>2</sub>, H à altas frequências. Para o tratamento do lodo, baixas frequências (20-40k Hz) são mais eficientes (CARRÈRE *et al.*, 2010), promovendo fenômenos físicos e mecânicos como as ondas de pressão. Vale ressaltar que a

aplicação de altas frequencias tem sido estudada no pré-tratamento por processos oxidativos avançados.

Tratamentos ultrasônicos usando ondas de alta e baixa frequência têm sido bastante utilizados para romper flocos e células presentes em lodos biológicos gerados por processos de lodos ativados, aumentando assim a liberação de água intersticial e a disponibilidade de substâncias intracelulares para posterior digestão anaeróbia (YIN *et al.*, 2004).

## 3.11.1.2 Ozonização

O ozônio é um poderoso oxidante capaz de transformar os compostos nãobiodegradáveis em compostos biodegradáveis que são mais facilmente decompostos em dióxido de carbono e água no tratamento biológico subsequente (ALBUQUERQUE, 2008).

A ozonização do lodo resulta tanto na solubilização (devido a desintegração dos sólidos suspensos) quanto na mineralização (devido a oxidação da matéria orgânica solúvel), e ainda o reciclo desse material ao tanque de aeração induz o crescimento críptico (WEI *et al.*, 2003).

#### 3.11.1.3 Adição de ácido/base

O tratamento alcalino é relativamente efetivo na solubilização do lodo, sendo mais eficazes os tratamentos com NaOH, KOH, Mg(OH)<sub>2</sub> e Ca(OH)<sub>2</sub>, apresentados em ordem decrescente (CARRÈRE *et al.*, 2010).

#### 3.11.1.4 Processos de oxidativo avançados ( $H_2O_2/O_3$ )

Recentemente, os processos oxidativos avançados (POA) têm sido estudados extensivamente para diferentes efluentes devido a habilidade de tratar poluentes incluindo solventes clorados, pesticidas, bifenilas policloradas, fenóis, hidrocarbonetos e outros compostos orgânicos variando desde 1µg/L até 1.000 mg/L. POAs utilizam a alta reatividade dos radicais hidroxilas OH para degradar até mesmo as moléculas mais recalcitrantes em compostos biodegradáveis por meio da oxidação ou mineralização sob condições de pressão e temperatura próximas a ambiente, produzindo dióxido de carbono e íons inorgânicos (MATILAINEN e SILLANPÄÄ, 2010).

#### 3.11.1.5 Condição microaeróbia

A utilização de condições microaeróbias pela dosagem de uma quantidade limitada de ar (ou oxigênio puro) num reator anaeróbio pode melhorar a eficiência da digestão anaeróbia e aumentar tanto a taxa de hidrólise, como a biodegradabilidade (SPINOSA *et al.*, 2011), apesar do oxigênio ser letal para as arqueas metanogênicas.

#### 3.11.2 Tratamento térmico

A aplicação de calor aos lodos biológicos provoca o rompimento das ligações químicas de substâncias poliméricas assim como das paredes celulares presentes na solução, pela diferença de pressão entre o meio e seu interior, possibilitando uma maior solubilização das partículas orgânicas e um melhor desempenho na digestão anaeróbia desse lodo. (TAKEMOTO, 2006).

#### 3.11.2.1 Hidrólise térmica

No caso da hidrólise térmica, o lodo é submetido a altas temperatura e pressão por um determinado intervalo de tempo de forma que a estrutura celular das bactérias sejam destruídas, assim como as substâncias poliméricas extracelulares ao redor das células, sendo liberados esses materiais liberados na fase líquida (BOUGRIER, DELGENES e CARRERE, 2006).

Em um estudo realizado à temperatura de 121°C, com um tempo de tratamento de uma hora, BARJENBRUCH e KOPPLOW (2003), obtiveram um aumento de aproximadamente 20% na produção de biogás para a amostra tratada em relação ao controle.

No entanto, as estratégias mencionadas para a redução de lodo são tecnologias incipientes no tratamento de lodo e seus custos variam significativamente, sendo muitas delas (ou quase todas) de custo elevado para minimizar a geração de lodo, atualmente.

Portanto, deveriam ser escolhidas com base em análises de custos e taxa de impacto ambiental antes de sua aplicação prática. A análise de custo inclui o capital adicional, custos operacionais envolvidos, benefícios para o tratamento de lodo e disposição. No aspecto impacto ambiental, as estratégias de minimização da produção de excesso de lodo deveriam ser avaliadas quanto: problemas de odor e lançamento de nutrientes e toxicidade

(desacopladores no efluente tratado). Também deveriam ser consideradas as desvantagens de cada estratégia empregada e avaliados quanto aos benefícios almejados (PONEZI, 2005).

#### 3.11.3 Tratamentos Biológicos

#### 3.11.3.1 Hidrólise biológica por adição de enzimas

A ação enzimática durante a digestão anaeróbia ocorre naturalmente através da produção de enzimas extracelulares pelos microrganismos existentes no meio e é responsável pela hidrólise de substâncias orgânicas poliméricas constituintes dos lodos biológicos, tornando-as disponíveis para posterior metabolismo. Enzimas são proteínas de ação específica que visam degradar compostos orgânicos tais como outras proteínas, lipídios e polissacarídeos, liberando partículas menores, mais disponíveis para os microrganismos, tais como aminoácidos, ácidos graxos e açúcares (TAKEMOTO, 2006).

A atividade enzimática diminui ao decorrer do tempo pela degradação sofrida pelas proteínas durante a digestão biológica (NOVAK, SADLER e MURTHY, 2003). Sendo assim, a adição de enzimas no pré-tratamento biológico do lodo tem como objetivo suplementar essa diminuição, ajudando na degradação dos biopolímeros que formam os aglomerados, o que poderia liberar maior quantidade de material orgânico presente no interior dos flocos, solubilizar mais substâncias para o crescimento dos microrganismos e melhorar a desaguabilidade do lodo (BARJENBRUCH e KOPPLOW, 2003).

A hidrólise enzimática aplicada a lodos é uma técnica pouco usada, principalmente por seu elevado custo de aplicação. Uma alternativa para redução dos custos desta técnica é o uso de extratos enzimáticos diversos ou misturas de enzimas não purificadas, mais baratas, que apresentem atividade enzimática para diferentes substratos, já que a hidrólise enzimática consiste em um tratamento menos drástico, não necessitando de temperaturas ou pH elevados (AYOL, 2005).

#### 3.11.3.2 Desacoplamento metabólico

A energia transferida nos processos de catabolismo e anabolismo é na forma de adenosina trifosfato (ATP) que, para maioria das bactérias aeróbias, é gerada pela fosforilação oxidativa. Nesse processo, os elétrons são transportados do substrato para o oxigênio.

O desacoplamento metabólico consiste no aumento da discrepância do nível de energia (ATP) entre anabolismo e catabolismo, de forma que a energia disponível para o

anabolismo seja limitada. Assim, há uma redução na produção de lodo quando ocorre o desacoplamento metabólico, dissipando energia para o anabolismo sem reduzir a taxa de remoção de matéria orgânica (WEI *et al.*, 2003).

O processo anaeróbio com sedimentação oxidativa (OSA – *Oxic-settling anaerobic*) consagrou o fato de que o ambiente anaeróbio seguido do aeróbio em ordem cíclica reduz a produção do lodo por meio do desacoplamento metabólico. Os microrganismos aeróbios capturam energia na forma de ATP liberada na oxidação do material orgânico. Esses mesmos microrganismos são incapazes de produzir a energia requerida quando expostos ao ambiente anaeróbio sob condições limitadas de alimento e, como consequência, consomem a reserva de ATP. Dessa forma, ao retornar ao ambiente aeróbio, os microrganismos buscam recuperar energia em forma de ATP, tornando-se prioridade perante a síntese de novas células (anabolismo). Alterando ambientes anaeróbios e aeróbios causa a morte de microrganismos obrigatoriamente aeróbios e anaeróbios. Dessa forma, os microrganismos são desintegrados, liberando material intracelular que pode ser degradado por várias enzimas extracelulares (KHURSHEED e KAZMI, 2011).

Vale ressaltar, que a mudança de ambientes com condições com e sem oxigênio é feita no processo de Reator UASB com lodos ativados como pós-tratamento, podendo-se considerar como mais uma vantagem desse sistema de tratamento de efluentes.

#### 3.11.3.3 Eco-manipulação (predação de bactérias)

Um processo de tratamento biológico de efluentes pode ser considerado como um ecossistema artificial, sendo o lodo ativado um habitat ideal para muitos micro-organismos. Uma maneira de reduzir a produção de lodo é explorar macro-organismos como protozoários e metazoários, uma vez que eles se alimentam das bactérias sem afetar a decomposição do substrato. Durante a transferência de energia, de um nível trófico baixo para um nível trófico alto, ocorre perda de energia devido a ineficiência na conversão de biomassa (WEI *et al.*, 2003).

Dessa forma, a predação de bactérias, por meio da alteração da microfauna pode ocasionar grandes perdas de energia conforme o fluxo da cadeia alimentar é seguido, reduzindo a produção de biomassa.

O emprego de estratégias para redução de lodo que tenha um impacto na comunidade microbiana pode influenciar na qualidade do lodo e do efluente tratado. A aplicação de

métodos analíticos e investigativos, como técnicas moleculares modernas, pode conduzir a novas respostas sobre o impacto da comunidade microbiana nos reatores (PONEZI, 2005).

As tecnologias apresentadas para redução da geração de lodo possuem um potencial para mudanças significativas nos métodos de tratamento de biossólidos, porém a preocupação principal é a de explorar cada vez mais alternativas que sejam viáveis economicamente e ambientalmente.

#### 3.12 Gerenciamento sustentável do lodo

Segundo SPINOSA *et al.* (2011), os sistemas de gerenciamento de lodo são, frequentemente, ineficientes e não sustentáveis, principalmente porque nenhum processo ou tratamento é capaz de atingir a sustentabilidade de forma efetiva, considerando os três elementos de fundamental importância:

- elemento ambiental (robusto ambientalmente, de acordo com as normas vigentes);
- elemento econômico (viável economicamente, tecnologicamente e operacionalmente);
- elemento social (desejável socialmente, aceito culturalmente).

Os autores citados formaram um grupo de pesquisadores e operadores de diversos países e reuniram seus conhecimentos e experiências visando o desenvolvimento de um sistema integrado para o gerenciamento sustentável do lodo. Vale ressaltar que alguns métodos ainda estão sendo desenvolvidos e, em geral, são inviáveis economicamente para aplicação prática

O sistema consiste em três etapas: digestão anaeróbia, desaguamento/secagem e tratamento térmico por meio de pirólise/gaseificação.

A digestão anaeróbia permite a recuperação de energia para utilização na etapa subsequente de desaguamento/secagem, onde o lodo é tratado para adquirir características necessárias para etapa subsequente de tratamento térmico, onde são obtidos energia e/ou materiais que podem ser utilizados como insumo.

O fluxograma desse sistema de um gerenciamento sustentável do lodo pode ser observado na Figura 30.

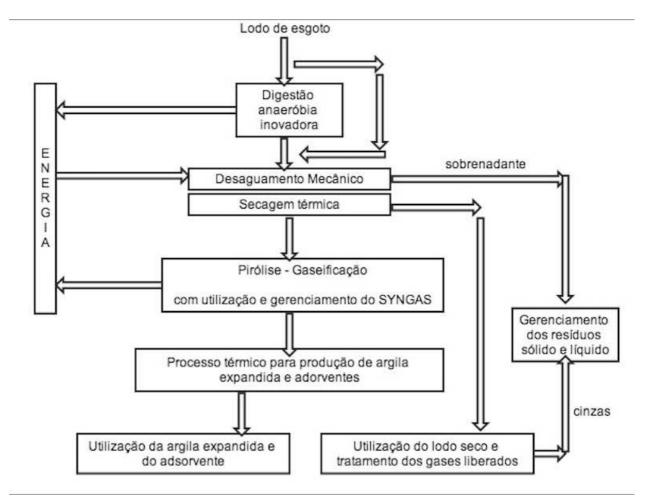


Figura 30 – Fluxograma do sistema para um gerenciamento sustentável do lodo.

SYNGAS – gás gerado no processo de gaseificação que consiste numa mistura de CO, H<sub>2</sub> e outros gases e resíduos como escórias e óleos.

#### Fonte: SPINOSA et al. (2011).

Foram feitas experiências a fim de melhorar a eficiência dos processos relacionados ao gerenciamento sustentável do lodo proposto, permitindo a otimização da recuperação de materiais e/ou energia.

Em relação à digestão anaeróbia, desenvolveram-se novos métodos para o aumento do potencial de geração do biogás com consequente redução na produção de lodo. Os métodos desenvolvidos são: desintegração, condições microaeróbias e hidrólise térmica. Como já discutido anteriormente, esses métodos estão em fase de desenvolvimento e exigem tecnologias que, em escala real, tornam o projeto inviável.

Posteriormente ao processo de digestão anaeróbia, o lodo sofre o desaguamento mecânico de forma a propiciar características necessárias para a secagem térmica. A secagem térmica é realizada para garantir um teor de sólidos mínimo para os processos subsequentes, porém a altos custos de implantação e operação.

O sobrenadante do desaguamento é retornado ao início do tratamento de esgoto. Vale ressaltar que é possível recuperar o fósforo a partir das cinzas geradas no processo de incineração do lodo seco. Os gases liberados de secador são altamente poluentes (compostos orgânicos voláteis), devendo haver um tratamento adequado.

Tanto o processo de desaguamento, como o processo de secagem térmica do lodo tem como objetivo reduzir a quantidade de água suficiente para o tratamento térmico, em que são obtidos materiais úteis e/ou energia recuperada.

#### 3.12.1 Produção de argila expandida

Os processos envolvidos na produção da argila expandida por meio do lodo desaguado pode ser observado na Figura 31.

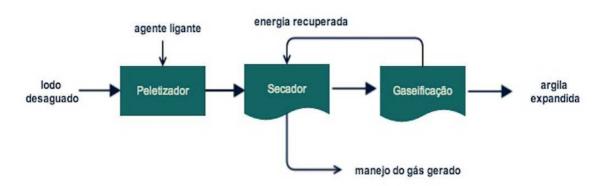


Figura 31 – Gaseificação do lodo e processo de produção de argila expandida.

Fonte: SPINOSA et al. (2011).

Na unidade de peletização, a mistura de lodo desaguado com agentes ligantes (LETAs, silicato de sódio, dentre outros) é comprimida em pellets. Em seguida, a mistura lodo-pellets entra no secador térmico, onde recebem gás quente produzido por energia recuperada do processo de gaseificação. A escolha da secagem térmica se deve a necessidade de se atingir altos valores de teor de sólidos do lodo para que sejam possíveis os processos de gaseificação e pirólise. Dessa forma, espera-se que após da etapa de secagem térmica a umidade dos pellets seja reduzida para 10%.

Durante a gaseificação a uma temperatura de 1.000°C, a matéria orgânica do lodo é completamente gaseificada, enquanto a matéria inorgânica reage com íons de metais pesados. O processo de gaseificação utiliza calor, pressão e vapor para converter sólidos numa síntese de gases chamado de "syngas".

A argila expandida produzida pode ser utilizada como suporte para formação do biofilme, uma vez que possui uma superfície rugosa e porosa, o que facilita a fixação da biomassa. Dessa forma, a argila expandida pode ser utilizada como meio suporte em processos de tratamento de esgoto que utilizam biofilme (SPINOSA *et al.*, 2011) como, por exemplo, os filtros biológicos. Além dessas características, a argila expandida também possui isolação térmica e acústica eficientes e reduzido peso estrutural, sendo possível utilizá-las como material de construção.

#### 3.12.2 Produção de adsorvente

Na Figura 32, pode-se observar os processos envolvidos na produção do adsorvente, utilizando o lodo desaguado.

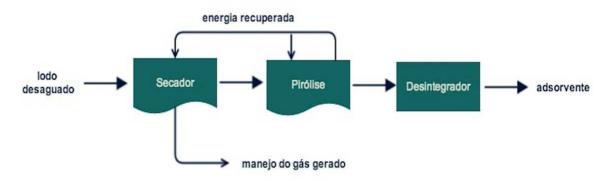


Figura 32 – Pirólise do lodo e processo de produção do adsorvente.

Fonte: SPINOSA et al. (2011).

Na unidade de secagem térmica, a umidade do lodo é reduzida para 10%, e na unidade de pirólise, o lodo seco é transformado em coque e gás combustível, em atmosfera inerte. O coque é desintegrado em partículas de tamanho que podem ser utilizados como adsorventes, enquanto o gás combustível é convertido em energia que é utilizada para secagem e para pirólise.

A superfície do material sólido formado é essencialmente composta por carbono e grupos ativos que contêm inúmeros mesoporos e microporos, que são propriedades física e química similares a do carvão ativado (SPINOSA *et al.*, 2011).

Na China, PAN *et al.* (2011), estudaram as características dos adsorventes produzidos a partitr de lodos biológicos, químicos e híbridos, por ativação química e pirólise do lodo. Dos resultados obtidos, percebe-se que o adsorvente produzido em ETEs, especialmente utilizando

lodos químicos e híbridos, possui excelente capacidade de adsorção das substâncias orgâncias presentes no efluente.

O valor do estudo apresentado está no levantamento de questões importantes como o gerenciamento sustentável do lodo por meio de tecnologias que envolvem as últimas tendências no que tange ao gerenciamento do lodo. Apesar de algumas tecnologias ainda se apresentar em fase de desenvolvimento, deve-se considerar a importância da investigação de novas tendências no gerenciamento sustentável do lodo.

Vale ressaltar que o processo proposto ainda é inviável economicamente, no entanto, na medida em que ações públicas sejam tomadas visando gerenciamento sustentável dos resíduos, poderá ser uma alternativa ou pelo menos uma contribuição para o avanços dos estudos na área de tratamento e gerenciamento de resíduos.

# 4 Caracterização do lodo

## 4.1 Produção de lodo

Segundo os dados coletados no Banco de dados da ETE-Piracicamirim, tem-se a vazão média e a DQO média do esgoto bruto na entrada, considerando-se apenas o mês de maio do ano de 2013 para uma estimativa de produção de lodo gerado no tratamento de efluentes.

A vazão média medida no mês de maio foi de 260 L/s (= 22.464 m $^3$ /dia) e DQO de 445 mg  $O_2$ /L.

Dessa forma, a carga diária do esgoto bruto é de 9.996 kg DQO/dia. Considerando os dados da Tabela 20 pode-se estimar alguns valores de produção de lodo tanto no tanque de aeração como nos reatores UASB.

Tabela 20 - Parâmetros de projeto do sistema de lodos ativados como póstratamento de efluentes de reatores anaeróbios (esgotos domésticos).

Produção de	Produção de lodo aeróbio excedente (retornado ao UASB) (kgSS/kgDQO aplicada ao LA)	0,30 a 0,40
lodo	Produção de lodo aeróbio excedente (retornado ao UASB) (kgSS/kgDBO aplicada ao LA)	0,55 a 0,70
	Produção per capita de lodo aeróbio excedente (retornado ao UASB) (gSS/hab.d)	8 a 14
	Concentração de SS no lodo retornado ao UASB (mg/L)	3000 a 5000
	Eficiência de remoção de SSV do lodo aeróbio no reator UASB	0,20 a 0,30
	Produção de lodo anaeróbio (kgSS/kgDQO aplicada ao UASB)	0,14 a 0,18
	Produção de lodo anaeróbio (kgSS/kgDBO aplicada ao UASB)	0,28 a 0,36
	Produção per capita de lodo anaeróbio (gSS/hab.d)	14 a 18
	Produção de lodo misto total (a ser tratado) (kgSS/kgDQO aplicada ao sistema)	0,20 a 0,30
	Produção de lodo misto total (a ser tratado) (kgSS/kgDBO aplicada ao sistema)	0,40 a 0,60
	Produção per capita de lodo misto total (a ser tratado) (gSS/hab.d)	20 a 30
	Produção volumétrica per capita de lodo misto total (a ser tratado) (L/hab.d)	0,5 a 1,0
	Concentração do lodo misto (aeróbio + anaeróbio) retirado do UASB (%)	3,0 a 4,0

Fonte: (SPERLING et al., 2001)

Considerando uma eficiência de 70% na remoção de matéria orgânica no Reator UASB, um teor de sólidos na saída da centrífuga de 20% e utilizando os dados da Tabela 20, pode-se calcular a produção diária de lodo gerado. Para efeito de verificação, foram feitos cálculos de duas formas: estimando a produção mista de lodo como produção total, e estimando a produção de lodo aeróbia e anaeróbia digeridas no UASB, separadamente.

#### 4.1.1 Produção mista de lodo

A produção média de lodo misto total a ser tratado é de 0,25 kgSS/kgDQO aplicada ao sistema. Dessa forma, a carga de sólidos é:

$$Carga\ de\ s\'olidos = 0,25 \frac{\text{kgSS}}{\text{kgDQO}} \cdot 9.996 \text{ kg} \frac{\text{DQO}}{\text{dia}} = 2.499,12 \text{ kgSS/dia}$$

O lodo retirado do reator UASB já sai digerido e normalmente adensado, requerendo apenas uma etapa de desaguamento. Assumindo-se, por simplicidade, ume eficiência de captura de sólidos de 100% no desaguamento, e uma massa específica de 1,0 (1.000 kg/m³) e teor de sólidos de 20% para o lodo desaguado, tem-se o volume gerado diário:

Volume diário = 
$$\frac{carga}{concentração}$$
 =  $\frac{2.499,12 \frac{\text{kgSS}}{\text{dia}}}{200 \frac{\text{kgSS}}{m^3}}$  = 12,50  $m^3/\text{dia}$ 

#### 4.1.2 Produção de lodo aeróbia e anaeróbia

#### Produção aeróbia

A produção de lodo aeróbio excedente, a ser encaminhado ao reator UASB é calculada considerando um coeficiente de produção de lodo de 0,35 kgSS/kgDQO aplicada ao tanque de aeração. O afluente à etapa de lodos ativados é o efluente do reator UASB, ou seja, a carga de DQO afluente ao tanque de aeração é de:

$$Carga\ DQO_{afluente\ LA} = 9.996\ kg\ DQO/dia \cdot (1 - eficiência) = 2.998,94kg\ DQO/dia$$

Dessa forma, a produção de lodo aeróbio é de:

$$PX = 0.35 \frac{kgSS}{kgDQO} \times 2.998,94 kg \frac{DQO}{dia} = 1.049,63 kgSS/dia$$

A distribuição do lodo excedente, em termos de sólidos voláteis, é função da relação SSV/SS que foi adotada sendo 0,75. Desta forma, a carga de sólidos voláteis é de:

$$PXV = \left(\frac{SSV}{SS}\right) \times PX = 0.75 \times 1.049,63 = 787,22 \text{ kgSSV/dia}$$

A carga de sólidos fixos é dada pela diferença entre a carga de sólidos totais e os sólidos voláteis, ou seja,

$$PXF = PX - PXV = 1.049,63 \frac{kgSS}{dia} - \frac{787,22 kgSSV}{dia} = 262,41 kgSSF/dia$$

Supondo uma remoção de 25% dos SSV do lodo aeróbio no reator UASB e sabendose que a carga de sólidos fixos permanece inalterada, tem-se a seguinte carga de lodo aeróbio, que foi digerida e é retirada do reator UASB:

Sólidos voláteis: PXV = 1.049,63 kgSSV/dia x (1-0,25) = 590,42 kgSSV/d

Sólidos fixos: PXF = 262,41 kgSSF/dia

Sólidos totais: PX = 590,42 + 262,41 = 852,82 kgSS/dia

#### Produção anaeróbia

O lodo a ser retirado do reator UASB inclui também o lodo anaeróbio, usualmente produzido no mesmo. Supondo um coeficiente de produção de lodo anaeróbio de 0,14 kgSS/kgDQO aplicada ao reator UASB, tem-se a seguinte produção de lodo anaeróbio:

PX = (coeficiente de produção de lodo) · (carga de DQO no esgoto bruto)  
= 
$$0.14 \frac{\text{kgSS}}{\text{kgDBO}} \cdot 9.996 \text{ kg} \frac{\text{DQO}}{\text{dia}} = 1.399,51 \text{ kgSS/dia}$$

### Carga de sólidos total

A quantidade total de lodo a ser retirado do reator UASB (lodo anaeróbio + lodo originalmente aeróbio) é:

Para o cálculo do volume diário gerado de lodo, procede-se da mesma forma, considerando-se um teor de sólidos na saída da centrífuga com valor de 20%, ou seja,

$$Volume \ diário = \frac{carga}{concentração} = \frac{2.252,33 \ \frac{\text{kgSS}}{\text{dia}}}{200 \frac{\text{kgSS}}{m^3}} = 11,26 \ m^3/\text{dia}$$

Era esperado que os valores do volume total de lodo gerado calculado considerando a produção de lodo mista ou considerando a produção aeróbia e anaeróbia sejam próximos. No cálculo da produção mista se adota um coeficiente de produção mista de lodo, enquanto que no cálculo da produção aeróbia e anaeróbia de lodo se adotam valores para produção de cada tipo de lodo, assim como a eficiência do reator UASB e a relação SSV/ST no tanque de aeração. Dessa forma, pode-se considerar este cálculo uma estimativa melhor, uma vez que se considera as etapas separadamente.

Portanto, uma estimativa para produção diária de lodo na ETE Piracicamirim é de 11 a 13 m<sup>3</sup>.

#### **4.2** Análise NBR 10.004

A NBR-10.004 (ABNT, 2004) tem como objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potencias ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente.

Segundo a classificação da norma supracitada, os resíduos são classificados em resíduos perigosos (classe I) e não-perigosos (classe II). Os resíduos de classe II são subdivididos em resíduos de classe II A (não inertes) e resíduos de classe II B (inertes). Os resíduos perigosos são aqueles que constam nos anexos A (Resíduos perigosos de fontes não específicas) ou B (Resíduos perigosos de fontes específicas) ou ainda se possuem características de inflamabilidade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade. Caso contrário, o resíduo é considerado não perigoso, sendo aqueles que possuem constituintes que são solubilizados em concentrações superiores ao anexo G (Padrões para o ensaio de solubilização e lixiviação) são considerados não-inertes.

A classificação do lodo gerado na ETE-Piracicamirim foi feita pela empresa Grandis Assessoria e Análises Ambiental Ltda – Limeira/SP. A coleta do lodo foi realizada no dia 26/06/2013 na saída da centrífuga e foram realizados os ensaios de solubilização, lixiviação e de massa bruta.

O Ensaio de Solubilização é utilizado para diferenciar os resíduos de Classes IIA e IIB. O Ensaio de Lixiviação determina o comportamento de uma substância face aos fenômenos físico-químicos que ocorrem durante a percolação, e caracteriza a periculosidade e toxicidade de um resíduo, para efeito de controle dos resíduos perigosos (Classe I). O Ensaio de Massa Bruta é realizado para diferenciar os resíduos das Classes IIA e I.

#### 4.2.1 Resultados

Os resultados obtidos no relatório de análises gerado pela empresa contratada podem ser observados na Tabela 21 quanto ao ensaio de solubilização, na Tabela 22 quanto ao ensaio de lixiviação e na Tabela 23 quanto ao ensaio de massa bruta.

Tabela 21 – Resultados Ensaios de Solubilização.

Parâmetros	Resultados	Unidade	VMP	Data Ensaio	LQ	Incerteza
pН	8,41		***	05/07/2013	1 - 14	0,01
Arsênio*	< LQ	mg/L	0,01	22/07/2013	0,005	NA
Bário	0,419	mg/L	0,7	18/07/2013	0,0002	0,0001
Cádmio	< LQ	mg/L	0,0	18/07/2013	0,0010	0,003
Chumbo*	< LQ	mg/L	0,01	22/07/2013	0,010	NA
Cobre	0,041	mg/L	2,0	18/07/2013	0,0083	0,0021
Cromo	0,041	mg/L	0,1	18/07/2013	0,0022	0,0006
Mercúrio*	< LQ	mg/L	0,001	22/07/2013	0,0010	NA
Selênio*	< LQ	mg/L	0,01	22/07/2013	0,05	NA
Zinco	0,103	mg/L	5,0	18/07/2013	0,0018	0,0005
Cianeto*	0,007	mg/L	0,07	22/07/2013	0,005	NA
Prata*	< LQ	mg/L	0,05	22/07/2013	0,010	NA
Alumínio	0,831	mg/L	0,2	18/07/2013	0,0593	0,0148
Ferro	2,098	mg/L	0,3	18/07/2013	0,0013	0,0003
Manganês	0,906	mg/L	0,1	18/07/2013	0,0398	0,0097
Sódio	4,735	mg/L	200,0	18/07/2013	0,0003	0,0001
Surfactantes	0,018	mg/L	0,5	15/07/2013	1,000	0,0045
Fenóis	< LQ	mg/L	0,0	05/07/2013	0,06	0,00259
Fluoreto	7,400	mg/L	1,5	16/07/2013	0,0471	0,00560
Cloreto	127,980	mg/L	250,0	16/07/2013	0,0416	0,00560
Nitrato	2,420	< LQ	10,0	16/07/2013	0,0446	0,00560
Sulfato	690,750	mg/L	250,0	16/07/2013	0,2593	0,07970

(\*) ensaio subcontratado em laboratório acreditado pela CGCRE

LQ - Limite de quantificação

NA – não aplicável

VMP – Valor máximo permitido

Fonte: Relatório de análise - GRANDIS.

Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos (VMP) pela NBR-10.004 – ANEXO G (ABNT, 2004), pode-se afirmar que, dos parâmetros analisados do Solubilizado, Alumínio, Ferro, Manganês, Fluoreto e Sulfato ultrapassam o limite máximo permitido.

Resultados Unidade **VMP Parâmetros** Data Ensaio LQ Incerteza \*\*\* 05/07/2013 1 - 14 0,01 pН Resultados Unidade VMP Data Ensaio **Parâmetros** LQ Incerteza Arsênio\* < LQ mg/L 1,0 22/07/2013 0,005 NA 0,0001 Bário 0,816 mg/L 70,0 04/07/2013 0,0002 0,0030 Cádmio <LQ 0,5 04/07/2013 0,0010 mg/L Chumbo\* 0,263 mg/L 1,0 22/07/2013 0,010 NA Cromo 0,357 04/07/2013 0,0022 0,0006 mg/L 5,0 Mercúrio\* 0,019 22/07/2013 0,0010 NA mg/L 0,1 Selênio\* < LQ 1,0 22/07/2013 0,05 NA mg/L Prata\* 0,058 mg/L 5,0 22/07/2013 0,010 NA Fluoreto 150,0 16/07/2013 0,0471 0,00560 < LQ mg/L

Tabela 22 – Resultados Ensaios de Lixiviação.

(\*) ensaio subcontratado em laboratório acreditado pela CGCRE.

Fonte: Relatório de análise - GRANDIS.

Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos (VMP) pela NBR-10.004 – ANEXO F (ABNT, 2004), pode-se afirmar que, dos parâmetros analisados do Lixiviado, todos satisfazem os limites máximos permitidos.

Parâmetros	Resultados	Unidade	VMP	Data Ensaio	LQ	Incerteza
pH (1:1)	8,01	-	2,0 à 12,5	26/06/2013	1 - 14	0,01
Sulfeto (como H2S)	10.041,00	mg/L	500 (c)	23/07/2013	3,00	0,02740
Porcentagem de Sólidos	57,25	mg/kg	***	25/06/2013	2,50	0,05473
Líquidos Livres	Presentes	-	***	18/07/2013	NA	NA
Óeos e Graxas	4,09	%p/p	***	18/07/2013	0,1	0,10165
Cianeto (como HCN)*	<lq< td=""><td>mg/L</td><td>250 (c)</td><td>22/07/2013</td><td>0,6</td><td>NA</td></lq<>	mg/L	250 (c)	22/07/2013	0,6	NA

Tabela 23 – Resultados Ensaios de Massa Bruta.

Fonte: Relatório de análise - GRANDIS.

Comparando-se os resultados obtidos com os Valores Máximos Permitidos (VMP) pela NBR-10.004 (ABNT, 2004), pode-se afirmar que, dos parâmetros analisados da Massa Bruta, apenas o Sulfeto ultrapassa o limite máximo permitido. Os resíduos com concentrações superiores ao previsto

Em função dos resultados obtidos, a amostra de resíduo sólido é classificada como Classe I – Resíduo Perigoso.

No entanto, vale ressaltar que os valores limites adotados na NBR-10.004 (ABNT, 2004) são, na sua maioria, os mesmos valores da Portaria 2914 (BRASIL, 2011) que trata dos

<sup>(\*)</sup> ensaio subcontratado em laboratório acreditado pela CGCRE.

<sup>(</sup>c) – Avaliação de reatividade – item "c" do tópico 4.2.1.3 da NBR 10004:2004.

padrões de potabilidade. Esses valores podem ser observados na Tabela 24, tornando-se evidente a adoção dos mesmos valores tanto na classificação de resíduos sólidos como no padrão de potabilidade.

Tabela 24 – Comparação dos parâmetros de potabilidade e da NBR 10.004.

Parâmetros	NBR 10.004 (2004)	BR 10.004 (2004) Portaria 2914 (2011)	
Arsênio	0.01	0.01	mg/L
Bário	0.7	0.7	mg/L
Cádmio	0.0	0.05	mg/L
Chumbo	0.01	0.01	mg/L
Cobre	2.0	0.07	mg/L
Cromo	0.1	0.05	mg/L
Mercúrio	0.001	0.001	mg/L
Selênio	0.01	0.01	mg/L
Zinco	5.0	5.0	mg/L
Cianeto	0.07	0.07	mg/L
Prata	0.05	-	mg/L
Alumínio	0.2	0.2	mg/L
Ferro	0.3	0.3	mg/L
Manganês	0.1	0.1	mg/L
Sódio	200.0	200.0	mg/L
Surfactantes	0.5	0.5	mg/L
Fenóis	0.0	-	mg/L
Fluoreto	1.5	1.5	mg/L
Cloreto	250.0	15	mg/L
Nitrato	10.0	10.0	< LQ
Sulfato	250.0	250.0	mg/L

Fonte: NBR-10.004 (ABNT, 2004) e Portaria 2914 (BRASIL, 2011).

Pode-se observar que todos os parâmetros que ultrapassaram o VMP no ensaio de solubilização possuem a mesma restrição apontada pelo padrão de potabilidade. Dessa forma, questiona-se a necessidade de restrições tão rigorosas na classificação de um resíduo, uma vez que pode impedir sua utilização por imposições não coerentes com as possíveis destinações finais.

Destaca-se a concentração recomendada para o ferro, uma vez que concentrações de até 2,4 mg/L são toleradas pela Portaria 2914 (BRASIL, 2011), caso o ferro esteja complexado com produto químico comprovadamente de baixo risco e os VMPs dos demais parâmetros do padrão de potabilidade não sejam violados.

Portanto, percebe-se uma falta de racionalidade nos valores adotados pela NBR-10.004 (ABNT, 2004), pois são tão restritivos (no caso do ferro até mais restritivos, dependendo das condições) quanto os padrões de potabilidade, devendo ser realizada uma revisão da norma em questão.

#### 5 Resultado

Realizou-se uma estimativa da produção de lodo proveniente dos reatores UASB da ETE-Piracicamirim utilizando alguns dados de operação da ETE e, complementando, com outros dados pesquisados na literatura. Vale destacar que esses dados coletados na literatura são relativos, especificamente, ao processo de lodos ativados como pós-tratamento de reator UASB.

Da estimativa realizada, obteve-se como resultado uma produção diária de lodo na ETE-Piracicamirim com volume em torno de 12 m³. Na prática, a produção diária de lodo é praticamente a metade do valor encontrado na estimativa realizada. Essa diferença doa valores confrontados pode ser explicada pela falta de eficiência no processo tanto no tanque de aeração como no reator UASB, ou ainda, por descarte de lodo juntamente com o efluente dos decantadores secundários que tem como destino final o Ribeirão-Piracicamirim, ou ainda, sedimentação de lodo no tanque de aeração, problema que ocorria no passado e que, para sanar, foram instalados aeradores por ar difuso em complementação ao superficial.

Na caracterização do lodo, obteve-se o levantamento dos parâmetros, porém apenas aqueles referentes a classificação do resíduo de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004). Na análise dos parâmetros do solubilizado no ensaio de solubilização, Alumínio, Ferro, Manganês, Fluoreto e Sulfato ultrapassaram o limite máximo permitido e no ensaio de massa bruta apenas o Sulfeto ultrapassou o limite máximo permitido. Dessa forma, a amostra foi classificada como resíduo Classe I – Perigoso.

A partir da revisão da literatura, levantaram-se as características dos principais métodos de desaguamento dentre leitos de secagem, lagos de secagem de lodo, filtro prensa de esteira, filtro prensa de placas, centrifugação, prensa parafuso, incineração, pirólise, *bags* de geotêxtil e secagem térmica. Quanto aos métodos de desinfecção, destacam-se a caleação, compostagem, vermicompostagem, oxidação úmida e adição de ácidos orgânicos.

Vale ressaltar que a escolha do método depende da alternativa de disposição final adotada, devendo sempre que possível integrar os processos de tratamento e disposição final de modo a gerenciar o lodo produzido de forma mais sustentável.

Dentre as possibilidades para disposição final sustentável estão o uso do lodo em plantações florestais, na recuperação de áreas degradadas, na produção de substrato vegetal, na cobertura diária e final de aterros sanitários, na agricultura, na construção civil e na produção de biodiesel.

Das alternativas de disposição final estudadas, destaca-se a utilização do lodo na agricultura. Para tal, é necessário a análise dos parâmetros constantes no Apêndice A que trata da caracterização do lodo para análise da possibilidade de uso agrícola. Esses parâmetros contemplam desde o potencial agronômico do lodo quanto a presença de patógenos, metais pesados e substâncias orgânicas poluentes.

Para utilização do lodo em solos agrícolas, deve-se realizar algum processo efetivo de redução de patógenos e vetores. Dessa forma, é primordial que seja feita a montagem de leiras de compostagem com misturas entre o lodo de esgoto desaguado e o agente estruturante (podas de árvore e capina, resíduos do saneamento, dentre outros) para o acompanhamento das fases de decomposição e estabilização dos produtos com análise em função de suas características, baseando-se nas legislações apresentadas.

#### 6 Discussão

Na Figura 33, pode-se observar os principais produtos gerados no tratamento de efluentes nas ETEs sob uma visão mais geral e simplificada, focando-se na questão da geração de resíduos sólidos, líquidos e gasosos.

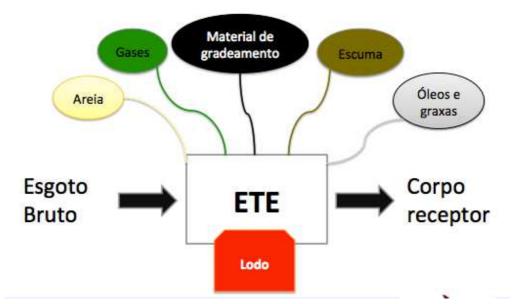


Figura 33 – Principais produtos gerados nos tratamento de efluentes.

Dentre os resíduos gerados, o de maior importância é o lodo, uma vez que é produzido em maior quantidade e devido a sua composição necessita de tratamento adequado para uma disposição final sustentável.

Com base na revisão da literatura, fica evidente a importância da concepção de tratamento da fase líquida no gerenciamento do lodo, já que a escolha do tipo de tratamento e as tecnologias empregadas nas Estações de Tratamento de Esgoto interferem diretamente nas características e na produção do lodo.

Devido ao alto custo com o tratamento e disposição final do lodo, recomenda-se a opção pelo tratamento anaeróbio, uma vez que a quantidade de lodo gerada é significativamente menor se comparada aos tratamentos aeróbios e ainda o lodo produzido possui um maior grau de estabilização e melhores características para o desaguamento.

Como, muitas vezes, a utilização somente via anaeróbia não é suficiente para remoção de matéria orgânica, tem-se utilizado algum processo aeróbio como pós-tratamento de efluentes anaeróbios como no caso da ETE-Piracicamirim.

É de suma importância o estabelecimento de um gerenciamento sustentável do lodo por meio do aproveitamento energético do lodo e também dos seus materiais constituintes que podem gerar subprodutos com alguma utilidade.

O uso do lodo na agricultura é método de disposição final do lodo que se encaixa perfeitamente no cenário brasileiro de clima tropical e extensas áreas. Com base nos estudos sobre o assunto, percebe-se que a aplicação do lodo como corretivo de solo é realizada ainda em escala experimental e regida por uma legislação que contempla de forma superficial e desatualizada os requisitos para a prática.

Além do lodo, outro resíduo sólido de grande importância gerado nos tratamentos de efluentes é a areia oriunda da caixa de areia ou desarenador, que também deve receber tratamento adequado e disposição final sustentável. Vale ressaltar que não há aproveitamento da areia retirada na caixa de areia, sendo que poderia ser higienizada e utilizada na construção civil como, por exemplo, guias, sarjetas e bancos públicos.

Num estudo de avaliação da higienização do resíduo gerado na caixa de areia de ETEs, YAMANE (2007) concluiu que a caleagem de resíduos de caixa de areia nas condições do estudo desenvolvido a partir da concentração de 10% foi considerada eficiente na remoção de bactérias e ovos de helmintos após uma semana de tratamento resultando num material higienizado podendo ser utilizado na construção civil em substituição às areias convencionais.

Na prática, porém, as restrições ambientais à utilização de várzeas e leitos de rios para extração de areia criam sérios problemas para as lavras em operação. Em consequência, novas áreas de extração estão cada vez mais distantes dos locais de consumo, encarecendo o preço final dos produtos. A Região Metropolitana de São Paulo, por exemplo, "importa" grande parte da areia consumida, sendo que boa parte de locais que ficam a mais de 100 km, o que encarece o produto e onera o consumidor, inclusive o poder público (QUARESMA, 2009).

Além disso, vale ressaltar que as mineradoras de areia são duramente penalizadas pela sociedade e órgãos ambientais e, em paralelo, o setor de saneamento destina grandes volumes de areia aos aterros sanitários onde não possuem utilização alguma.

Na classificação do lodo segundo a NBR-10.004 (ABNT, 2004), percebeu-se a necessidade da revisão da norma em relação aos limites impostos na determinação dos parâmetros que, na sua maioria, são os mesmos limites do padrão de potabilidade apresentado na Portaria 2914 (BRASIL, 2011). Dessa forma, questiona-se a necessidade de parâmetros tão restritivos que podem diminuir as possibilidades do uso benéfico de alguns resíduos sólidos como o lodo de esgoto.

A preocupação quanto a ausência de gerenciamento sustentável do lodo nas ETEs brasileiras faz parte do cenário atual, sendo composto por tratamentos aeróbios que geram enormes quantidades de lodo, disposição final do lodo não sustentável e ausência de tratamentos (adensamento, desaguamento e desinfecção) adequados.

No momento que houver uma conscientização generalizada e todo o esgoto produzido for tratado, o volume de lodo gerado será tão grande que várias alternativas de disposição final precisarão ser usadas concomitantemente. Nesse contexto, uma proposta interessante é a de adquirir experiência na utilização do lodo nos seguintes casos:

- Coberturas diárias e final de aterro;
- Plantações florestais;
- Áreas degradadas;
- Substrato vegetal;
- Agricultura.

Essas aplicações são todas relacionadas ao uso no solo e estão apresentadas em ordem crescente de complexidade de aplicação. A complexidade, nesse caso, é medida considerando-se as restrições ambientais para a utilização do lodo, a quantidade de estudos e experimentos existentes sobre a aplicação do lodo.

O objetivo é adquirir, progressivamente, conhecimento prático o suficiente para aplicação do lodo na agricultura, podendo-se utilizar esse resíduo do saneamento em culturas agrícolas da região geradora do lodo, ou ainda, estocá-lo ou comercializá-lo.

O ciclo de aplicações do lodo no solo se inicia em plantações florestais que são exclusivas para produção de madeira, em seguida propõe-se a aplicação do lodo como condicionador de solos em áreas degradadas. Num próximo passo, aplica-se o lodo como substrato vegetal para produção de mudas e, por fim, utiliza-se o lodo como fertilizante agrícola com possibilidade de estocagem e comercialização do produto.

Essas cinco alternativas sustentáveis de disposição final do lodo, ao fim do ciclo de aplicações do lodo no solo, poderão ser utilizadas concomitantemente de acordo com a necessidade do gerador, das oportunidades da região e das características do lodo.

## 7 Conclusões e recomendações

- No Brasil, a grande quantidade de ETEs tratando seus efluentes via aeróbia aliado a disposição dos resíduos sólidos em aterros sanitários mostra que, ainda hoje, não está clara a importância da inclusão do gerenciamento do lodo na concepção do tratamento da fase líquida.
- O tratamento anaeróbio é de extrema importância na questão da geração de lodo, uma vez que a produção é significativamente reduzida (5 a 10 vezes menor) comparado aos processos aeróbios convencionais e o produto se apresenta em melhores condições de adensamento e estabilização (consumindo menores quantidades de produtos químicos), além de sair adensado do reator UASB.
- No contexto de disposição sustentável de resíduos sólidos, é imprescindível a questão do tratamento e utilização da areia que é um elemento fundamental no setor da construção civil.
- Recomenda-se a revisão da norma NBR 10.004 (ABNT, 2004) que possui muitos parâmetros tão restritivos quanto aos do padrão de potabilidade brasileiro, apresentados na Portaria 2914 (BRASIL, 2011).
- Recomenda-se o reaproveitamento da areia atualmente descartada em aterros sanitários por meio da lavagem e desinfecção para posterior utilização na construção civil sem função estrutural.
- Recomenda-se o estudo da possibilidade do reaproveitamento do biogás. Pode-se
  adotar algum dos métodos apresentados para melhoria na performance da digestão
  anaeróbia, gerando biogás em maior quantidade e qualidade de modo que possa ser
  reaproveitado energeticamente em outros processos como, por exemplo no
  desaguamento ou desinfecção do lodo.
- Recomenda-se a análise do lodo para o uso agrícola por meio da caracterização completa juntamente com montagem de leiras de compostagem com altura de pelo menos 1,5 m por um tempo de aproximadamente 120 dias com medições diárias de temperatura e umidade.
- Recomenda-se a presença de uma agrônomo na análise dos resultados do material obtido das leiras de compostagem e também para determinação dos solos mais indicados, da taxa de aplicação e da cultura a ser escolhida.

- Recomenda-se uma sequência para utilização do lodo no solo. Para isso há
  necessidade de adquirir experiência no gerenciamento sustentável do lodo, iniciando
  as atividades que envolvem disposição menos restritivas:
  - o Recomposição diária e final de aterros
  - o Plantações florestais
  - o Áreas degradadas
  - o Substrato vegetal
  - o Fertilizante
- Recomenda-se, por fim, uma análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental do tratamento e disposição final do lodo gerado com resultados que tragam benefícios em todas as áreas do sistema de tratamento da ETE-Piracicamirim.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASSI, B.; DULLSTEIN, S.; RÄBIGER, N. Minimization of excess sludge production by increase of oxygen concentration in activated sludge flocs; experimental and theoretical approach. [S.l.]: Elsevier Science, v. 34, 2000. 139-146 p.

ABNT. ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004 Resíduos Sólidos - Classificação**. 2. ed. [S.l.]: [s.n.], 2004. p. 71.

ALBUQUERQUE, J. D. S. Redução da produção de lodo biológico no processo de lodo ativado por ozonização. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008. 134 p.

AMUDA, OMOTAYO S.; DENG, AN; ALADE, ABASS O.; HUNG, YUNG-TSE. Conversion of Sewage Sludge to Biosolids. In: WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y. T. **Biossolids Engineering and Management**. [S.l.]: Humana Press, v. 7, 2008. p. 261-272.

ANDREOLI, C.V.; PEDROZA, E.C.; MOREIRA, E.A.; CAVALCANTI, P.F.; SOBRINHO, P.A.; HAANDEL, A. Aplicação de leitos para Secagem de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Esgoto. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduo de Saneamento**. Projeto PROSAB. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417.

ANDREOLI, C.V.; PEGORINI, E.S.; TAMANINI, C.R.; HOLSCACH, B; NEVES, P.S.. Uso de Lodo de Esgoto na Produção de Substrato Vegetal. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduo de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.

ANDREOLI, C. V. F. M.; FERREIRA, A. C.; CHERUBINI, C. AVALIAÇÃO DA BIODEGRADABILIDADE E BIODISPONIBILIDADE DO LODO DE ESGOTO ANAERÓBIO TERMICAMENTE TRATADO COM USO DE BIOGÁS. **220 Congresso Basileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Joinvile, v. II, n. 107, p. 17, set 2003.

ANDREOLI, C. V.; PEGORINI, E. S. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduo de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.

ANDREOLI, T. H.; PEGORINI; NEVES. Uso de Lodo de esgoto na Produção de Substrato Vegetal. In: ABDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso dos Resíduos de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417.

AYOL, A. Enzymatic treatment effects on dewaterability of anaerobically digested biosolids-I: performance evaluations. **Process Biochemistry**, Izmir, v. 40, p. 2427–2434, 2005.

BARJENBRUCH, M.; KOPPLOW, O. Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge. **Advances in Environmental Research**, Rostock, p. 715-720, 2003.

Barros, Ivaldete T.; Andreoli, Cleverson V.; Junior, Ivan G. de Souza; Costa, Antonio C. S. da. Avaliação agronômica de biossólidos tratados por diferentes métodos químicos para aplicação na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 630-638, 2011.

BASHA, S. A.; GOPAL, K. R.; JEBARAJ, S. A review on biodiesel production, combustion, emissions and performance. **Renew**, 2009.

BASSO, C. A. Caracterização química de compostos de lixo urbano de usinas de compostagem dos municípios de São Paulo e de São José dos Campos. Piracicaba: Centro de Energia Nuclear na Agricultura, 2004. 104 p.

BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. D. A disposição de Lodo de Esgoto em Solo Agrícola. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. D. **Lodo de esgoto:** impactos ambientais na agricultura. Jaguariuná: Embrapa Meio ambiente, 2006. p. 349.

Bezerra, Flávio Barbosa; Oliveira, Maria Alice Cruz Lopes de; Perez, Daniel Vidal; Andrade, Aluísio Granato de; Meneguelli, Neli do Amaral. **Lodo de esgoto em revegetação de áreas degradadas**. Brasília: EMBRAPA, v. 41, 2006. 469-476 p.

BIOCICLO - USO AGRÍCOLA. **Consórcio PCJ**, 2011. Disponivel em: <a href="http://www.agua.org.br/apresentacoes/59114\_Agricola\_2.pdf">http://www.agua.org.br/apresentacoes/59114\_Agricola\_2.pdf</a>>.

Bossche, H. Vanden; Audic, J.M.; Huyard, A.; Gascuel-Odoux, C.; Trolard, F.; Bourrié, G.. Phosphorus losses from sewage sludge disposed on a field: evidence from storm event simulations. **Water Science & Technology**, v. 42, n. 9, p. 179-186, 2000.

BOUGRIER, C.; DELGENES, J. P.; CARRERE, H. 1. Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quantity and improve biogas yield. **Water**, n. 84, p. 280-284, 2006.

BRASIL. **DECRETO No 4.954, DE 14 DE JANEIRO DE 2004**. [S.l.]: Diário Oficial da União, 2004. 57 p.

BRASIL. **DECRETO No 8.059, DE 26 DE JULHO DE 2013**. [S.l.]: Diário Oficial da União, 2013. 20 p.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA No 10, DE 6 DE MAIO DE 2004**. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004. 25 p.

BRASIL. INSTRUÇÃO NORMATIVA No 14, DE 15 DE DEZEMBRO DE 2004. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004.

BRASIL. **INSTRUÇÃO NORMATIVA No 20, DE 2 DE JUNHO DE 2009**. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. 2 p.

BRASIL. INSTRUÇÃO NORMATIVA No 23, DE 31 DE AGOSTO DE 2005. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2005.

BRASIL. INSTRUÇÃO NORMATIVA No 25, DE 23 DE JULHO DE 2009. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009. 18 p.

BRASIL. INSTRUÇÃO NORMATIVA No 35, DE 4 DE JULHO DE 2006. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. 0 p.

BRASIL. INSTRUÇÃO NORMATIVA No 37, DE 11 DE DEZEMBRO DE 2012. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012. 1 p.

BRASIL. **LEI No 6.894, DE 16 DE DEZEMBRO DE 1980**. [S.l.]: Diário Oficial da União, 1980. 2 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **MAPA**, 2013. Disponivel em: <a href="http://www.agricultura.gov.br/ministerio">http://www.agricultura.gov.br/ministerio</a>. Acesso em: 15 ago. 2013.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011**. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, 2011. 39-46 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução CONAMA 375**, 29 ago. 2006. Disponivel em: <a href="https://www.mma.conama.gov.br/conama">www.mma.conama.gov.br/conama</a>. Acesso em: 23 abr. 2013.

BRASIL. **NSTRUÇÃO NORMATIVA No 27, DE 5 DE JUNHO DE 2006**. [S.l.]: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. 4 p.

BÜTTENBENDER, S. E. Avaliação da compostagem da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos provenientes da coleta seletiva realizada no município de Angelina/SC. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004. 123 p.

Carrère, H.; Dumas, C.; Battimelli, A.; Batstone, D.J.; Delgenès, J.P.; Steyer, J.P.; Ferrer, I. Pretreatment methods to improve sludge anaerobic degradability: A review. **Journal of Hazardous Materials**, p. 1-15, 2010.

Cassini, S.T.; Chernicharo, C.A.L.; Andreoli, V.A.; França, M.; BORGES, E.S.M.; Gonçalves, R.F. Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás. In: CASSINI, S. T. **Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Lodos**. Rio de Janeiro: ABES, 2003.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Norma Técnica P4.230**, 1999. Disponivel em: <a href="http://www.cetesb.sp.gov.br">http://www.cetesb.sp.gov.br</a>. Acesso em: 12 maio 2013.

Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos; Haandel, Adrianus C. van; Foresti, Eugenio; Cybis, Luiz Fernando. Introdução. In: CHERNICHARO, C. A. D. L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios:** aspectos metodológicos. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. Projeto PROSAB.

Chernicharo, Carlos Augusto de Lemos; Haandel, Adrianus Van; Aisse, Miguel Mansur; Cavalcanti, Paula Frassinetti Feitosa. Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo. In: CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 464. Projeto PROSAB.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Volume 5:** Reatores Anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2007. 245 p.

CHUDOBA, P.; CHUDOBA, J.; CAPDEVILLE, B. The Aspect of Energetic Uncoupling of Microbial Growth in the Activated Sludge Process - OSA System. **Water Science & Technology**, Toulouse, v. 26, n. 9-11, p. 2477-2480, 1992.

CORREA, R.; FONSECA, Y. &. C. A. Produção de biossólido agrícola por meio da compostagem e vermicompostagem de lodo de esgoto. [S.l.]: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 11, 2007. p. 420-426.

DE JULIO, M.; PRIMO, M. ANÁLISE DA VIABILIDADE DE COMPOSTAGEM DOS RESÍDUOS SÓLIDOS PROVENIENTES DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM INDÚSTRIA DE ALIMENTOS. **OLAM - Ciência & Tecnologia**, Rio Claro, 9, n. 2, 2009. 187-209.

DINIS, M. A. P. Co-composting: A Brief Review. **Revista de Faculdade de Ciência e Tecnologia**, v. 7, p. 20-30, 2010.

FEDRIZZI, F. APROVEITAMENTO DE LODO DE ESGOTO NA PRODUÇÃO DE ARTEFATOS DE CONCRETO – Tubo de Concreto de Seção Circular. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.

FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. D. MANUAL PRÁTICO PARA A COMPOSTAGEM DE BIOSSÓLIDOS. [S.l.]: UEL, 1999. Projeto PROSAB.

Foresti, Eugenio; Florêncio, Lourdinha; Haandel, Adrianus; Zaiat, Marcelo; Cavalcanto, Paula. Fundamento do Tratamento Anaeróbio. In: CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 464. Projeto PROSAB.

FORNARI, E. Manual Prático de Agroecologia. São Paulo: Aquariana, 2002.

FRANCESCHET, M. E. A. Estudo dos solos utilizados para a impermeabilização da camada de base e de cobertura de aterros sanitários de Santa Catarina. Congresso Brasileiro de engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande: ABES. 2005. p. 1-6.

- GEORGE, M. S. Concrete aggregate from wastewater sludge. [S.l.]: Concrete international design & construction, v. 8, 1986. 27-30 p.
- GONÇALVES, F. G.; JORDÃO, E. P.; SOBRINHO, P. A. Introdução. In: GONÇALVES, R. F. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. p. 438. Projeto PROSAB.
- GRANDIN, S. R. **Desidratação de lodos produzidos nas estações de tratamento de água**. São Paulo: Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992.
- HALL, J. Technology and innovative options related to sludge management. In: HALL, J. **Ecological and economical balance for sludge management options**. [S.l.]: [s.n.], 2000.
- HASSAN, H. F. "Recycling of municipal solid incinerator ash in hot-mix asphalt concrete". [S.l.]: [s.n.], 2005. 91-98 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB)**, 2008. Disponivel em:
- <a href="http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB\_2008.p">http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB\_2008.p</a> df>. Acesso em: 24 jul. 2013.
- ILHENFELD, R. G. H.; PEGORINI, E. S. &. A. C. V. Fatores Limitantes. In: ANDREOLI, C. V. Uso e Manejo do Lodo de Esgoto na Agricultura. Curitiba: SANEPAR/PROSAB, 1999. p. 98. Projeto PROSAB.
- Ingunza, Maria del Pilar Durante; Andreoli, Cleverson V.; Nascimento, Rubens Marinbondo do; Tinoco, Juliana Delgado; Hoppen, Cinthya; Pegorini, Eduardo Sabino. Uso de Resíduos do Saneamento na Fabricação da Cerâmica Vermelha. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduo de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417.
- Jordán, M.M.; Almendro-Candel, M.B.; Romero, M.; Rincón, J.Ma.. Application of sewage sludge in the manufacturing of ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**, 30, n. 3-4, November 2005. 219-224.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgoto domésticos**. 6<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: ABES Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011. 969 p.
- Junior, D.R.P; Moraes, L.M.; Chernicharo, C.A.L.; Pontes, P.P.; Cassini, S.T.; Gonçalves, R.F.; Filho, P.B.; Soares, H.M.. Estabilização Anaeróbia de Lodos. In: CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. p. 210. Projeto PROSAB.
- JUNIOR, P.; RODRIGUEZ, D. Estabilização de lodos de esgoto utilizando reatores anaeróbios sequenciais (Sistema RAS). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 2005. Disponivel em: <a href="http://www.rbciamb.com.br/images/online/01\_artigo\_5\_artigos143.pdf">http://www.rbciamb.com.br/images/online/01\_artigo\_5\_artigos143.pdf</a>. Acesso em: 22 jul. 2013.

KHURSHEED, A.; KAZMI, A. A. Retrospective of ecological approaches to excess sludge reduction. **Water research**, v. 45, p. 4287-4310, 2011.

KIEHL, E. J. Fertilizantes Orgânicos. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492 p.

KOCSSI, M. A.; MARIA, I. C. D.; DECHEN, S. C. F. AGREGAÇÃO DO SOLO EM ÁREA QUE RECEBEU LODO DE ESGOTO. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 2, p. 291-298, 2007.

KWON, E. E.; YI, H.; KWON, H. H. Urban energy mining from sewage sludge. **Chemosphere**, v. 90, p. 1508-1513, 2013.

LOURENÇO, R. S. Comunicado técnico: Utilização de lodo de esgoto aeróbico e calado em florestas, 1997. Disponivel em:

<a href="http://www.cnpf.embrapa.br/publica/comuntec/edicoes/com\_tec18.pdf">http://www.cnpf.embrapa.br/publica/comuntec/edicoes/com\_tec18.pdf</a>>. Acesso em: 31 jul. 2013.

LUDUVICE, M. Experiência da companhia de saneamento deo distrito federal na reciclagem agrícola de biossólido. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impacto Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 153-162.

LUDUVICE, M.; FERNANDES, F. Principais tipos de transformação e descarte do lodo. In: ANDREOLI, C. V. E. A. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias/ Vol.6 - Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. p. 399-423.

MÃDER NETTO, O. S. D. E. A. Estudo das variações de pH no lodo caleado em função de diferentes dosagnes de óxido de cálcio e teores de umidade. **Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitéria e Ambiental**, 2003. Disponivel em:

<a href="http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/dlv.pdf">http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes22/dlv.pdf</a>>. Acesso em: 31 jul. 2013.

MATILAINEN, A.; SILLANPÄÄ, M. Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes. **Chemosphere**, v. 80, n. 4, p. 351–365, june 2010.

MC BEAN, W. A.; ROVERS, F. A.; FARQUHAR, G. J. Solid Waste Landfill Engineering and Design. Upper Saddle River: Prentice Hall, Inc., 1995. 521 p.

MEHRDADI, N.; MOHAMMADI, A. R.; TORABIAN, A. eduction of Excess Sludge Using Different Methods in SBR Process for Biological Wastewater Treatment (Emphasizing on Ultrasonic Usage). **Journal of Environmental Studies**, v. 38, n. 61, p. 16-18, 2012.

METCALF & EDDY, INC. **Wastewater engineering:** treatment, disposal and reuse. 3rd. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Book Co, 1991.

MIKI, M. K.; SOBRINHO, A. S.; HAANDEL, A. C. V. Tratamento de Fase Sólida em Estações de Tratamento de Esgotos – Condicionamento, Desaguamento Mecanizado e Secagem Térmica do Lodo. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso dos Resíduos de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.

Moraes; Marciano; MacCoy, Dick &; Harrison, Logan &; Epstein. In: CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgoto sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 464. Projeto PROSAB.

MORALES, G.; AGOPYAN, V. Caracterização do agregado leve a partir de lodo da cidade de Londrina. São Paulo: EPUSP, 1992. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, BT/PCC/64.

NGUYEN, N. C.; CHEN, S.-S.; YANG, H.-Y. **Application of forward osmosis on dewatering of high nutrient sludge**. [S.l.]: Bioresource Technology, v. 132, 2013. 224-229 p.

NOVAK, J. T.; PARK, C. Chemical conditioning of sludge. [S.l.]: Water Science & Technology, v. 49, 2004. 73-80 p.

NOVAK, J. T.; SADLER, M. E.; MURTHY, S. N. 56. Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning and dewatering of biosolids. **Wat. Reesearch**, v. 37, p. 3136-3144, 2003.

OLIVEIRA, E. M. S.; MACHADO, S. Q.; HOLANDA, J. N. F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. [S.l.]: Revista Cerâmica, 2004.

ONAKA, T. **Sewage can make Portland cement:** a new technology for unimate reuse os sewage sludge. [S.l.]: Water science & technology, v. 41, 2000. 93-98 p.

Pan, Zhi-hui; Tian, Jia-yu; Xu, Guo-ren; Li, Jun-jing; Li, Gui-bai. Characteristics of adsorbents made from biological, chemical and hybrid sludges and their effect on organics removal in wastewater treatment. **Water Research**, v. 45, p. 819-827, 2011.

Pedroza, Eduardo da Cunha Lima; Moreira, Eudes Alves; Cavalcanti, Paula F.F.; Sobrinho, Pedro Além; Andreoli, Cleverson V.; Haandel, Adrianus van. Aplicação de Leitos para Secagem de Lodo Gerado em Estações de Tratamento de Esgotos. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de resíduos do saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.

Pedroza, M.M.; Vieira, G.E.G.; Sousa, J.F.; Pickler, A.C.; Leal, E.R.M.; Milhomen, C.C.. **Produção e tratamento de lodo de esgoto - uma revisão**. Novo Hamburgo: Revista Liberato, v. 11, 2010.

PEETERS, B.

**EFFECT OF ACTIVATED SLUDGE COMPOSITION ON ITS DEWATERABILITY AND STICKY PHASE** . Leuven: Katholieke Universiteit Leuven, 2011.

PHILIPPI JR, A.; MALHEIROS, T. F. Saneamento e saúde pública: integrando homem e meio ambiente. In: PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente:** fundamento para um desenvolvimento sustentável. Barueri: Manole, 2005.

- PHOTHILANGKA, P. SLUDGE DISINTEGRATION TECHNOLOGIES FOR IMPROVED BIOGAS YIELD. Innsbruck: Innsbruck University, 2008. 240 p.
- POGGIANI, F.; GUEDES, M. C.; BENEDETTI, V. Aplicabilidade de biossólido em plantações florestais: 1- reflexo no ciclo dos nutrientes. In: BETTIOL, W.; CAMARGO, O. A. **Impcato Ambiental do Uso Agrícola do Lodo de Esgoto**. Jaguariúna: EMBRAPA Meio Ambiente, 2000. p. 163-178.
- POGGIANI, F.; SILVA, P. H.; GUEDES, M. C. Uso de Lodo de Esgoto em Plantações Florestais. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduo de Saneamento**. Rio de Janerio: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.
- PRIM, E. C. C. Utilização de lodo de estações de tratamento de água e esgoto sanitário como material de aterro sanitário. Florianópolis: Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2011.
- QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants:** Planning, Design and OPeration. 2nd. ed. [S.l.]: Technomic Publishing Company, Inc., 1999.
- QUARESMA, L. F. **Perfil de areia par processo construção civil**. [S.l.]: J Mendo Consultoria , 2009.
- Raij, B. van; Cantarella, H.; Quaggio, J. A.; Furlani, A. M. C.. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.** Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 1996. 285 p. (IAC. Boletim Técnico, 100).
- REICHERT, G. A. (Manual) Projeto, OPeração e Monitoramento de Aterros Sanitários. [S.l.]: [s.n.], 2007. 109 p.
- RICHARD, M.; HAO, O.; JENKINS, D. Growth kinetics of Sphaerotilus species and their significance in activated sludge bulking. **Water Pollution Control Federation**, v. 57, n. 1, 1985.
- RIZZO, R. P.; LOLLO, J. A. Capacidade de retenção de barreiras de proteção produzidas com solo arenoso estabilizado quimicamente. **Revista Engenharia sanitária e ambiental**, v. 2, p. 250-259, 2006.
- RODELLA, A. A. **Métodos de avaliação de materiais orgânicos e efeitos de sua incorporação ao solo sobre a mobilização de macronutrientes**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultra "Luiz de Queiroz", 1996.
- RONQUIM, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2010. 26 p.
- SANTOS, A. D. Estudo das possibilidades de reciclagem dos resíduos de tratamento de esgoto de região metropolitana de São Paulo. São Paulo: USP, 2003.

Skorupa, L.A.; Souza, M.D.; Pires, A.M.; Filizola, H.F.; Bettiol, W.; Guini, R. Ligo, M.A.. Uso de Lodo de Esgoto na Recuperação de Áreas Degradadas. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.

SOBRINHO, P. A.; JORDÃO, E. P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios - Uma análise crítica. In: CHERNICHARO, C. A. D. L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbio:** aspectos metodológicos. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. p. 118. Projeto PROSAB.

Sperling, Marcos von; Haandel, Adrianus C. van; Jordão, Eduardo Pacheco; Campos, José Roberto; Cybis, Luiz Fernando; Aisse, Miguel Mansur; Sobrinho, Pedro Alem. Póstratamento de efluentes de reatores anaeróbios por lodos ativados. In: CHERNICHARO, C. A. D. L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios:** aspetocs metodológicos. Belo Horizonte: [s.n.], 2001. p. 118. Projeto PROSAB.

SPERLING, M. V.; ANDREOLI, C. V. Introdução. In: ANDREOLI, C. V. E. A. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias/Vol.6 - Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Belo Horizonte: FCO, 2001. p. 13-16.

SPERLING, M. V.; GONÇALVES, R. F. Lodo de esgotos: características e produção. In: ANDREOLI, C. V. E. A. **Princípios do tratamento biologico de águas residuárias/ Vol.6 - Lodo de esgotos:** tratamento e disposição final. Belo Horizonte: FCO, 2001. p. 17-67.

Sperling, Von; Aisse, Miguel; Haandel, Adrianus; Campos, José; Filho, Bruno; Sobrinho, Pedro. Tratamento e Destino Final do Lodo Gerado em Reatores Anaeróbios. In: CAMPOS, J. R. **Tratamento de esgotos sanitários por processos anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999. p. 464. Projeto PROSAB.

Spinosa, Ludovico; Ayol, Azize; Baudez, Jean-Christophe; Canziani, Roberto; Jenicek, Pavel; Leonard, Angelique; Rulkens, Wim; Xu, Guoren; Dijk, Lex van. Sustainable and Innovative Solutions for Sewage Sludge Management. **Water**, Prague, v. 3, p. 702-717, 2011.

STOCKHOLM CONVENTION. Convention Text as amended in 2009. **Stockholm Convention on Persistente Organic Pollutantes (POPs)**, 2009. Disponivel em: <a href="http://chm.pops.int/Convention/ConventionText/tabid/2232/Default.aspx">http://chm.pops.int/Convention/ConventionText/tabid/2232/Default.aspx</a>. Acesso em: 2013 out. 22.

TAKEMOTO, S. Y. Pré-tratamentos de lodos biológicos gerados nos processos de lodos ativados para o aumento da sua biodegradabilidade através de hidrólises enzimática, térmica e alcalina. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 242 p.

TOLEDO, J. D. S.; MARIA, I. C. D.; DECHEN, S. C. F. **MPACTO DE CHUVAS INTENSAS NA EROSÃO HÍDRICA EM SOLO COM TRATAMENTO DE LODO DE ESGOTO**. 60 CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA. Jaguariúna: CIIC 2012. 2012. p. 10.

- TRANNIN, I. C. B.; MOREIRA, F. M. D. S.; SIQUEIARA, J. O. Crescimento e nodulação de Acacia mangium, Enterolobium contortisiliquum e Sesbania virgata em solo contaminado com metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 743-753, 2001.
- TSUTIYA, M. T.; COMPARINI, J. B.; ALEM, P. S.; HESPANHOL, I.; CARVALHO, P. C. T.; MELFI, A. J.; MELO, W. J.; MARQUES, M. O. Características de biossólidos gerados em estações de tratamento de esgoto. In: TSUTIYA, M. T. **Biossólidos na Agricultura**. São Paulo: SABESP, 2001.
- TUROVSKIY, I. S.; MATHAI, P. K. **Wastewater Sludge Processing**. Hoboken: Jonh Wiley & Sons, Inc., 2006. 354 p.
- USEPA, U.S.E.P.A.-. Emerging Technologies for Biossolids Management. Washington: EPA 832-R-06-005, 2006.
- VAN HAANDEL, A. C.; ALEM SOBRINHO, P. Produção, composição e constituição de esgoto. In: ANDREOLI, C. V. **Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 417. Projeto PROSAB.
- VANZETTO, A. S. Análise das Alternativas Tecnológicas de Desaguamento de Lodos Produzidos em Estações de Tratamento de Esgoto. Brasília: Publicação PTARH.DM 139/12, 2012. 185 p.
- VERAS, L. R. V.; POVINELLI, J. A VERMICOMPOSTAGEM DO LODO DE LAGOAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS CONSORCIADA COM COMPOSTO DE LIXO URBANO. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 218-224, 27 maio 2004.
- VIEIRA, G. E. G. **Resíduos da produção industrial de borracha (ETRI) e bebida (ETE) - Uma avaliação pela tecnologia de LTC**. [S.l.]: Dissertação (Mestrado) Universidade Federal Fluminense, 2000. 322 p.
- VIERIA, G. E. G. Fontes alternativas de energia Processo aperfeiçoado de conversão térmica. [S.l.]: Tese (Doutorado) Universidade Federal Fluminense, 2004. 181 p.
- VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias Volume 1:** Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1995. 240 p.
- VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de águas Residuárias Volume 4: Lodos Ativados. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2012.
- Wang, L.K.; Li, Y.; Shammas, N.K.; Sakellaropoulos, G.P. Drying beds. In: WANG, L. K.; SHAMMAS, N. K.; HUNG, Y.-T. **Biossolids Treatment Processes**. Totowa: Humana Press Inc., 2006. p. 403-428.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Design of municipal wastewater plants**. [S.l.]: Manual of Practice n.8, v. 2, 1992.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Operation of municipal wastewater treatment plants**. 5th. ed. Alexandria: Manual of Practice MOP 11, v. 3, 1996.

Wei, Yuansong; Houten, Renze T. Van; Borger, Arjan R.; Eikelboom, Dick H.; Fan, Yaobo. Minimization of excess sludge production for biological wastewater treatment. **Water Research**, v. 37, p. 4453-4467, 2003.

WENG, C.-H.; LIN, D.-F.; CHIANG, P.-C. Utilization os sludge as brick materials. **Advances in Environmental Research**, 2003. 679-685.

WILLIAMS, P. T. **Waste treatment and Disposal**. 2nd. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2005.

YAMANE, L. H. AVALIAÇÃO DA HIGIENIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CAIXA DE AREIA DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo Centro Tecnológico, 2007.

Yin, Xuan; Hanl, Pingfang; Lu, Xiaoping; Wang, Yanru. A review on the dewaterability of bio-sludge and ultrasound pretreatment. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 11, p. 337–348, 2004.

# APÊNDICE A

Caracterização agrícola do lodo

Tabela A1 – Parâmetros para caracterização agrícola.

Potencial agronômico					
Parâmetro	Unidade	CONAMA 375 (2006)	CETESB (1999)	IN Nº25 de 2009 (fertilizantes)	
pH	-	Lodo/Solo	Lodo/Solo	mínimo 6	
Matéria Orgânica	mg/kg	Solo	Solo		
Fósforo Total	mg/kg	Lodo/Solo	Lodo/Solo	-	
Cálcio total	mg/kg	Lodo/Solo	Lodo/Solo	teor mínimo: 1%	
Potássio total	mg/kg	Lodo/Solo	Lodo/Solo	-	
Magnésio total	mg/kg	Lodo/Solo	Lodo/Solo	teor mínimo: 1%	
Sódio total	mg/kg	Lodo/Solo	Lodo/Solo	-	
Acidez potencial (H+AI)	mmol/dm³	Solo	Solo	-	
Soma de bases (S)	mmol/dm³	Solo	Solo	-	
Capacidade de troca catiônica (CTC)	mmol/dm³	Solo	Solo	conforme declarado	
Porcentagem de saturação em bases	V%	Solo	Solo	-	
Carbono Orgânico	% p/p	Lodo	Lodo	mínimo 15%	
Umidade	% p/p	Lodo	Lodo	máximo 70%	
Nitrogênio Total	mg/kg	Lodo	Lodo	-	
Nitrogênio Kjeldahl	mg/kg	Lodo	Lodo	conforme declarado	
Nitrogênio amoniacal	mg/kg	Lodo	Lodo	-	
Nitrogênio nitrato/nitrito	mg/kg	Lodo	Lodo	-	
Enxofre total	mg/kg	Lodo	-	teor mínimo: 1%	
Sólidos voláteis	% p/p	Lodo	Lodo	-	
Condutividade elétrica	μS/cm	Solo	Solo	-	
Sólidos totais	% p/p	Lodo	-	-	
Relação C/N	-	-	-	máximo 20	
Boro	mg/kg	_	-	teor mínimo: 0,03%	
Cloro	mg/kg	-	-	teor mínimo: 0,1%	
Cobalto	mg/kg	-	-	teor mínimo: 0,005%	
Ferro	mg/kg	-	-	teor mínimo: 0,2%	
Manganês	mg/kg	-	_	teor mínimo: 0,05%	
Silício	mg/kg	-	-	teor mínimo: 1%	
Cobre	mg/kg	_	-	teor mínimo: 0,05%	
Molibdênio	mg/kg	-	-	teor mínimo: 0,005%	
Níquel	mg/kg	-	-	teor mínimo: 0,005%	
Zinco	mg/kg	-	-	teor mínimo: 0,1%	
Concentração máxima de substâ		ias permitida no lodo	de esgoto ou pro		
Parâmetro	Unidade	CONAMA 375 (2006)		IN Nº25 de 2009 (fertilizantes)	
Arsênio	mg/kg	41	75	20	
Bario	mg/kg	1300	-	-	
Cádmio	mg/kg	39	85	3	
Chumbo	mg/kg	300	840	150	
Cobre	mg/kg	1500	-	-	
Cromo	mg/kg	1000	-	200	
Mercúrio	mg/kg	17	57	1	
Molibdênio	mg/kg	50	75	-	
Níquel	mg/kg	420	420	70	
Selênio	mg/kg	100	100	80	
Zinco	mg/kg	2800	7500		

Agentes Patogênicos no lodo						
Parâmetro	Unidade	CONAMA 375 (2006)	CETESB (1999)	IN Nº25 de 2009 (fertilizantes)		
			10 <sup>3</sup> (classe A)			
Coliformes termotolerantes	NMP/g ST	10³	2x10 <sup>6</sup> (classe B)	10³		
Ovos viáveis de helmintos	nº de ovos/g ST	0,25	-	0,25		
Salmonella sp	NMP/g ST	ausência em 10g de ST	0,75 (classe A)	ausência em 10g de matéria seca		
Vírus entéricos	UFP ou UFF/g ST	0,25	-	-		
Concentração pe	rmitidas de su	bstâncias orgânicas en	n solos agrícolas			
Parâmetro	Unidade	CONAMA 375 (2006)	CETESB (1999)	IN Nº25 de 2009 (fertilizantes)		
1,2-Diclorobenzeno	mg/kg	0,73	-	-		
1,3-Diclorobenzeno	mg/kg	0,39		-		
1,4-Diclorobenzeno	mg/kg	0,39		-		
1,2,3-Triclorobenzeno	mg/kg	0,01		-		
1,2,4-Triclorobenzeno	mg/kg	0,011		-		
1,3,5-Triclorobenzeno	mg/kg	0,5				
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno		0,16		-		
	mg/kg					
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	mg/kg	0,01	-	-		
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	mg/kg	0,0065	-	-		
Di-n-butil ftalato	mg/kg	0,7	-	-		
Di (2-etilhexil)ftalato (DEHP)	mg/kg	1	-	-		
Dimetil ftalato	mg/kg	0,25	-	-		
Cresois	mg/kg	0,16	-	-		
2,4-Diclorofenol	mg/kg	0,031	-	-		
2,4,6-Triclorofenol	mg/kg	2,4	-	-		
Pentaclorofenol	mg/kg	0,16	-	-		
Benzeno(a)antraceno	mg/kg	0,025	-	-		
Benzeno(a)fluorateno	mg/kg	0,052	-	-		
Benzeno(k)fluorateno	mg/kg	0,38	-	-		
Indeno(1,2,3-c,d)pireno	mg/kg	0,031	-	-		
Naftaleno	mg/kg	0,12	-	-		
Fenantreno	mg/kg	3,3	-	-		
Lindano	mg/kg	0,001	-	-		
Pol	unentes Orgân	icos Persistentes (POP	's)			
Parâmetro	Unidade	CONAMA 375 (2006)	CETESB (1999)	IN Nº25 de 2009 (fertilizantes)		
Aldrin	mg/kg	Anexo A	-	-		
Dieldrin	mg/kg	Anexo A	-	-		
Endrin	mg/kg	Anexo A	-	-		
Clordano	mg/kg	Anexo A		-		
Heptacloro	mg/kg	Anexo A	-	-		
DDT	mg/kg	Anexo B	-	-		
Toxafeno	mg/kg	Anexo A	-	-		
Mirex	mg/kg	Anexo A	-	-		
Hexaclorobenzeno	mg/kg	Anexo C	-	-		
PCB's	mg/kg	Anexo A/C	-	-		
Dioxinas e Furanos	mg/kg	Anexo C	-	-		

#### Legenda:

Lodo: análise do parâmetro somente no lodo Solo: análise do parâmetro somente no solo

Lodo/Solo: análise do parâmetro no lodo e no solo

ST: Sólidos Totais

NMP: Número Mais Provável
UFF: Unidade Formadora de Foco
UFP: Unidade Formadora de Placa

#### • Potencial Agronômico

Os parâmetros relacionados ao potencial agronômico são utilizados para caracterização física, química e microbiológica com a finalidade de estabelecer a taxa de aplicação, os critérios de operação, estocagem e monitoramento do lodo.

#### • Concentração de material orgânico

Não há menção, pelo MAPA, de substâncias orgânicas tóxicas em fertilizantes orgânicos, uma vez que se limita a verificação dos agentes fitotóxicos, patógenos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas.

A Norma Técnica P4.230 (CETESB, 1999) não se aplica para lodos contendo PCB's (*Polychlorinated biphenyl*), dioxinas e furanos. Neste caso, caberá ao Órgão de Controle Ambiental avaliar a necessidade de caracterização do lodo quanto à presença desses poluentes, considerando a origem do mesmo e análise da viabilidade da sua utilização na agricultura.

Segundo a Resolução CONAMA 375 (BRASIL, 2006) deve-se determinar, quantitativamente, os POPs constantes na Convenção de Estocolmo, porém é omissa quanto aos valores máximos permitidos. As substâncias presentes no Anexo A (STOCKHOLM CONVENTION, 2009), com exceção do Dieldrin que é aceito na agricultura, devem ser eliminadas do lodo. No Anexo B (STOCKHOLM CONVENTION, 2009) estão presentes substâncias que possuem o uso restrito a determinadas atividades, porém nenhuma relacionada à agricultura, devendo ser eliminadas. Por fim, o Anexo C (STOCKHOLM CONVENTION, 2009) trata de substâncias cuja formação é não intencional como, por exemplo, em reações químicas de combustão incompleta contendo matéria orgânica e cloro.

# FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO CLASSIFICAÇÃO/TIPO DATA REGISTRO Nº N° DE PÁGINAS 20 de novembro de 2013 DCTA/ITA/TC-066/2013 145 TÍTULO E SUBTÍTULO: Alternativas para o tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, Piracicaba-SP AUTOR(ES): Renan Hiroshi Saito 7. INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA 3. PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: Lodo; Disposição final; Sustentabilidade; Tratamento anaeróbio; Esgoto. 9.PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: Lodo; Tratamento de esgotos; Rejeitos líquidos; Desenvolvimento sustentável; Engenharia sanitária. 10. APRESENTAÇÃO: ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica. Orientador: Marcelo De Julio; coorientador: Marcio Antonio da Silva Pimentel. Publicado em 2013. 11. RESUMO: Este trabalho de graduação teve como objetivo estudar as alternativas relacionadas ao tratamento e disposição final do lodo gerado na ETE-Piracicamirim, focando em soluções que envolvam um gerenciamento sustentável do lodo. A partir da revisão da literatura, percebeu-se a importância da produção de lodo e suas características na concepção da fase líquida, uma vez que nos tratamentos anaeróbios a quantidade de lodo gerada é menor e ainda apresenta melhores características para o desaguamento se comparado aos processos aeróbios. Das alternativas de disposição final pesquisadas, vale destacar a utilização na agricultura por ser adequada para o cenário brasileiro de clima tropical e extensas áreas. Foram levantados os parâmetros, de acordo com a legislação vigente, que contemplam desde o potencial agronômico do lodo, quanto à presença de patógenos, metais pesados e substâncias orgânicas poluentes. Um resumo dos parâmetros para caracterização do lodo para o uso agrícola e apresentado no Apêndice A. Dessa forma, espera-se que o presente trabalho seja um instrumento de auxílio no gerenciamento sustentável do lodo em ETEs, podendo-se agregar valor a um resíduo sólido de forma a minimizar os impactos ambientais. <sup>12.</sup> GRAU DE SIGILO: ( ) CONFIDENCIAL ( ) SECRETO (X ) OSTENSIVO ( ) RESERVADO